

**UNIVERSITE DE LILLE**  
**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

[Année de soutenance : 2021]

N°:

THESE POUR LE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 7 décembre 2021

Par Robin LAUWERS

Né le 01 Juin 1996 à Beuvry - France

Intérêt de la navigation dynamique pour les praticiens expérimentés en  
implantologie

**JURY**

Président :	Pr Thomas COLARD
Assesseurs :	Dr Laurent NAWROCKY
	Dr Kèvimy AGOSSA
	<u>Dr Ludovic LAUWERS</u>
Membre invité :	Pr Gwenaël RAOUL



**UNIVERSITE DE LILLE**  
**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

[Année de soutenance : 2021]

N°:

THESE POUR LE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 7 décembre 2021

Par Robin LAUWERS

Né le 01 Juin 1996 à Beuvry - France

Intérêt de la navigation dynamique pour les praticiens expérimentés en  
implantologie

**JURY**

Président :	Pr Thomas COLARD
Assesseurs :	Dr Laurent NAWROCKI
	Dr Kévimy AGOSSA
	<u>Dr Ludovic LAUWERS</u>
Membre invité :	Pr Gwenaël RAOUL

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directeur Général des Services de l'Université	:	M-D. SAVINA
Doyen	:	E. BOCQUET
Vice-Doyen	:	A. de BROUCKER
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	M. DROPSIT

## **PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.**

### **PROFESSEURS DES UNIVERSITES :**

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
E. DELCOURT-DEBRUYNE	Professeur Emérite Parodontologie
C. DELFOSSE	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique
E. DEVEAUX	Dentisterie Restauratrice Endodontie

## **MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES**

K. AGOSSA	Parodontologie
T. BECAVIN	Dentisterie Restauratrice Endodontie
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
P. BOITELLE	Prothèses
<b>F. BOSCHIN</b>	Responsable du Département de <b>Parodontologie</b>
<b>E. BOCQUET</b>	Responsable du Département d' <b>Orthopédie Dento-Faciale</b> <b>Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire</b>
<b>C. CATTEAU</b>	Responsable du Département de <b>Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.</b>
X. COUDEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
<b>P. HILDEBERT</b>	Responsable du Département de <b>Dentisterie Restauratrice Endodontie</b>
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
<b>L. NAWROCKI</b>	Responsable du Département de <b>Chirurgie Orale</b> <b>Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille</b>
<b>C. OLEJNIK</b>	Responsable du Département de <b>Biologie Orale</b>
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie

**M. SAVIGNAT**

Responsable du Département des **Fonction-  
Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux**

T. TRENTESAUX

Odontologie Pédiatrique

**J. VANDOMME**

Responsable du Département de **Prothèses**

### ***Réglementation de présentation du mémoire de Thèse***

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

## **Remerciements :**

*Aux membres du Jury ...*

**Monsieur le Professeur Thomas COLARD**  
**Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**  
*Section Réhabilitation Orale*  
*Département Sciences Anatomiques*

Docteur en Chirurgie Dentaire  
Docteur au Muséum National d'Histoire Naturelle en Anthropologie  
Biologique Habilitation à Diriger des Recherches

Assesseur à la Recherche

*Vous m'avez fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury et je vous en suis sincèrement reconnaissant.*

*Je vous remercie pour la grande qualité de vos enseignements. J'espère que ce travail saura retenir votre attention.*

*Veillez trouver dans cet ouvrage l'expression de mes respectueuses salutations et de mon profond respect.*

**Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI**

**Maîtres de Conférences des Universités-Praticien Hospitalier des CSERD**

Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale Département Chirurgie orale

Docteur en Chirurgie Dentaire  
Docteur en Odontologie de l'Université de Lille 2

Maître en Biologie Humaine  
Certificat d'Études Supérieures d'Odontologie Chirurgicale

Secrétaire du Collège National des Enseignants de Chirurgie Orale et Médecine Orale

Chef du Service d'Odontologie du CHU de Lille  
Coordonnateur du Diplôme d'Études Spécialisées de Chirurgie Orale (Odontologie)  
Responsable du Département de Chirurgie Orale

*Vous avez accepté spontanément de participer à ce jury  
et je vous en remercie.*

*Veillez trouver ici l'expression de mon respect pour  
votre travail, votre implication et votre disponibilité.*

## **Monsieur le Docteur Kèvimy AGOSSA**

**Maitre de conférences des universités – Praticien Hospitalier des**

**CSERD**

*Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale Département Parodontologie*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Lille – mention Sciences de la vie et de la santé Master II Santé publique Évaluation médico-économique Recherche Clinique Certificat d'Études Supérieures en Parodontologie

Attestation d'Études Approfondies en Odontologie

Ancien Assistant des Hospices Civils de Lyon

Ancien Interne en Odontologie

Lauréat de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire

Responsable de l'Unité Fonctionnelle de Parodontologie au CHU de Lille

*Vous m'avez fait l'honneur d'accepter de siéger dans ce jury et je vous en suis sincèrement reconnaissant.*

*Je vous remercie pour la qualité de vos enseignements. Votre professionnalisme et votre rigueur m'ont beaucoup inspiré durant mon cursus et continuent de m'accompagner au quotidien .*

*Veillez trouver dans cet ouvrage l'expression de mes respectueuses salutations et de mon profond respect.*

**Monsieur le Docteur Ludovic LAUWERS**

**Praticien hospitalier au sein du service de Chirurgie Maxillo-Faciale et  
Stomatologie du CHU de Lille - Hôpital Roger Salengro**

Docteur en chirurgie dentaire qualifié en Chirurgie orale

Master I – Sciences biologiques et médicales

Master II – Management sectoriel des établissements sanitaires et médico-sociaux

*Je vous remercie d'avoir accepté la direction de ma  
thèse.  
Votre expérience et vos conseils m'ont été d'une grande  
aide dans sa rédaction.  
Votre confiance en mon travail m'a beaucoup touché.  
J'ai beaucoup appris grâce à vous. Je vous prie de  
trouver dans ce travail le témoignage de mes sincères  
remerciements ainsi que mon profond respect.*

**Monsieur le Professeur Gwenaël RAOUL**

**Professeur des Universités – Praticien hospitalier au sein du service de  
Chirurgie Maxillo-Faciale et Stomatologie du CHU de Lille - Hôpital Roger  
Salengro**

*Vous m'avez fait l'honneur d'accepter spontanément de  
siéger dans ce jury et je vous en suis sincèrement  
reconnaisant*

*Je vous remercie pour votre bienveillance et vos  
précieux conseils.*

*Je vous prie de trouver dans ce travail le témoignage de  
mes sincères remerciements ainsi que mon profond  
respect.*

***À mes proches ...***



## **Intérêt de la navigation dynamique pour les praticiens expérimentés en implantologie**

<b>1. La navigation et la robotique chirurgicale et implantaire</b> .....	<b>20</b>
<b>1.1. Généralités sur la robotique et la navigation chirurgicale</b> .....	<b>20</b>
1.1.1. Définition .....	20
1.1.2. Principe.....	21
1.1.3. Intérêt des robots à usage médical.....	24
1.1.4. Utilisation de la robotique médicale et champs d'application.....	25
<b>1.2. Classification des systèmes d'assistance peropératoire au positionnement en chirurgie implantaire</b> .....	<b>26</b>
1.2.1. Systèmes guidés ou robotique semi active .....	26
1.2.1.1. Guide à appuis muqueux.....	27
1.2.1.2. Guide à appuis osseux.....	28
1.2.1.3. Guide à appuis dentaires.....	29
1.2.2. Systèmes robotisés ou robotique active.....	30
1.2.3. Systèmes de navigation dynamique ou robotique passive .....	32
<b>2. Intérêt de la Navigation Dynamique en chirurgie implantaire au travers du système X-Guide</b> .....	<b>35</b>
<b>2.1. Apport de la navigation dynamique au quotidien</b> .....	<b>35</b>
2.1.1. Simplicité du système.....	35
2.1.1.1. Courbe d'apprentissage rapide .....	35
2.1.1.2. Simplicité du système et codification de la séquence .....	37
2.1.1.3. Confort .....	37
2.1.2. Sécurité .....	38
2.1.2.1. Précision.....	38
2.1.3. Optimisation du flux de travail et amélioration de la prise en charge globale	40
2.1.3.1. Amélioration de la prise en charge globale (parcours patient) .....	41
2.1.3.1. Ergonomie de travail .....	42
<b>2.2. Protocole d'utilisation X Guide</b> .....	<b>42</b>
2.2.1. Examens préalables à l'utilisation du X-guide .....	42
2.2.2. Mise en application clinique du X guide.....	49
<b>3. Etude de la navigation dynamique en implantologie par des praticiens au travers de cas complexes</b> .....	<b>58</b>
<b>3.1. Apport de la navigation dynamique dans les cas complexes</b> .....	<b>58</b>
3.1.1. Discussion.....	58
<b>3.2. Définition des cas complexes</b> .....	<b>71</b>
3.2.1. Difficultés chirurgicales.....	71
3.2.1.1. Hauteur osseuse .....	71
3.2.1.2. Position.....	71
3.2.1.3. Convergence radiculaire .....	71
3.2.1.4. Procidence sinusienne .....	72
3.2.1.5. Matériel chirurgical.....	72
3.2.2. Limites prothétiques.....	72
3.2.2.1. Versions dentaires ou espace réduit.....	72
3.2.2.2. Implants multiples.....	73
3.2.2.3. Position du col implantaire.....	73
3.2.3. Difficulté prothétique et chirurgicale .....	73
3.2.3.1. Édentement antérieur avec importante composante esthétique .....	74
3.2.3.2. Réhabilitation prothétique totale avec mise en charge immédiate .....	74
3.2.4. Indications.....	74
<b>3.3. Parcours patient</b> .....	<b>75</b>
<b>3.4. Conclusion</b> .....	<b>78</b>
<b>3.5. Axes d'amélioration</b> .....	<b>78</b>



L'implantologie dentaire est une discipline de l'art dentaire qui a pour finalité la mise en place d'une prothèse implanto-portée, unitaire ou plurale, ou la stabilisation d'une prothèse amovible, au moyen d'une ou plusieurs racines artificielles, dans l'os maxillaire ou la mandibule.

Cette thérapeutique, dont le succès clinique est éprouvé et qui offre une solution pérenne, nécessite néanmoins la prise en compte de nombreux facteurs et donc de sources d'échecs et difficultés potentielles.

La prise en charge et le traitement des patients en vue d'une réhabilitation implantaire ont considérablement évolués ces trente dernières années avec l'arrivée de l'imagerie 3D et l'essor de l'informatique dans les cabinets.

Ce bouleversement s'appuie sur deux facteurs à savoir l'arrivée de la radiographie 3D, via le scanner et le CBCT (Cone beam computed tomography pour imagerie volumétrique par faisceau conique) ainsi que les logiciels de traitement des fichiers acquis et de planification implantaire, de plus en plus accessibles.

L'acquisition de l'anatomie du patient en 3 dimensions offre la possibilité d'exploiter le volume osseux disponible à la pose implantaire mais aussi de limiter les erreurs pour assurer un meilleur pronostic pour l'implant et le patient.

La planification implantaire permet aux praticiens de définir la position souhaitée de l'implant dans ce volume en fonction du projet prothétique. A l'aide d'outils complémentaires comme un guide, il est possible de transposer cette position virtuelle à la réalité avec une précision plus ou moins grande et d'angler si besoin les implants.

Face à une demande croissante au cours des dernières années, le développement et la recherche autour de l'implantologie augmentent de manière exponentielle, dans le but de perfectionner les techniques de pose implantaire et d'assurer le succès thérapeutique. (1)

À ce jour, la technique conventionnelle à main levée se révèle être la plus courante des techniques de pose implantaire.

Parfois le recours à un guide chirurgical est préféré afin de transposer la planification implantaire en bouche dans le but de poser l'implant dans la position tridimensionnelle souhaitée.

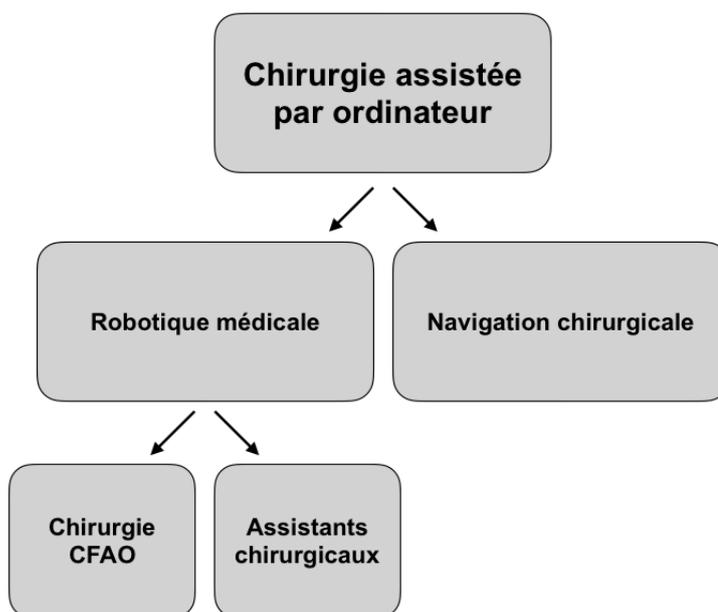
A l'instar d'autres spécialités chirurgicales, depuis quelques années, un nouveau système a vu le jour : la navigation chirurgicale.

## **1. La navigation et la robotique chirurgicale et implantaire**

### **1.1. Généralités sur la robotique et la navigation chirurgicale**

#### **1.1.1. Définition**

La navigation et la robotique chirurgicale sont des techniques assistées par ordinateur. Ces techniques liées sont comprises dans une catégorie plus grande qui est la chirurgie assistée par robot.



*Figure 1 :* Schéma explicatif des subdivisions de la chirurgie assistée par ordinateur

La robotique médicale fait intervenir des systèmes robotisés assistés par ordinateur. Le robot est l'un des éléments qui assiste le chirurgien dans la procédure chirurgicale que ce soit en pré opératoire, en per opératoire ou en post opératoire.

On distingue 2 branches de robotique médicale : la chirurgie CAO et FAO (CAD/CAM) et les assistants chirurgicaux.

La CAO pour conception assistée par ordinateur ou CAD en anglais pour computed-aided design, permet de concevoir un modèle virtuel.

La FAO pour fabrication assistée par ordinateur ou CAM en anglais pour computed-aided manufacturing, consiste en la fabrication d'un modèle 3D physique à partir du modèle virtuel.(2)

LA CFAO est donc l'addition des concepts de CAO et FAO

Les systèmes de chirurgie CFAO prennent en compte l'anatomie propre du patient dans le but d'optimiser la planification d'une intervention et son résultat. Cela permet d'envisager des chirurgies de moins en moins invasives et d'optimiser la procédure en prenant une marge de sécurité au travers de la connaissance préalable de l'anatomie du patient.

Les systèmes d'assistance chirurgicale fonctionnent en coopération avec le chirurgien. Ils ont pour but d'accroître la précision des gestes chirurgicaux d'un point de vue technique et mécanique. (3)

La navigation chirurgicale est un outil informatique destiné à aider le chirurgien au cours d'une intervention, afin d'atteindre une cible préalablement déterminée.

Cet outil est basé sur la superposition de l'image du patient (acquise en amont de l'intervention), de la planification chirurgicale et de la position réelle in situ des instruments et/ou d'une structure anatomique au cours de l'intervention.

En implantologie dentaire, le positionnement virtuel idéal de l'implant sur la planification constitue la cible à atteindre.(4)

### **1.1.2. Principe**

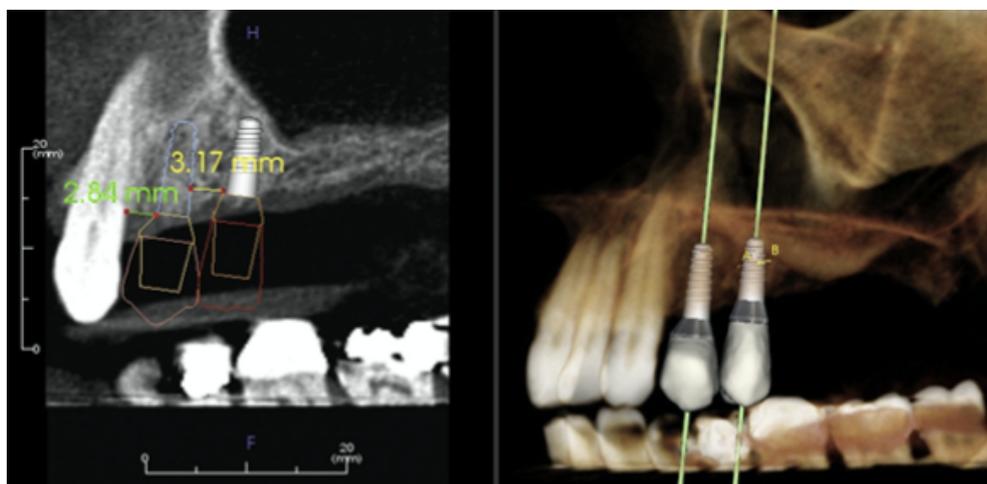
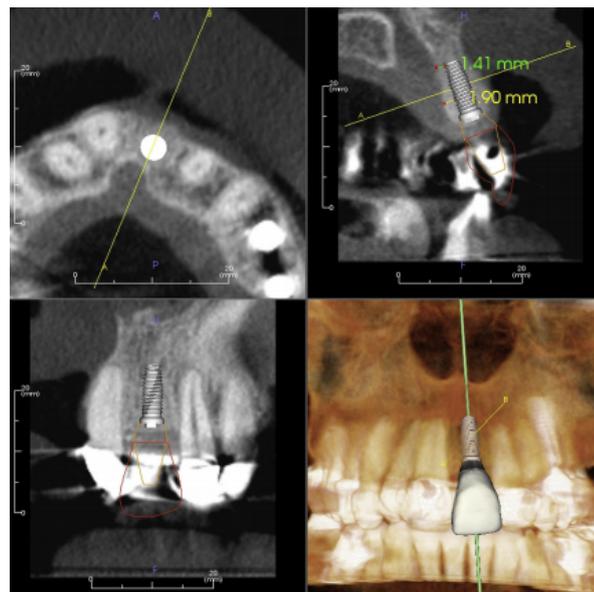
La chirurgie assistée par ordinateur utilise, via la CAO et de la FAO, une approche qui se divise en 3 étapes majeures.

- L'acquisition de l'anatomie préopératoire du patient par un système d'imagerie (Scanner, IRM, Cone Beam le plus souvent) constitue la première phase de travail ou phase d'acquisition.

Cette acquisition nécessite des repères propres au patient ou des repères extérieurs que l'on positionne de manière reproductible et qui servent de balises afin de pouvoir ensuite les recombinaison avec la réalité.

Ces images peuvent être combinées avec des informations générales sur l'anatomie humaine pour produire une reconstitution informatique du patient (patient virtuel) notamment du système dentaire.

On peut aussi y associer un projet prothétique sous la forme d'un Wax-up ou un projet virtuel 3D.



*Figure 2 et 3 :* Projet prothétique virtuel et planification implantaire pour le remplacement d'une incisive centrale maxillaire gauche et de deux prémolaires maxillaires gauches.(5)

- La phase préopératoire correspond à la planification.

La planification de la cible est réalisée sur la reconstitution informatique du patient préalablement acquise et consiste à définir une zone anatomique à

atteindre ou à placer virtuellement du matériel chirurgical destiné à être posé sur le patient au cours de l'intervention.

On définit aussi une phase pré-opératoire immédiate qui consiste à repositionner, recalculer l'image acquise par rapport à l'anatomie réelle du patient, une fois celui-ci installé sur la table d'opération. Cette étape nécessite des repères anatomiques ou un système de tracking basé sur le fonctionnement du GPS.

- La phase per-opératoire ou intra-opératoire correspond à la phase pendant laquelle le système de navigation ou le robot assistant la chirurgie est actif et va guider le chirurgien ou ses instruments vers la cible déterminée à l'étape de planification.

Cette phase couple l'imagerie acquise du patient avec l'information en temps réel, d'où la nécessité de la phase pré-opératoire immédiate.

En post-opératoire, les données patient recueillies peuvent être analysées sous forme de statistiques. (3)(4)(6)

Les robots assistants chirurgicaux interviennent différemment.

Ils sont actifs pendant la phase per-opératoire.

On subdivise cette catégorie en deux familles.

D'une part on trouve les *surgeon extenders*, littéralement les extensions du chirurgien. Ces robots sont contrôlés par le chirurgien et visent à augmenter ou compléter les capacités manuelles du chirurgien.

D'autre part, la famille des *auxiliaires de support chirurgicaux* regroupe les robots qui peuvent aussi être contrôlés mais qui fonctionnent en complément du chirurgien. Ils sont utilisés par exemple pour garder un endoscope focalisé sur une zone anatomique définie et contribuent à augmenter la concentration du chirurgien sur son geste en diminuant les actions parasites.(3)

Ces robots possèdent différents niveaux d'autonomie allant de 0 à 5 :

Niveau 0 : pas d'autonomie, l'opérateur effectue toutes les tâches.

Niveau 1 : Assistance du robot : L'opérateur maintient un contrôle continu pendant que le robot fournit une certaine assistance.

Niveau 2 : Tâche autonome : L'opérateur maintient un contrôle faible du système et le robot peut réaliser certaines tâches initiées par l'opérateur.

Niveau 3 : autonomie conditionnelle : L'opérateur sélectionne et autorise une action que le robot effectue par la suite sous le contrôle de l'opérateur.

Niveau 4 : Grande autonomie : Le robot est capable de prendre des décisions mais sous la supervision et le contrôle de l'opérateur.

Niveau 5 : Autonomie complète : l'opérateur n'entre pas en compte et le robot réalise entièrement la chirurgie. (7)

### **1.1.3. Intérêt des robots à usage médical**

De la chirurgie mini-invasive, la thérapie ciblée et l'optimisation des hôpitaux pour les interventions d'urgence, la conception de prothèses jusqu'à l'assistance à domicile, la robotique médicale représente l'un des secteurs à la plus forte croissance de l'industrie des dispositifs médicaux. (7)

Depuis quelques décennies, le monde médical bénéficie d'une robotisation croissante notamment dans le domaine chirurgical.

Initialement employés en neurochirurgie, les robots chirurgicaux sont dérivés et développés pour une multitude de disciplines et soumis à d'innombrables procédures et expérimentations cliniques afin de démontrer leur utilité. (8)

Les industriels, profitant de cet intérêt grandissant, participent au développement exponentiel de cette robotisation du paysage médical en collaboration avec les professionnels de santé.

#### 1.1.4. Utilisation de la robotique médicale et champs d'application

L'idée de créer une machine automatique capable de réaliser certaines tâches à notre place est assez ancienne puisqu'on trouve des traces de ce concept dans la mythologie grecque.

Le terme « robot » est créé par Karel Capek, un tchèque, en 1920.

« Rabota » signifie corvée, travail ou encore esclave dans les langues slaves.  
(9)(10)

Les robots ont été utilisés en chirurgie à partir des années 80.

Les premiers systèmes orthopédiques sont utilisés dès 1983, à savoir « Arthrobot » puis ROBODOC.(11)(12)

La première procédure chirurgicale assistée par un robot documentée est une biopsie cérébrale réalisée par Kwok en 1985 avec le PUMA, Programmable Universal Machine for Assembly, un bras robotique.

Le but de l'intervention est un prélèvement par biopsie le moins traumatisant et le moins invasif possible.

La planification chirurgicale à l'aide des imageries réalisées permet d'anticiper d'éventuels obstacles et de guider avec sécurité la sonde depuis une petite perforation de la voûte crânienne jusqu'à la zone concernée pour effectuer le prélèvement.(13)

La robotique médicale est employée aujourd'hui dans de nombreuses spécialités comme la chirurgie orthopédique, la chirurgie cardio-vasculaire, la chirurgie prostatique, la chirurgie coeliaque la neuro-chirurgie, la radiothérapie, la chirurgie maxillo-faciale ou encore la chirurgie dentaire, bien que son développement et son utilisation soient encore timides.

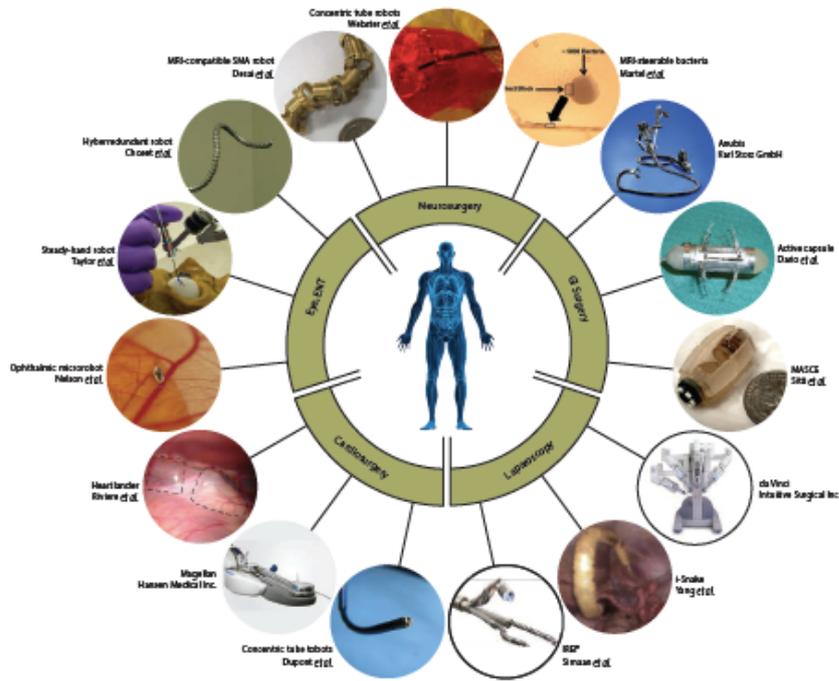


Figure 4 : Champs d'application de la robotique médicale (8)

L'analyse des performances voire de la supériorité de ces systèmes est une des questions soulevées. Face au coût de recherche et de développement, l'erreur serait de créer des systèmes dont le bénéfice clinique est relatif.(14)(15)

Les industriels commencent à s'intéresser davantage au domaine dentaire ; les systèmes et innovations qui concernent les autres branches médicales, déjà employés et éprouvés, sont désormais déclinés au monde de la dentisterie et de l'implantologie dentaire.

## 1.2. Classification des systèmes d'assistance peropératoire au positionnement en chirurgie implantaire

### 1.2.1. Systèmes guidés ou robotique semi active

Le robot ou système est désigné comme semi actif car il offre au chirurgien un guidage des instruments tout en laissant le contrôle des performances à l'opérateur.

Ce système de positionnement guide le chirurgien selon la trajectoire planifiée. Certains auteurs parlent de système synergique.(16)

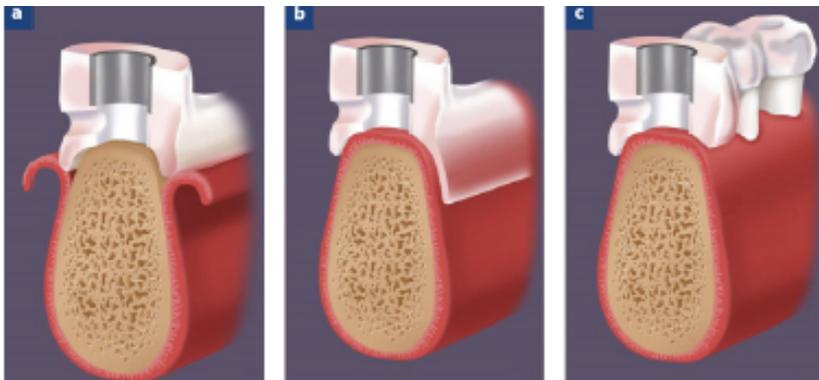
En implantologie orale, ces systèmes sont représentés par les guides chirurgicaux.

Ce ne sont donc pas des robots mais des outils ayant la même fonction. Ils permettent de guider l'opérateur en transposant la planification pré-opératoire à la réalité clinique intra orale.

Un guide chirurgical est un dispositif dans lequel se trouve des fûts, placés en fonction de la planification, qui serviront de tunnels de passage pour les forêts implantaires.

Un guide chirurgical est modélisé selon la planification. Il peut être fabriqué, usiné ou imprimé via une imprimante 3D. Il peut être à appui dentaire, osseux, muqueux ou mixte.

Le guide chirurgical doit permettre au praticien de placer un ou plusieurs implants à une profondeur et avec un axe et une émergence prédéfinis, avec le moins de tolérance possible. Il doit donc être stable et non flexible.(5)



*Figure 5* : Les différents types de guides chirurgicaux implantaires (6)

#### **1.2.1.1. Guide à appuis muqueux**

Ils sont indiqués dans les cas d'édentement total essentiellement, notamment pour réaliser une pose implantaire en flap less.

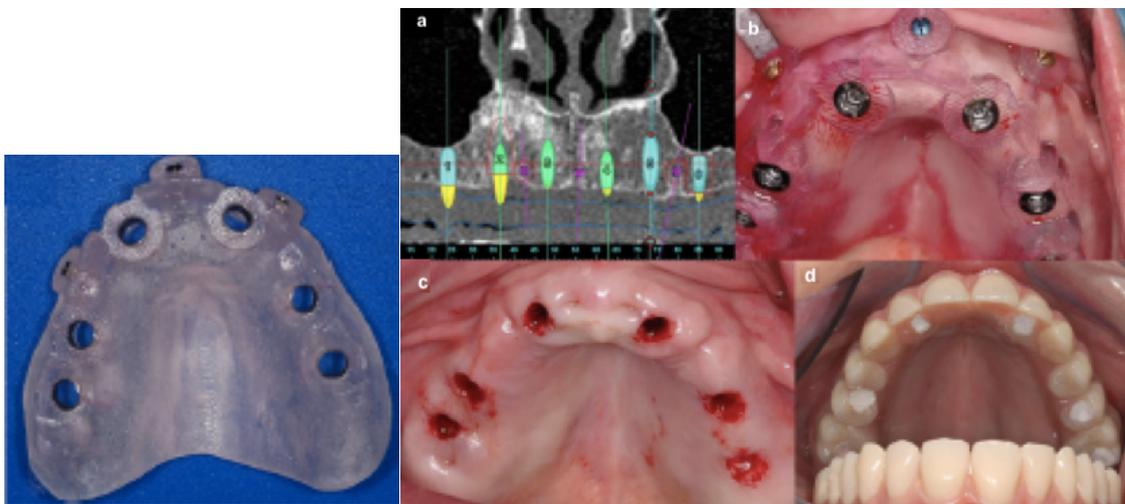
Ils sont surtout employés lorsque l'épaisseur des tissus mous est faible et que le relief osseux est prononcé afin de garantir leur stabilité.

Comme son nom l'indique, il est directement au contact muqueux. Sa mise en place est donc assez complexe. Il possède des cales en forme de dents afin de stabiliser partiellement l'occlusion.

Il est réputé moins précis que le guide à appui osseux du fait de la dépressibilité de la muqueuse.

L'instabilité et le risque de bascule obligent le praticien à utiliser une clé d'occlusion puis à poser des vis de stabilisation.(17)

Ce sont les guides les moins utilisés et les moins fiables.



*Figure 6 :* Guide chirurgical implantaire à appui muqueux. (18)

*Figure 7 :* (A) Cliché en coupe panoramique reconstituée de la planification implantaire pour 6 implants maxillaires. (B) Photographie du guide chirurgical à appui muqueux stabilisé en bouche à l'aide de minivis. (C) Photographie peropératoire de l'arcade maxillaire après retrait du guide et pose des 6 implants en technique Flap less. (D) Photographie post opératoire de l'arcade maxillaire après mise en charge du bridge provisoire.(18)

### **1.2.1.2. Guide à appuis osseux**

Placé directement au contact osseux, ce type de guide nécessite la levée d'un lambeau de pleine épaisseur.

Il est utilisé lorsque la levée d'un lambeau est nécessaire, lorsque l'on veut voir la crête pour appréhender des défauts osseux ou s'il y a une nécessité de réaliser un geste osseux associé, par exemple une ostéoplastie.

Il comporte des cales pour l'occlusion.

Ce type de guide nécessite une clé d'occlusion et la pose de vis de stabilisation.

Sa mise en place est complexe et peut nécessiter un décollement important.(17)



Figure 8 : Photographie d'une arcade maxillaire suite à un décollement de pleine épaisseur sur crête et extractions multiples. (6)

Figure 9 : Photographie intrabuccale d'un guide chirurgical implantaire à appui osseux (6)

### **1.2.1.3. Guide à appuis dentaires**

Ce type de guide s'appuie sur les dents.

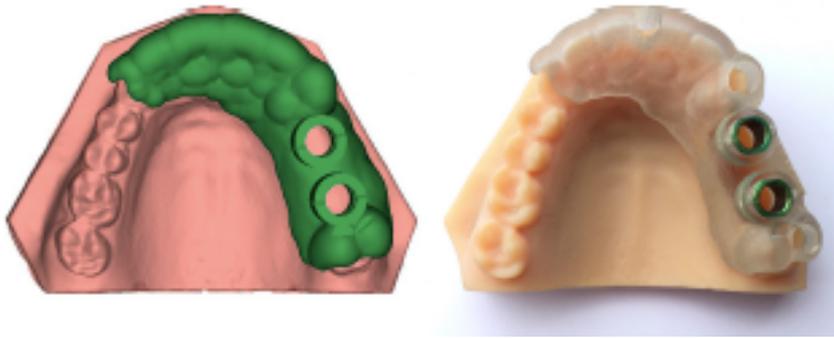
Il est indiqué en cas d'édentements encastrés antérieurs ou postérieurs et les édentements postérieurs courts (<30mm)

La levée d'un lambeau est facultative.

On peut ajouter ici les guides à appuis mixtes à savoir muco-dentaires qui prennent appuis à la fois sur les dents et sur les muqueuses dans des cas d'édentements encastrés de grande étendue (> 3 dents)

Facile à réaliser, il est aussi simple à mettre en place. Il est plus précis que les précédents mais nécessite une prise d'empreinte physique ou optique.

Ce type de guide doit être maintenu manuellement sur les dents. (17)



*Figure 10* : Guide chirurgical à appui dentaire virtuel puis usiné. (19)

### **1.2.2. Systèmes robotisés ou robotique active**

L'acte chirurgical est opéré par le robot.

L'opérateur, ici le chirurgien-dentiste, planifie, programme et contrôle le bon déroulement de l'intervention. (3)

Le système robotisé STAR (Smart tissue autonomous robot) a été créé afin de réduire les erreurs humaines lors d'actes chirurgicaux et ainsi d'améliorer les résultats pour le patient.

À terme, il a pour but d'effectuer des interventions chirurgicales complexes en collaboration avec le chirurgien avec le plus haut degré d'autonomie tout en garantissant un fonctionnement sécurisé à tout moment.

En effet, ce système permet au chirurgien de contrôler le robot manuellement si besoin mais il a été montré que le système STAR a réussi à inciser des tissus mous puis à les suturer plus précisément que des chirurgiens expérimentés.

Il fonctionne selon deux grands modes.

Le premier est un mode avec boucle de contrôle autonome c'est à dire que le robot à l'aide de ses caméras détecte la trajectoire dite de référence à inciser qui est convertie en signal informatique et une suite de points qui forme la trajectoire d'incision. Le robot calcule et enregistre alors les mouvements qui lui seront nécessaires pour réaliser ce tracé. Lors de l'incision le robot suit le tracé et effectue un contrôle direct de sa position via ses caméras et peut ajuster le trait.

Le second mode dit à boucle de contrôle manuel fonctionne aussi via les caméras mais c'est l'homme qui contrôle le tracé et la position du robot grâce

au retour visuel des caméras. Il peut ainsi réajuster la position du robot ou la trajectoire en lui donnant de nouvelles positions de référence.

À noter qu'il est possible de passer d'un mode à l'autre en temps réel.  
(20)(21)(22)

Le logiciel TomoRob de TaMed couplé à un système robot de MedicalIntelligence (deux sociétés allemandes) a permis d'assister un chirurgien-dentiste lors de 48 poses d'implants sur un total de 16 modèles, in vitro.

Le robot guide le geste du chirurgien selon la planification implantaire effectué préalablement via le logiciel TomoRob. Le principe utilisé par ce système est l'interpolation linéaire de plusieurs positions.

Bien qu'utilisé uniquement sur modèle, les résultats et notamment la précision de la pose des implants vis à vis de la planification sont satisfaisants. Néanmoins, les auteurs soulignent une certaine variabilité de la durée de l'acte de pose, dépendante de l'ordinateur et de son processeur.(23)

La première pose d'implant dentaire avec un système robot actif in vivo a eu lieu en Chine en septembre 2017.

Ce robot a été développé par la Beihang University de Beijing (Pékin) et la Fourth Military Medical University's Stomatological Hospital dans le but d'éviter les erreurs de nature humaine.

L'intervention à savoir la pose de deux implants a duré une heure et s'est déroulée avec succès dans la ville de Xian.

Le robot utilisé était le robot Yomi, constitué d'un bras articulé et d'un ordinateur associé.

Il guide la main du chirurgien dans la position exacte qui correspond à sa planification puis verrouille cette position, ne lui permet plus que le forage.

Ce système suit toutefois les mouvements du patient et s'y adapte en temps réel.(24)(25)

### 1.2.3. Systèmes de navigation dynamique ou robotique passive

Les systèmes passifs n'effectuent aucune action chirurgicale sur le patient. Ils jouent un rôle de guidage en aidant le chirurgien en pré-opératoire et en per-opératoire.(26)

Les systèmes de navigation chirurgicale sont capables de suivre les instruments du chirurgien et de donner leur position en temps réel. Cela est permis par un repère mis sur le patient et fixe par rapport à son anatomie ainsi que par l'imagerie 3D (Cone Beam le plus souvent) réalisée en amont de la chirurgie et utilisée lors de la planification.

On peut comparer ce fonctionnement avec celui du système GPS.

Ils permettent de visualiser la localisation des cibles chirurgicales à atteindre et des structures anatomiques nobles, préalablement identifiées voire marquées lors de la planification, l'orientation des instruments, et la « navigation » ou déplacement des instruments chirurgicaux par rapport à la planification réalisée en amont.(18)

Les systèmes RoboDent et Navident sont les plus connus dans le domaine de l'implantologie dentaire.



*Figure 11* : Photographie du système RoboDent (27)(28)

RoboDent est une firme allemande, première à concevoir un système de navigation dynamique et robotisé propre à l'implantologie orale.

Le système est composé d'une unité centrale avec un ordinateur contenant le logiciel de planification et de navigation, une caméra dite télémétrique, un écran de contrôle plus ou moins un écran secondaire et deux « trackers » ou traceurs optiques.

Un examen radiographique en 3 dimensions est réalisé au préalable sur le patient qui porte une gouttière en bouche à laquelle est clipé un arc.

Cet arc dit de navigation comporte 6 index en titane qui serviront de repères afin de confondre la radiographie tridimensionnelle avec l'anatomie du patient au moment de la chirurgie.

Cela permet aussi de réaliser une planification implantaire. RoboDent est d'ailleurs compatible avec de nombreux systèmes implantaires grâce à une bibliothèque d'implants fournie.

Lors de l'acte chirurgical, le praticien détache sa vision du champ opératoire et se concentre sur l'écran la majeure partie du temps.

Il dissocie alors ses yeux de ses mains. Il est guidé par des cibles pour effectuer les forages et la pose de l'implant, le but est pour lui d'être au centre de la cible et d'angler sa pièce à main afin de superposer les cercles présents sur l'écran.

Différents indicateurs permettent de repérer le centre de la cible (point bleu) donc le point d'émergence implantaire, l'angulation en superposant le point vert sur le point bleu, et une jauge verticale qui traduit la profondeur.

L'écran de contrôle comporte aussi des coupes axiales et transversales du site ainsi qu'un panoramique.(29)

Navident est un outil développé par ClaroNav.

Navident utilise globalement le même principe de GPS avec deux trackers, un pour le patient et un autre pour le praticien.

Ce système comporte un kart dont le bras comporte une partie sur laquelle repose l'ordinateur donc l'écran de visualisation ainsi qu'un bras en extension qui supporte la lumière LED et la caméra stéréoscopique MicronTracker.

A noter que le traceur patient est supporté par un « NaviStent », sorte de porte empreinte fenêtré rempli d'une pâte thermoformable dans les parties non fenêtrées, qui sert aussi lors de l'acquisition de l'imagerie tridimensionnelle.

(30)(31)



Figure 12 : (a) Interface du système Navident avec vision de la cible à gauche et guidage dynamique à droite. (b) Photographie d'une intervention à l'aide du système Navident. (c) Photographie du kart Navident. (32)

Une imagerie 3D et la planification implantaire sont préalablement réalisées.

Le jour de l'intervention on replace le NaviStent en bouche et on procède à l'intervention en suivant la même logique que pour RoboDent. On dissocie les mains du regard et on se repère via des cibles sur l'écran du système. (33)

Le dernier système de navigation dynamique pour le domaine de l'implantologie dentaire est le X Guide, développé par Nobel Biocare.

Il reprend les grands principes de RoboDent et Navident dans son fonctionnement.

Nous allons détailler ce système au travers de ce travail.

## 2. Intérêt de la Navigation Dynamique en chirurgie implantaire au travers du système X-Guide

La navigation dynamique est un outil de plus en plus présent dans le paysage de l'implantologie.

Conçue pour aider les praticiens, les fonctionnalités du X-Guide justifient son utilisation croissante.

### 2.1. Apport de la navigation dynamique au quotidien

#### 2.1.1. Simplicité du système

##### 2.1.1.1. Courbe d'apprentissage rapide

L'étude "Implant placement accuracy using dynamic navigation" réalisée in vivo, vise à étudier la courbe d'apprentissage relative à la pose d'implants via le système de navigation dynamique X-Guide et à comparer la position des implants mis en place versus leur position sur la planification.

Table 2 Summary of Guided Surgical Data, Mean (SD)							
	Angular deviation (deg)	Global platform (mm)	Platform depth deviation (mm)	Platform lateral deviation (mm)	Global apical (mm)	Apical depth deviation (mm)	Apical lateral deviation (mm)
<b>Cases 1-10</b>							
Surgeon 1	4.05 (3.65)	1.10 (0.29)	0.72 (0.42)	0.75 (0.16)	1.48 (0.60)	0.74 (0.41)	1.15 (0.71)
Surgeon 2	2.67 (1.59)	1.55 (0.53)	0.93 (0.64)	1.05 (0.54)	1.63 (0.69)	1.09 (0.88)	1.05 (0.25)
Surgeon 3	5.10 (2.99)	1.91 (0.65)	1.66 (0.69)	0.88 (0.25)	2.24 (0.78)	1.79 (0.70)	1.29 (0.54)
Total	3.94 (3.04)	1.52 (0.61)	1.10 (0.72)	0.89 (0.38)	1.78 (0.77)	1.21 (0.82)	1.16 (0.54)
<b>Cases 11-20</b>							
Surgeon 1	5.14 (3.53)	1.68 (0.52)	1.08 (0.63)	1.12 (0.50)	2.01 (0.79)	1.05 (0.64)	1.45 (1.03)
Surgeon 2	3.39 (1.87)	1.45 (0.57)	1.10 (0.76)	0.75 (0.29)	1.64 (0.61)	1.12 (0.77)	1.14 (0.50)
Surgeon 3	2.74 (1.63)	1.27 (0.76)	1.10 (0.72)	0.57 (0.37)	1.51 (0.80)	1.08 (0.72)	0.96 (0.56)
Total	3.76 (2.69)	1.47 (0.65)	1.09 (0.71)	0.81 (0.46)	1.72 (0.77)	1.08 (0.71)	1.18 (0.76)
<b>Cases 21-30</b>							
Surgeon 1	3.16 (2.15)	1.39 (0.39)	0.94 (0.38)	0.97 (0.33)	1.34 (0.41)	0.91 (0.42)	0.92 (0.35)
Surgeon 2	3.33 (2.11)	1.04 (0.61)	0.84 (0.62)	0.55 (0.25)	1.30 (0.74)	0.85 (0.61)	0.87 (0.60)
Surgeon 3	-	-	-	-	-	-	-
Total	3.15 (2.12)	1.20 (0.53)	0.89 (0.50)	0.74 (0.36)	1.31 (0.58)	0.88 (0.51)	0.88 (0.48)
<b>Cases 1-30</b>							
Surgeon 1	4.11 (3.28)	1.39 (0.47)	0.91 (0.51)	0.95 (0.39)	1.61 (0.69)	0.90 (0.52)	1.17 (0.78)
Surgeon 2	3.13 (1.89)	1.35 (0.61)	0.96 (0.68)	0.78 (0.44)	1.52 (0.70)	1.02 (0.77)	1.02 (0.49)
Surgeon 3	-	-	-	-	-	-	-
Total	3.62 (2.73)	1.37 (0.55)	0.93 (0.60)	0.87 (0.42)	1.56 (0.69)	0.96 (0.66)	1.09 (0.66)

Figure 13 : Table de données concernant la navigation dynamique (34)

Ce tableau présente les résultats de l'étude concernant les déviations par rapport à la planification selon plusieurs paramètres.

Le chirurgien 2 a déjà utilisé un système de navigation dynamique par le passé. Sur les dix premiers cas le praticien 2 montre une précision et une habileté accrue. Ses résultats sont par ailleurs constants au fil du temps.

Les deux autres, à savoir le 1 et le 3 n'ont jamais utilisé de système de navigation dynamique.

Le chirurgien 3 s'y acclimata rapidement car suite à 20 cas, il obtient des résultats très satisfaisants et semblables au chirurgien n°2.

Le praticien n°1 s'en rapproche après 30 cas, ce qui est une progression relativement rapide et raisonnable car il obtient des résultats significativement plus précis qu'avec la technique à main levée réalisée en comparaison dès les premières poses. (figures 13 et 14)

Table 3 Summary of Freehand Surgical Data, Mean (SD)							
	Angular deviation (deg)	Global platform (mm)	Platform depth deviation (mm)	Platform lateral deviation (mm)	Global apical (mm)	Apical depth deviation (mm)	Apical lateral deviation (mm)
Surgeon 1	8.13 (5.70)	1.59 (0.43)	0.86 (0.62)	1.08 (0.64)	2.38 (0.99)	0.83 (0.54)	2.11 (1.11)
Surgeon 2	6.88 (2.78)	1.82 (0.40)	1.14 (0.59)	1.27 (0.47)	2.73 (0.46)	1.08 (0.53)	2.39 (0.70)
Total	7.69 (4.92)	1.67 (0.43)	0.96 (0.62)	1.15 (0.59)	2.51 (0.86)	0.92 (0.55)	2.21 (0.99)

Figure 14 : Table de données concernant la technique à main levée (34)

Durant cette phase d'apprentissage, les résultats obtenus sont, dès le début, satisfaisants et s'améliorent au fil du temps

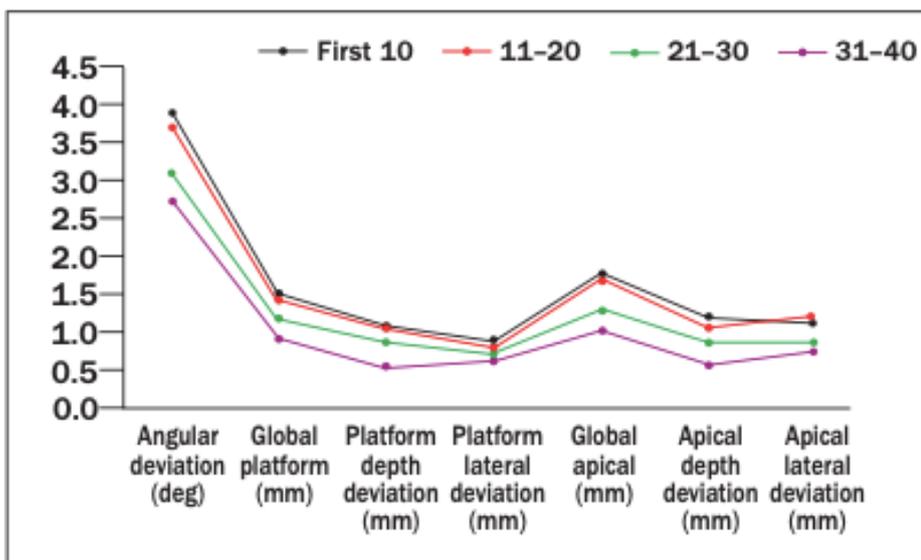


Figure 15 : Mesures de déviation par rapport à la planification par tranche de 10 chirurgies(34)

La courbe d'apprentissage du système est rapide, quelques dizaines de chirurgies permettent d'acquérir une très bonne maîtrise du X-Guide.(figure 15)  
(34)

#### **2.1.1.2. Simplicité du système et codification de la séquence**

L'utilisation de la navigation dynamique suit un protocole simple et strict qui ne demande que le matching de la réalité avec la planification et le calibrage des forêts.

Ces étapes sont assez rapides à réaliser :

- le matching, qui permet la planification implantaire, consiste en la superposition de plusieurs fichiers informatiques afin de les faire correspondre.
- le calibrage lors de la chirurgie, est la définition d'une relation entre les trackeurs et les capteurs des caméras afin d'étalonner et de quantifier leurs rapports dans l'espace.

De plus cette codification de la séquence offre une simplicité d'exécution car chaque étape est identifiée par le système et doit être validée pour pouvoir passer à la suivante.

#### **2.1.1.3. Confort**

La simplicité du système de par son protocole d'utilisation et la codification de la séquence entre autres, permettent un confort pour le praticien, en termes d'ergonomie et en termes de confort mental.

Le guidage à tout instant de la chirurgie affranchit le chirurgien lors de l'acte chirurgical et le travail intellectuel repose désormais en grande partie sur la planification.

On peut s'affranchir d'outils tel qu'un guide chirurgical ce qui offre une meilleure vision du site opératoire et dispense de l'inconfort généré par le guide lorsqu'il est mobile, instable ou qu'il se fracture.

## 2.1.2. Sécurité

### 2.1.2.1. Précision

L'étude "*Implant placement is more accurate using dynamic navigation*", réalisée in vivo sur 478 patients, vise à comparer la précision de la pose d'implants (714) selon différentes techniques de pose implantaire (main levée et navigation dynamique) en étudiant la divergence entre planification et résultat post opératoire.

Cette étude a été réalisée par 4 chirurgiens-dentistes.

Les auteurs comparent différents paramètres entre la planification implantaire et les imageries de contrôle : déviation angulaire, déviation de l'apex, déviation de l'émergence et les différences de profondeur de l'apex et de la plateforme implantaire.

Les 3 techniques de pose implantaire suivantes sont étudiées et comparées.

Les praticiens emploient le X-guide sur la totalité de la séquence avec la technique de guidage complet (FG : fully guided).

La technique partiellement guidée, PG (partially guided) ne fait intervenir la navigation dynamique que pour la préparation du site implanté. L'implant sera positionné manuellement (nécessité d'une vision directe, torque nécessaire pour l'implant trop important pour le système).

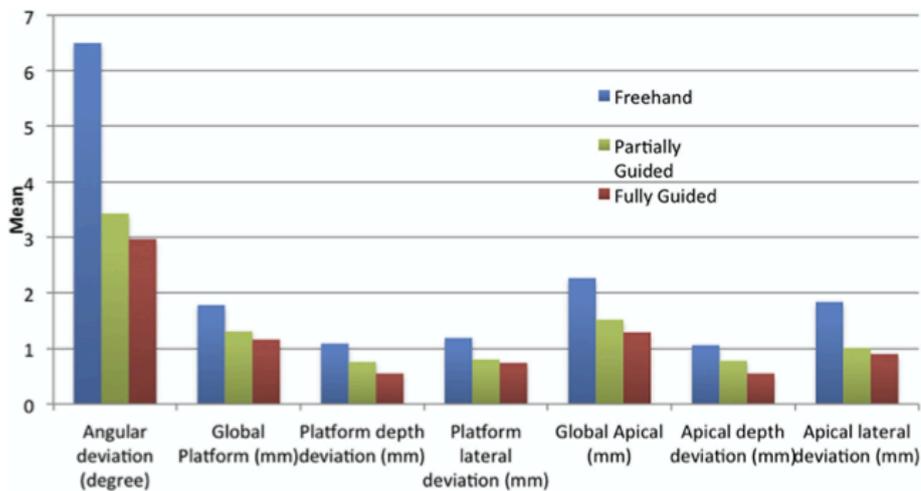
La technique à main levée FH (free hand) ne fait pas intervenir la navigation dynamique.

**Table 5. 95% CONFIDENCE INTERVALS OF ACCURACY MEASUREMENTS ACROSS METHODS**

Accuracy Measurement	Method	Mean	SE	95% CI	
				Lower Bound	Upper Bound
Angular deviation (°)	FH	6.398	0.309	5.791	7.004
	FG	2.948	0.248	2.462	3.435
	PG	3.986	0.225	3.543	4.428
Global platform (mm)	FH	1.647	0.078	1.493	1.801
	FG	1.150	0.063	1.027	1.273
	PG	1.431	0.057	1.318	1.543
Platform lateral deviation (mm)	FH	1.122	0.057	1.011	1.234
	FG	0.686	0.046	0.597	0.776
	PG	0.883	0.042	0.802	0.965
Apical lateral deviation (mm)	FH	1.704	0.083	1.541	1.866
	FG	0.859	0.066	0.729	0.989
	PG	1.201	0.060	1.082	1.320
Global apical (mm)	FH	2.093	0.092	1.912	2.273
	FG	1.280	0.074	1.135	1.425
	PG	1.684	0.067	1.553	1.816
Apical depth deviation (mm)	FH	0.974	0.084	0.808	1.139
	FG	0.810	0.068	0.677	0.943
	PG	1.015	0.062	0.894	1.136
Platform depth deviation (mm)	FH	0.965	0.084	0.799	1.130
	FG	0.809	0.067	0.677	0.942
	PG	0.986	0.061	0.865	1.106

Abbreviations: CI, confidence interval; FG, fully guided; FH, frechand; PG, partially guided; SE, standard error.

*Figure 16 :* Table de données sur les mesures de précision selon les différentes techniques de pose implantaire avec un intervalle de confiance de 95%. (35)



*Figure 17 :* Valeurs moyennes de précision en fonction de la technique chirurgicale employée. (35)

Si on regarde la différence d'angulation des implants (déviatoin angulaire) par rapport à la planification implantaire, on obtient en moyenne 2,95 degrés (°) de divergence d'inclinaison pour les implants posés en technique FG.

La technique PG donne une moyenne de 3,98° de différence d'angulation. La technique FH donne un résultat moyen de 6,40° de divergence.

On observe une différence entre la technique FG et PG à hauteur de 25% de divergence.

La différence entre la technique FG et la technique FH est d'environ 55% de divergence. Cela signifie que l'on obtient une déviation de l'angle de l'implant au moins deux fois moins importante par rapport à la planification de départ en utilisant la technique FG au lieu de la FH.

La différence de précision est significative concernant ce paramètre.

La déviation de positionnement latéral de l'émergence implantaire est d'environ 0,69mm avec la technique FG. En technique FH, on obtient une valeur moyenne de 1,12mm soit presque 0,5mm de différence (39%).

La déviation de positionnement latéral de l'apex implantaire est de 0,9mm entre la technique FG et la technique FH.

La technique FG donne une déviation de 0,86mm. La technique PG donne une déviation de 1,2mm en moyenne et la technique FH donne une valeur moyenne de 1,70mm.

Les différences en terme d'axe, de profondeur et d'émergence des implants mises en évidence par cette étude tendent à montrer la précision du système de navigation dynamique versus la technique FH et sa supériorité dans des cas qui peuvent s'avérer complexes notamment en cas de volume osseux contraint ou d'espaces réduits.(35) (figures 16 et 17)

### **2.1.3. Optimisation du flux de travail et amélioration de la prise en charge globale**

Le X-Guide a été conçu pour s'intégrer dans un environnement numérique complet ce qui n'est pas le cas des précédents systèmes. En effet, grâce au logiciel DTX studio, toute la logistique est regroupée sur le même système.

Le X-Guide permet de finaliser le flux numérique afin d'assurer le processus global de prise en charge du patient de l'imagerie à la pose en passant par la planification.

### **2.1.3.1. Amélioration de la prise en charge globale (parcours patient)**

Le nouveau logiciel DTX studio diagnose permet de s'affranchir du Cloud digital.

Il contient à la fois le fichier DICOM et STL mais aussi la panoramique et les éventuelles photographies du patient.

Tout devient virtuel et on crée alors un clone numérique en 3D.

On s'affranchit des étapes de laboratoire et leurs aléas comme l'acheminement et la coulée des empreintes, l'adaptation du guide, les délais de fabrication car on ne dépend plus d'un prestataire extérieur pour cette opération.

L'approche informatisée de la simulation des objectifs thérapeutiques et du stockage des données permet d'éviter le stockage physique encombrant des modèles en plâtre et le regroupement de l'ensemble des données du patient dans un même espace de stockage.

On peut aussi noter l'intérêt médico-légal de pouvoir stocker ces données et analyses qui seront facilement retrouvées. .

Cela représente également un atout de communication avec le patient car il permet de visualiser en 3D les objectifs thérapeutiques : le patient peut voir et comprendre l'indication implantaire avec les prothèses qui seront réalisées.

Il en est de même si le traitement nécessite la collaboration et la coordination de différents praticiens et prothésistes car l'interface DTX Go permet l'envoi des fichiers au prothésiste ou à un collaborateur.

De nombreuses tâches sont automatisées grâce à l'intelligence artificielle, comme le matching des fichiers, mais le praticien a toujours un contrôle sur celles-ci.

Cette automatisation permet un gain de temps et une simplification du travail de planification.

La procédure exclut la fabrication et l'essayage d'un guide ce qui réduit le nombre de rendez-vous et d'étapes intermédiaires et fluidifie le parcours de soins.

Même si cela ne doit pas être considéré comme une fonctionnalité principale, le système X-Guide offre la possibilité de replanification en peropératoire. Cela doit rester un outil occasionnel, car la planification initiale doit être la plus rigoureuse possible.

En effet, le but de la planification réalisée en amont est d'être uniquement guidé lors de la pose, sans avoir à réfléchir outre mesure au cas du patient en peropératoire et permet un gain de confort peropératoire.

Il est néanmoins intéressant dans certains cas particuliers de pouvoir moduler la planification en direct comme lors d'une ostéoplastie importante, une densité osseuse faible ou la nécessité de changer la position de l'implant ou le site d'implantation suite à un aléa.

#### **2.1.3.1. Ergonomie de travail**

La navigation dynamique offre une dimension nouvelle à la chirurgie implantaire.

Le verrou de la limitation d'ouverture buccale disparaît presque entièrement car il n'existe pas d'encombrement créé par un guide physique.

Le site opératoire est totalement dégagé et offre une parfaite visibilité en cas de contrôle visuel direct.

L'irrigation est également optimisée par rapport à l'utilisation d'un guide chirurgical.

La technique flap less est toujours envisageable.

## **2.2. Protocole d'utilisation X Guide**

### **2.2.1. Examens préalables à l'utilisation du X-guide**

- Examen clinique

Le positionnement tri dimensionnel des implants est un des facteurs déterminants du succès implantaire.

Les règles de positionnement sont définies à partir du projet prothétique et des impératifs biologiques. (36)

Lors de l'examen clinique, une fois l'indication implantaire posée, il est donc nécessaire de définir la ou les solutions prothétiques envisageables.

Il faut anticiper les difficultés prothétiques, chirurgicales et anatomiques dès l'examen clinique afin de concevoir le projet prothétique.

- Acquisitions radiographiques

Jusque septembre 2020, l'acquisition radiographique nécessitait la présence d'un dispositif amovible en bouche nommé X-clip.



*Figure 18* : Photographie d'un X-clip (37)

Lors de l'acquisition radiographique en 3 dimensions, ce dispositif repérable radiographiquement est positionné dans la bouche du patient.

Cette pièce est la clé de voûte du système.

Il s'agit d'un support plastique rempli d'une pâte thermoformable et qui comporte 3 billes métalliques.

Après avoir plongé le X-clip dans l'eau chaude, le praticien le place sur les dents du patient; la pâte durcit ce qui rend le clip rigide et repositionnable avec une grande reproductibilité le jour de l'intervention.

Le patient peut alors réaliser l'imagerie tridimensionnelle avec le X-clip en bouche pour obtenir le fichier DICOM.

Il peut être intéressant de noter que le CBCT donne des informations osseuses qualitatives mais ne donne pas d'informations sur les tissus mous contrairement au DentaScan.

Le ConeBeam permet aussi de réduire les artefacts métalliques. Un CT Scan peut aussi être réalisé.

Un champ de 5x5 cm est suffisant dans un cas unitaire ou lors de la pose de 2 implants côte à côte (une hém arcade concernée).

Dans le cas où il est nécessaire d'obtenir une plus large vision, c'est à dire une ou deux arcades complètes, un champ 15x15 est préconisé pour obtenir le maxillaire et la mandibule simultanément.

Le X-clip est la première version du dispositif repérable radiographiquement repositionnable.

Il doit être positionné sur des dents stables afin d'être repositionné à l'identique le jour de la chirurgie puisque le clip sert de support au tracker patient.



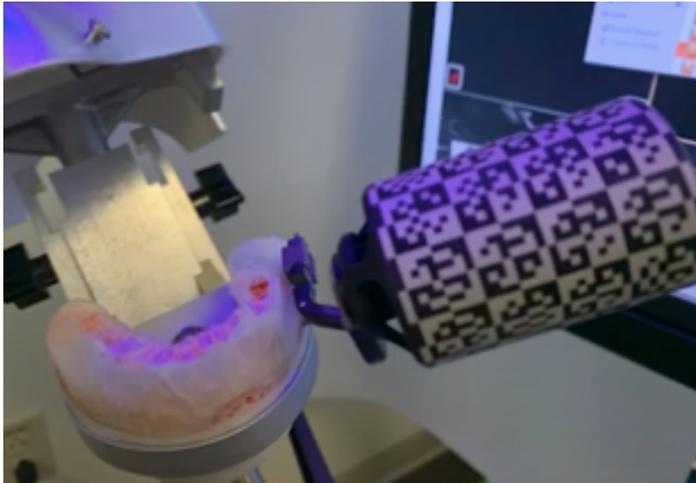
*Figure 19* : Photographie d'un X-clip positionné sur un modèle. (38)

Si les dents sont mobiles ou si le clip est instable, la technique n'est donc pas utilisable car le tracker patient aura une position erronée. La matching présentera des discordances avec la réalité et l'étape de calibration sera impossible.

Le E-clip (E pour edentulous c'est à dire édentement en anglais) permet de traiter les patients édentés totaux ou avec un édentement partiel d'une étendue importante (plus de 3 dents successives).

Ce repère se fixe sur l'os à l'aide de 2 à 5 minivis. Il est nécessaire de réaliser un lambeau. L'utilisation du E-clip est contraignante car il faut le positionner en amont afin pour réaliser l'imagerie tridimensionnelle.

Dans le cas d'un patient édenté total ancien (ou extraction implantation, simple ou multiples), il est intéressant car la navigation permet de visualiser le volume osseux et l'émergence du nerf ainsi que son trajet sur une crête réduite et mais aussi si on doit réaliser une ostéoplastie ou une régularisation.



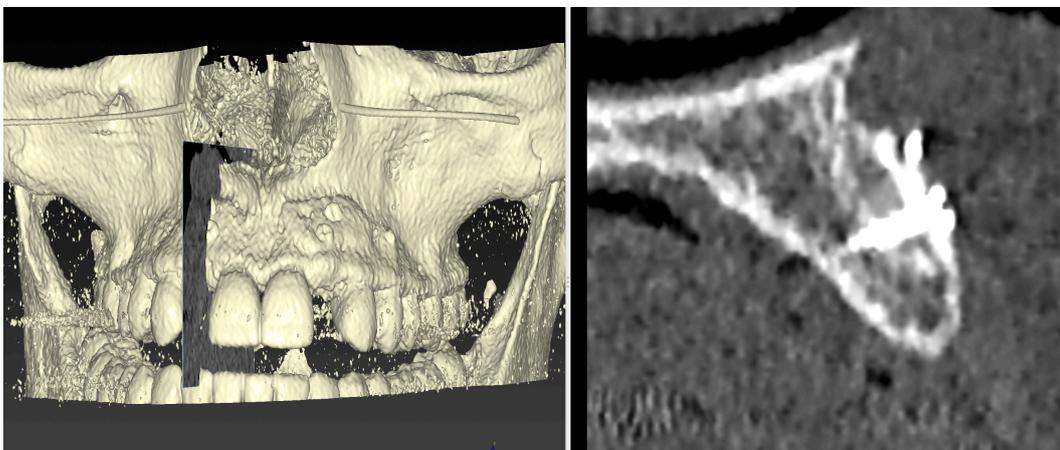
*Figure 20* : Photographie d'un tracker patient monté sur un E-clip positionné sur un modèle mandibulaire (38)

Désormais, la fonctionnalité X mark permet de réaliser la radiographie 3D sans le X-clip ou E-clip. Ce dernier (X-clip ou E-clip selon le cas) sera placé en bouche le jour de l'intervention afin de tenir la potence et le tracker patient.

- Simulation des objectifs thérapeutiques et planification informatique

3 paramètres guident la pose implantaire : le projet prothétique, l'aspect biologique et l'esthétique. On doit donc concevoir la planification implantaire en prenant en compte toutes ces données afin de le poser dans la position la plus optimale. Pour cela, il va falloir simuler les objectifs thérapeutiques.

Le fichier DICOM recueilli ne restitue que le volume osseux et dentaire.



*Figure 21* : À gauche : Reconstitution virtuelle en 3 dimensions issue d'un CBCT.

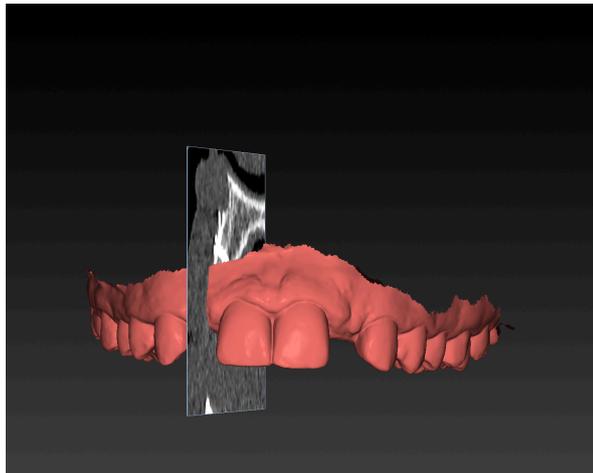
À droite : Coupe de CBCT centrée sur le site de la 12 après greffe.

Il semble donc nécessaire d'apporter des informations sur les tissus mous et le projet prothétique

Il est ensuite possible d'importer dans le logiciel de planification, d'autres fichiers notamment un fichier de type STL (données sur les surfaces dentaires et muqueuses), que l'on superposera au fichier DICOM. Pour ce faire, il faut repérer 3 points anatomiques remarquables tels que des cuspidés ou des saillies osseuses.

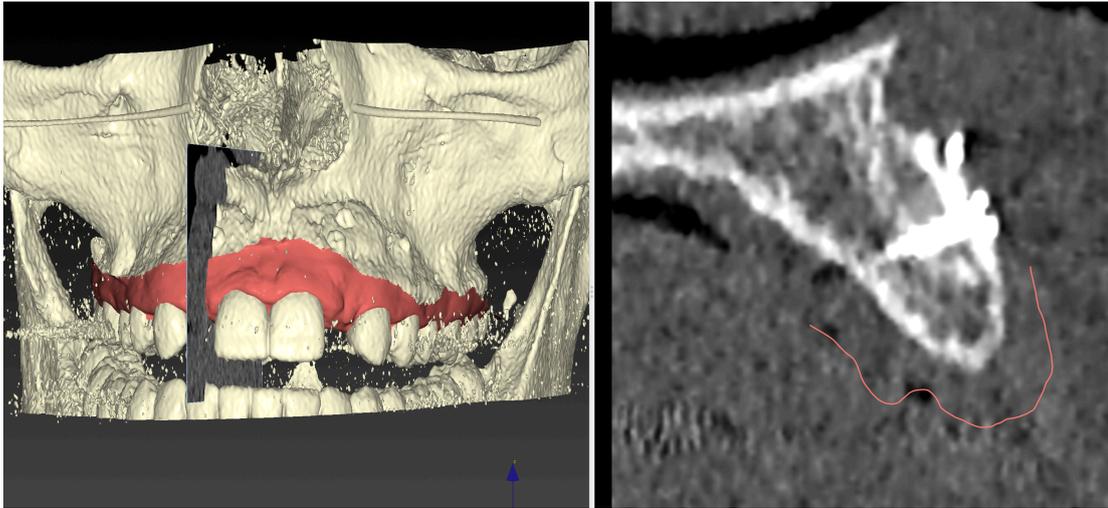
Ce fichier STL s'obtient soit à l'aide d'une empreinte optique avec une caméra intra-buccale ou, soit via un scanner de table de laboratoire par numérisation d'une empreinte physique ou d'un modèle en plâtre.

Il faut éviter de scanner l'empreinte car cela est une source d'erreurs fréquentes.



*Figure 22* : Cliché d'une reconstitution virtuelle en 3 dimensions issue d'un fichier STL acquis à l'aide d'une empreinte optique.

Le matching du fichier DICOM avec le fichier STL est réalisé automatiquement. Cependant, des artefacts perturbent parfois le matching automatique. Le praticien peut alors prendre le contrôle et effectuer manuellement le rapprochement des deux fichiers.



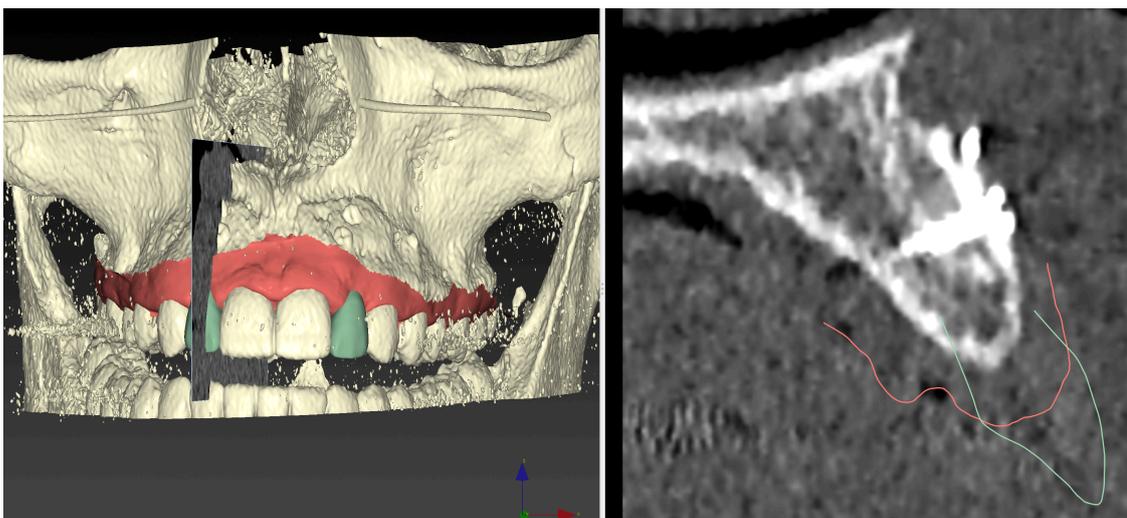
*Figure 23* : À gauche : Cliché d'une reconstitution virtuelle en 3 dimensions issue d'un CBCT superposé à un fichier STL.

À droite : Coupe de CBCT matchée avec le fichier STL, centrée sur la 12 (absente).

- Simulation des objectifs thérapeutiques

La simulation des objectifs thérapeutiques ou projet prothétique est une étape cruciale.

Afin de positionner l'implant dans une position idéale, il faut envisager la restauration prothétique car c'est elle qui guidera le positionnement de l'implant. Un wax up peut être réalisé mais il existe généralement sur les logiciels la possibilité de wax up virtuels proposés et à ajuster.



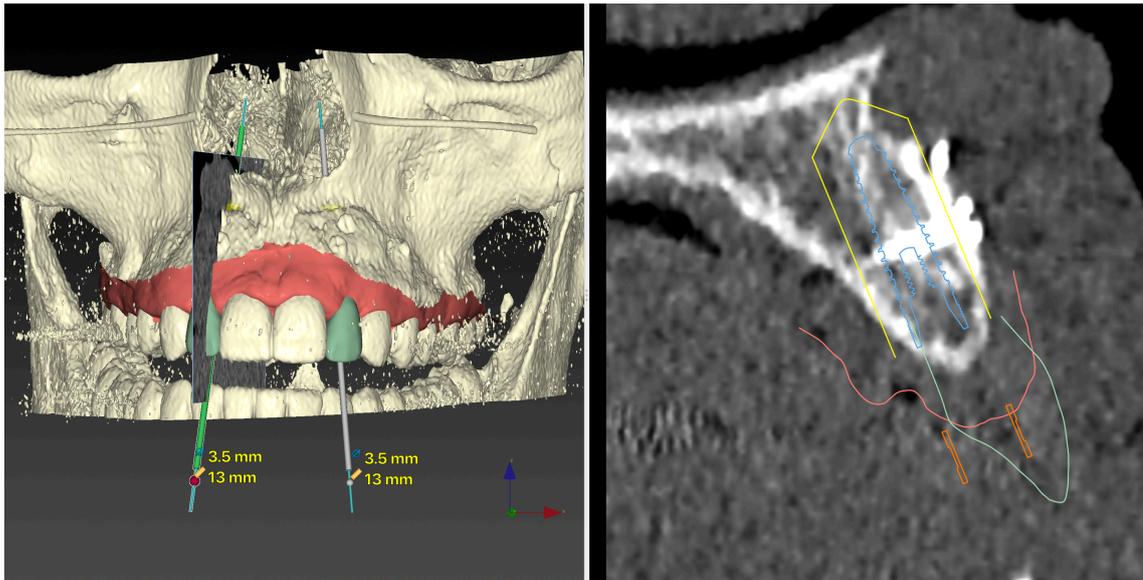
*Figure 24* : À gauche : Cliché d'une reconstitution virtuelle en 3 dimensions issue d'un CBCT superposé à un fichier STL et un projet prothétique.

À droite : Coupe de CBCT matchée avec le fichier STL et un projet prothétique, centrée sur la 12 (absente).

- Planification implantaire :

La simulation des objectifs thérapeutiques validée permet de passer à la planification implantaire à proprement parler.

Le positionnement de l'implant est choisi en fonction d'une part du volume osseux disponible et d'autre part de la restauration prothétique virtuelle définie en amont.



*Figure 25* : À gauche : Cliché d'une reconstitution virtuelle en 3 dimensions issue d'un CBCT superposé à un fichier STL, un projet prothétique ainsi qu'une planification implantaire.

À droite : Coupe de CBCT après planification implantaire d'un implant sur 12, matchée avec le fichier STL et un projet prothétique.

Une fois la planification réalisée, son transfert s'effectue facilement au moyen du réseau Wifi, d'une clé USB ou par voie filaire.

## Simulation des objectifs thérapeutiques (Projet prothétique)



*Figure 26 :* Processus reprenant les différents types de fichiers numériques nécessaire à la simulation des objectifs thérapeutiques.

### 2.2.2. Mise en application clinique du X guide

L'utilisation du X guide nécessite un protocole simple mais strict dont l'élaboration est primordiale.

Toute l'équipe opératoire doit se former afin de s'habituer au système et de l'exploiter pleinement et d'assurer une prise en charge fluide. C'est un véritable travail d'équipe.

Il est utile de préciser que le système n'a pas de batterie et fonctionne sur secteur donc avec des câbles électriques. Sa position devra donc être stratégique pour ne pas gêner les opérateurs.

- Installation du patient et anesthésie

Le patient va bénéficier d'une intervention chirurgicale au bloc opératoire ou dans une salle spécifique. Il est habillé puis installé au fauteuil.

Une fois l'anesthésie réalisée, le clip est positionné en bouche, dans une position identique à celle de l'empreinte préalable.

- Étape chirurgicale d'incision et de décollement de lambeau en cas de technique conventionnelle

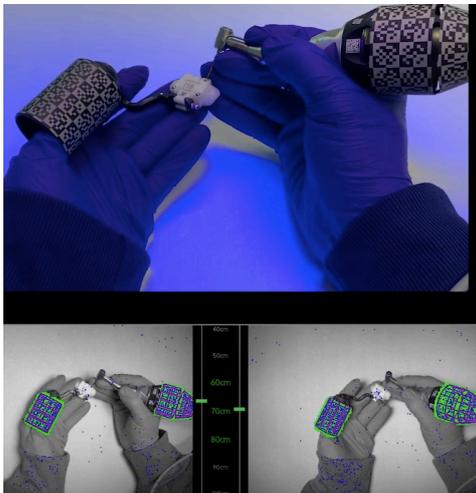
Si le cas nécessite une levée de lambeau, celle-ci est réalisée en vision directe avant le passage au système X-guide.

- Calibrage

Le système fonctionne sur le même principe que le GPS. Il est composé d'un ordinateur monté sur un kart relié à un écran juste au-dessus. Le kart est surmonté d'un dispositif de télémétrie, qui ressemble à un scialytique. Il s'agit des 2 caméras du système entourées par des LED à lumière bleue.

Deux pièces amovibles viennent compléter le système : les trackers. Le premier est positionné sur le contre angle, c'est le tracker praticien.

Le second est le tracker patient, fixé sur le clip dans une encoche prévue à cet effet.

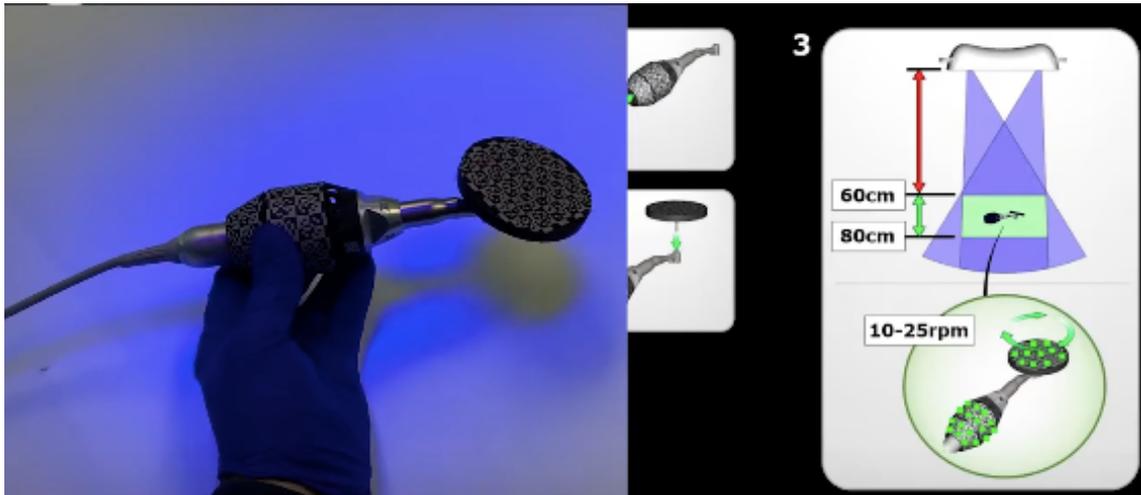


*Figure 27 :* Photographie des trackers patient et praticien montés sur le X-Clip et le contre-angle et identifiés par les caméras dans la partie inférieure de la photographie.(39)

Ces deux trackers doivent être reconnus par le système et sont donc calibrés. Ils doivent être positionnés à environ 70cm des caméras.

Le tracker praticien doit également être calibré à l'aide d'une pièce circulaire, le Disk, comportant un encodage du même type que les trackers. Il est

nécessaire d'actionner la pédale du moteur de chirurgie afin que cette pièce circulaire soit en rotation lente (10 à 25 tours par minute).



*Figure 28* : Photographie de la calibration du tracker praticien à l'aide du Disk(39)

Le repérage des structures osseuses et dentaires s'effectue à l'aide d'une sonde spéciale elle aussi munie d'un tracker. Elle est calibrée sur la Go plate.

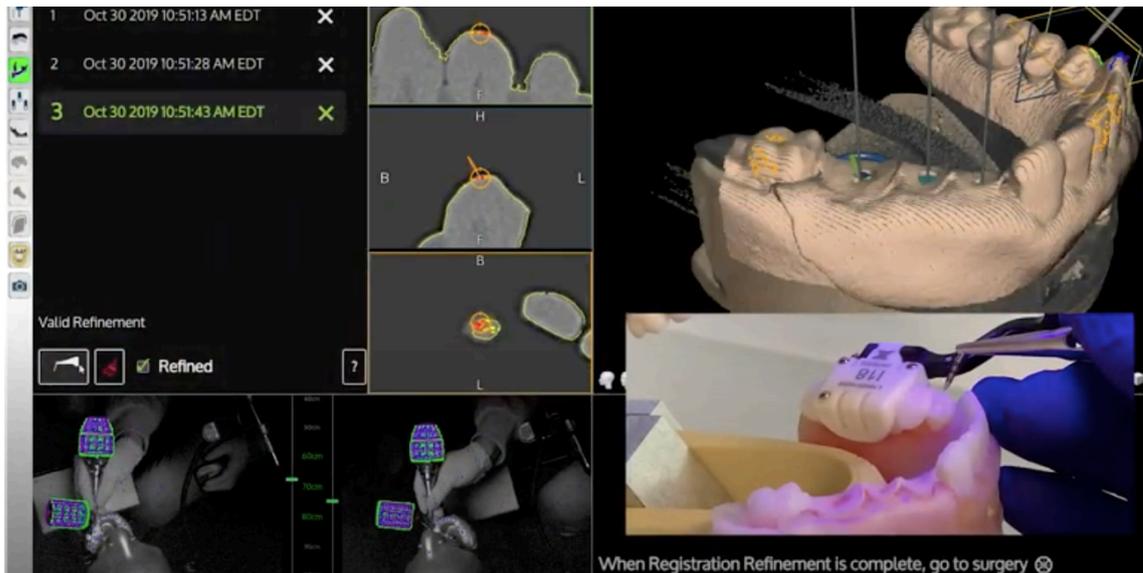


*Figure 29* : À gauche : Photographie de la X-Probe.

À droite : Photographie du tracker praticien à visser sur le contre-angle ou la X-Probe. (40)

Au préalable, le praticien définit via le fichier DICOM des repères anatomiques facilement identifiables comme des cuspides, un bord libre ou un relief osseux. Pour calibrer, il est nécessaire de définir au moins 3 points.

Une fois le X-Clip positionné en bouche, il faut pointer en bouche les zones prédéfinies à l'aide de la sonde et vérifier le positionnement de la pointe. Celle-ci doit se positionner exactement au contact de l'élément anatomique.



*Figure 30 :* Cliché issu de l'interface du X-Guide durant la vérification du matching à l'aide de la X-Probe.(41)

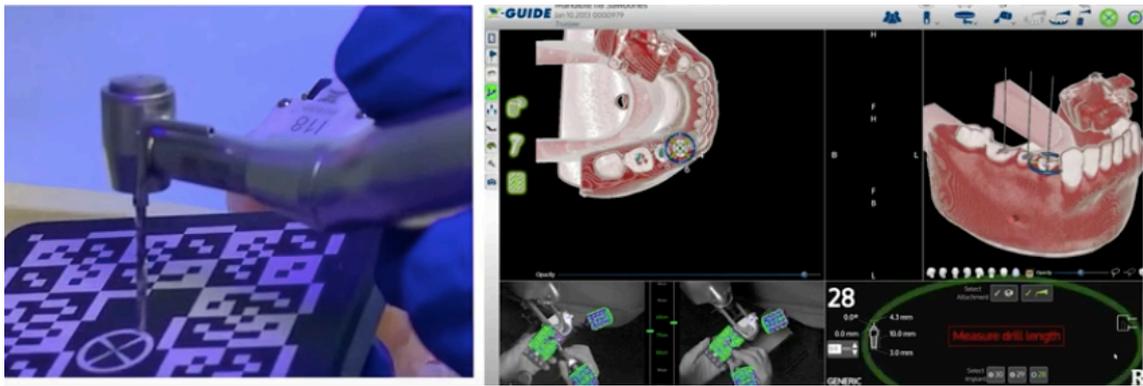
La sonde se positionne perpendiculairement à la surface pointée et plus les points sont éloignés, plus la calibration est précise.

Avant le début de la chirurgie, le forêt monté sur la pièce à main est calibré grâce à la Go-plate, une plateforme céramique elle aussi encodée.



*Figure 31 :* Photographie d'une Go-Plate(39)

Les trackers sont repérés par les caméras et permettent la triangulation. Il est donc possible d'évaluer en temps réel le déplacement du forêt dans le volume osseux.

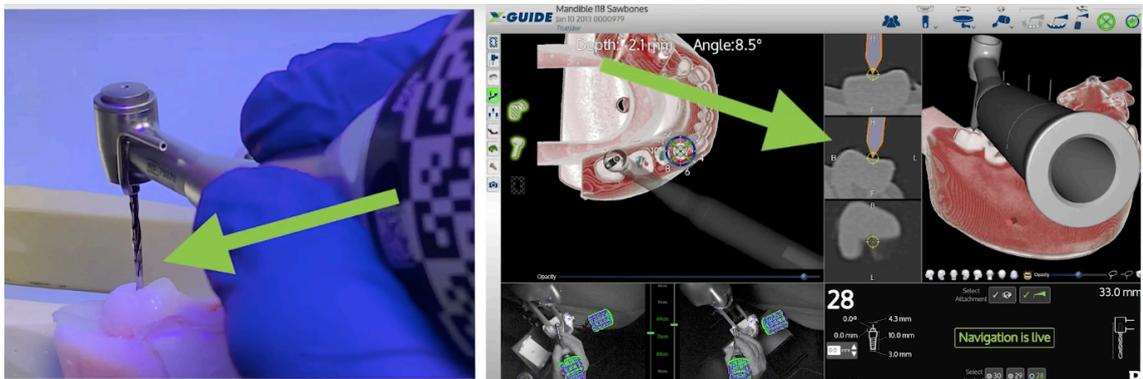


*Figure 32* : À gauche : calibration d'un forêt monté sur contre-angle à l'aide de la Go-Plate.  
À droite : Cliché issu de l'interface du X-Guide durant l'étape de calibration. (40)

Avant tout forage, la vérification du calibrage est nécessaire. Elle permet de contrôler la superposition de données radiographiques et de la réalité du patient.

Il suffit de pointer un élément anatomique connu en bouche et de vérifier que le forêt pointe bien le même élément sur l'écran donc sur les coupes MPR.

Il est préconisé de commencer par la face occlusale puis vestibulaire. Il est aussi nécessaire de pointer un élément anatomique éloigné du X-Clip ;



*Figure 33* : À gauche : vérification de la calibration avec pointage d'un sillon dentaire par la pointe d'un forêt préalablement calibré monté sur contre-angle.

À droite : Cliché issu de l'interface du X-Guide durant la vérification de la calibration. (40)

Une fois cette étape validée, le forage peut être entrepris.

Il est nécessaire de calibrer le forêt pointeur ainsi que le premier forêt jaugé, qui sont de longueurs différentes.

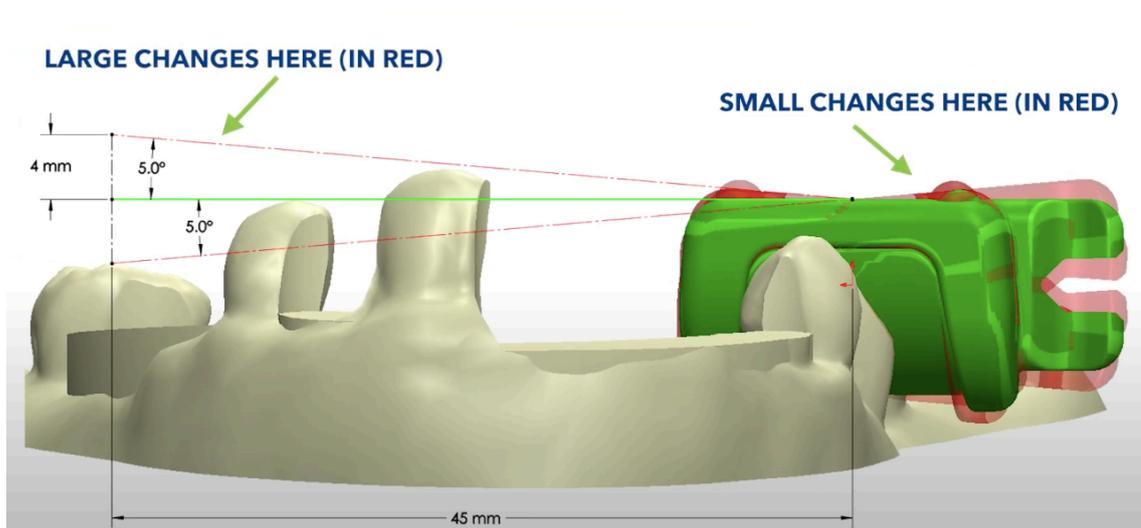
Si les autres forets jaugés de la séquence de forage sont de même longueur que le premier foret jaugé, on peut se dispenser du calibrage si l'on change de foret dans une fenêtre d'environ 20 secondes.

Cela est possible car ces forets ayant la même longueur, cela ne gêne pas le guidage dynamique.

À l'inverse, l'utilisation d'un prolongateur nécessite un recalibrage car la distance entre la tête de la pièce à main et la pointe du foret sera différente.

Si le X-clip n'est pas reconnu lors de l'étape de calibration, cela peut être dû au fait qu'il soit mal repositionné ou mobile.

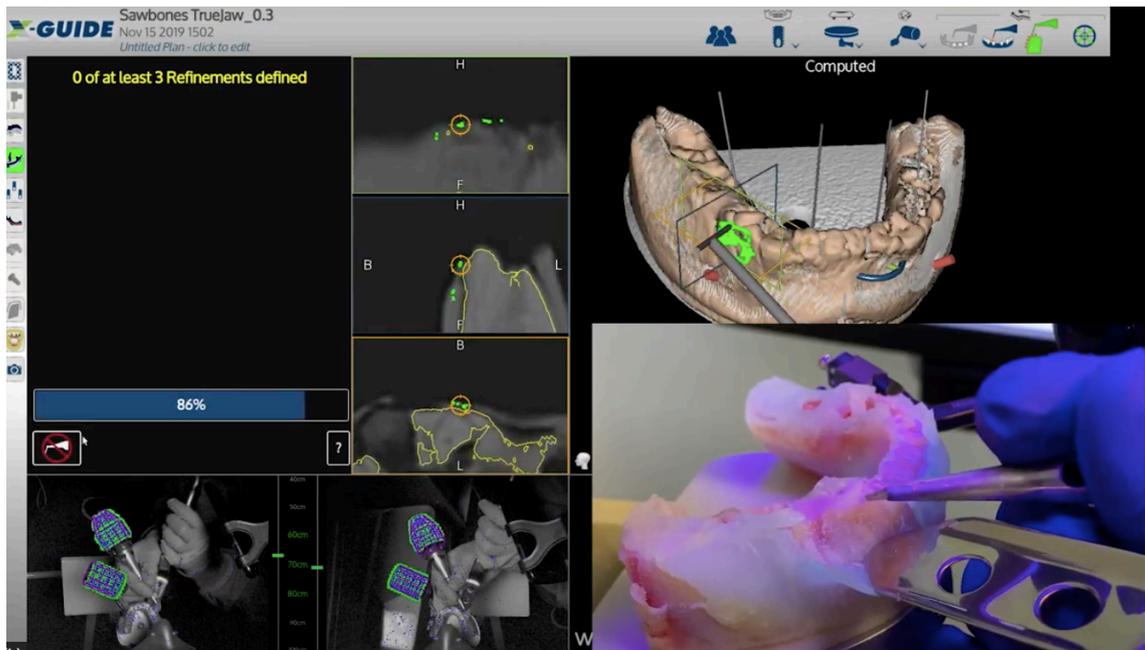
Un décalage apparaît ce qui signifie que le clip n'est pas positionné correctement en bouche.



*Figure 34* : Image explicative sur le décalage engendré par une malposition du X-clip provoquant une erreur de guidage. (40)

Si après vérification de ces hypothèses le problème persiste, il faut recalibrer en direct avec le X mark.

Le système permet de « colorier » une zone avec la pointe de la sonde spécifique. En définissant ainsi 3 nouveaux repaires (les surfaces parcourues par la pointe de sonde), il y a un recalibrage de la 3D avec la réalité.



*Figure 35* : Cliché de l'interface du système X-Guide lors du recalibrage en direct à l'aide de la X-Probe.(41)

Il existe une variable impossible à juguler à ce niveau : la distorsion de l'imagerie 3D. Le patient a bougé lors de l'acquisition et il faut refaire le CBCT. Néanmoins à ce stade, la planification étant déjà effectuée, le praticien a déjà manipulé la radiographie 3D et donc aurait du se rendre compte du problème.

- Forage

A partir de cette étape, le praticien ne regarde plus que l'écran du X-guide.

Cet écran est scindé en différentes fenêtres choisies par le praticien.

En haut à gauche se trouve la cible qui représente le point d'émergence. On observe aussi la pointe du foret en bleu et l'inclinaison de la tête du contre-angle.

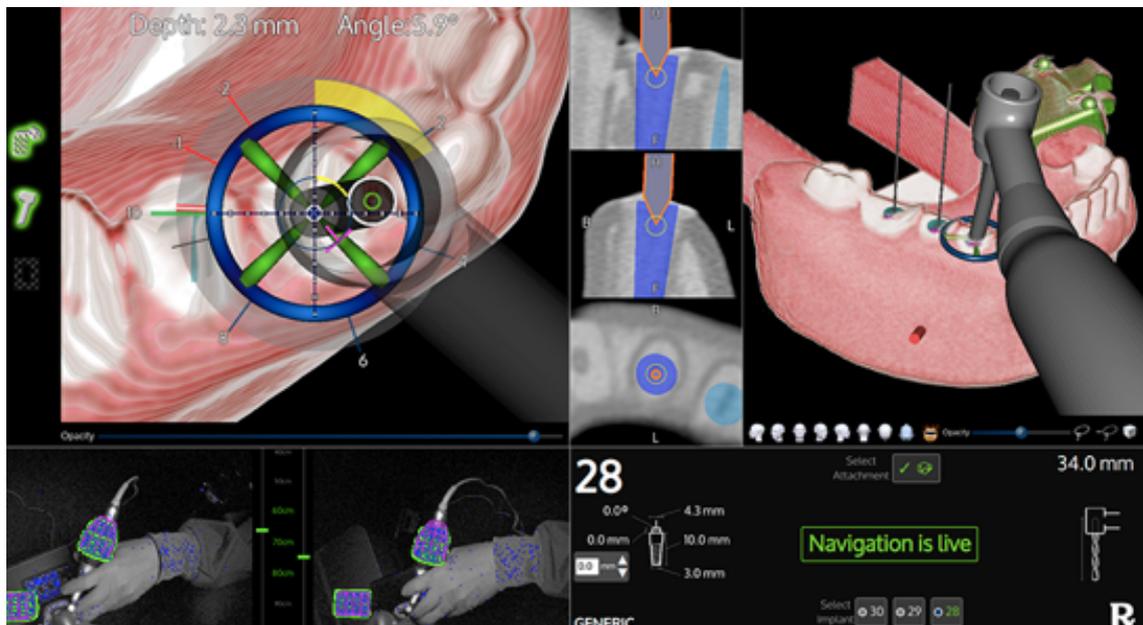
La jauge autour de la cible indique la profondeur et un code couleur indique la profondeur de forage en direct. On retrouve aussi l'information numérique de profondeur et d'inclinaison juste au dessus.

En bas à gauche se trouve l'écran de contrôle qui permet de s'assurer que les 2 trackers soient simultanément dans le champ des caméras.

En haut à droite se trouve une reconstitution 3D du volume osseux ainsi que les

coupes MPR dans les 3 dimensions de l'espace.

La fenêtre en bas à droite récapitule certaines données de la planification comme l'implant choisi et le site du forage choisi selon la planification.



**Figure 36 :** Cliché de l'interface du système X-Guide lors de la navigation avec :

- En haut à gauche : la vision de la cible et de la jauge de profondeur ainsi que la tête de contre-angle.
- En bas à gauche : la vision depuis les deux caméras avec les trackers dans leur champ.
- En haut à droite : une représentation de la mandibule ainsi que 3 plans de coupe à savoir frontal, sagittal et transversal qui permettent de visualiser la progression du forêt.
- En bas à droite : diverses informations relatives à la chirurgie notamment le type d'implant prévu et le statut du système ici en cours de navigation dynamique. (42)

On s'assure dans un premier temps de l'émergence implantaire. La pointe du forêt doit venir au centre de la cible.

Ensuite on définit l'axe de forage en superposant le cylindre sur la cible.

Enfin on peut suivre la profondeur via la jauge mais aussi via les coupes MPR.

Le praticien est focalisé sur l'écran et sur son geste. L'aide opératoire agit en bouche par un contrôle en vision directe permanent et vérifie le bon déroulement de l'intervention.

- Pose implantaire

L'implant peut être posé grâce au X-guide.

Dans ce cas, il faut présenter non pas le forêt mais l'implant sur la Go-plate.

- Reprise et fin de l'intervention en vision directe

Après la pose de l'implant, faite ou non avec le X-Guide, l'intervention est de nouveau réalisée en vision directe.

La pose de la vis de couverture ou de cicatrisation est réalisée manuellement.

La chirurgie peut éventuellement être complétée (membrane, ROG).

Le site est suturé et un contrôle radiographique peut être réalisé

Il s'en suit une mise en charge ou esthétique immédiate éventuelle.

### 3. Etude de la navigation dynamique en implantologie par des praticiens au travers de cas complexes

#### 3.1. Apport de la navigation dynamique dans les cas complexes

##### 3.1.1. Discussion

*Toute l'iconographie des cas présentés ci-dessous provient des cas personnels du Dr Benjamin ABADIE, que je remercie vivement, et est utilisée avec son accord.*

##### Cas n°1 :

Contexte : Le patient présente un édentement dans le secteur antérieur mandibulaire avec absence de l'incisive centrale mandibulaire droite 41 et l'incisive centrale mandibulaire gauche 31.

Le volume osseux et l'espace coronaire sont réduits.

Il y a une convergence des racines de l'incisive latérale mandibulaire gauche 32 et l'incisive latérale mandibulaire droite 42.

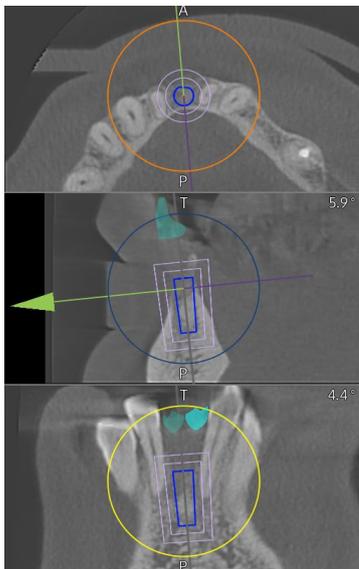


Figure 37 : Coupes transversale, sagittale et frontale de CBCT centrées sur 41/31 avec planification implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

Objectif : Pose d'implant selon le projet prothétique avec convergence radiculaire.

### Gestion :

Le volume osseux contraint en mésio-distal par la convergence des racines n'autorise pas la pose de deux implants même de diamètre réduit 3.0mm.

Il a été décidé de poser un implant unique en fonction du projet prothétique afin de respecter l'espace biologique et les marges de sécurité entre les éléments dentaires et implantaires.

Il s'agit d'un implant de diamètre 3,75mm avec émergence en 41 dans le but de réaliser un bridge cantilever sur implant avec 31 en extension.

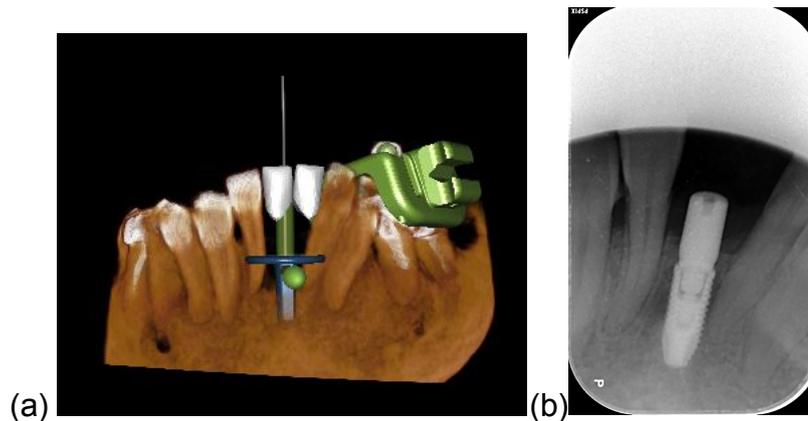


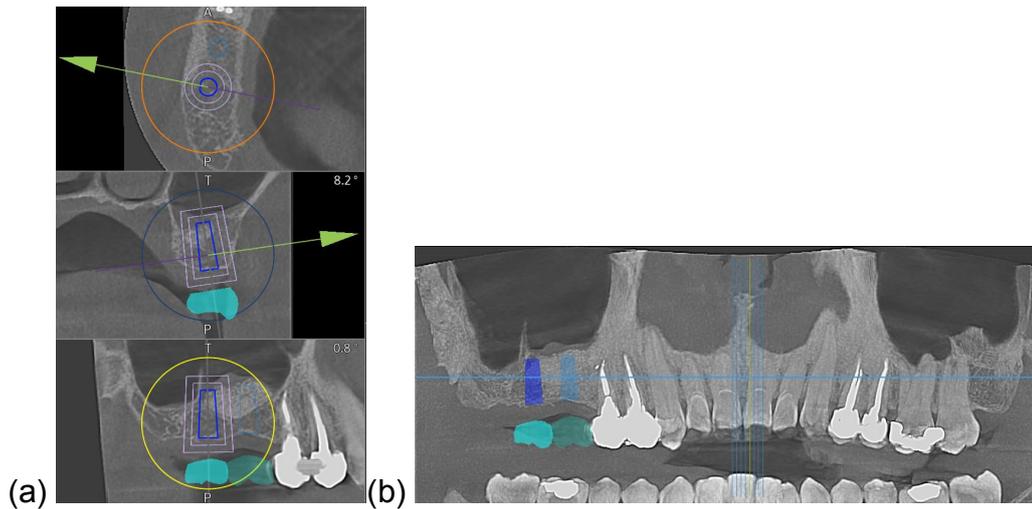
Figure 38 : (a) Reconstitution virtuelle du projet prothétique associé à la planification implantaire. (b) Radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire centrée sur 41/31 (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

### Cas n°2 :

#### Contexte :

Le patient présente un édentement terminal secteur 1 avec absence des deux molaires maxillaires droites, 16 et 17.

La hauteur de l'os résiduel est faible et contrainte par un sinus procident. Une élévation de sinus et un comblement de la partie antérieure du sinus ont été réalisés.

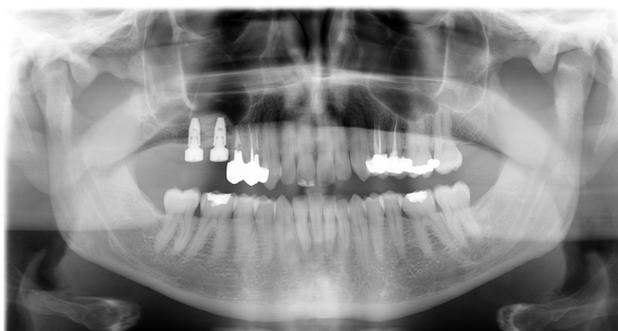


**Figure 39 :** (a) Coupes transversale, sagittale et frontale de CBCT centrées sur 17 avec planification implantaire. (b) Reconstitution panoramique après planification implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

**Objectif :** Pose de deux implants selon le projet prothétique en place de 16 et 17 en exploitant la greffe en 16 et la cloison de refend en 17.

**Gestion :**

Deux implants de 10mm avec un diamètre de 4,3 mm ont été posés avec des émergences et des axes conformes au projet prothétique, parallèles l'un à l'autre, avec un apex juxta-sinusien et dont la stabilité primaire satisfaisante (supérieure à 35 N/cm<sup>2</sup>) a permis la mise en place de la vis de cicatrisation et un seul temps chirurgical.

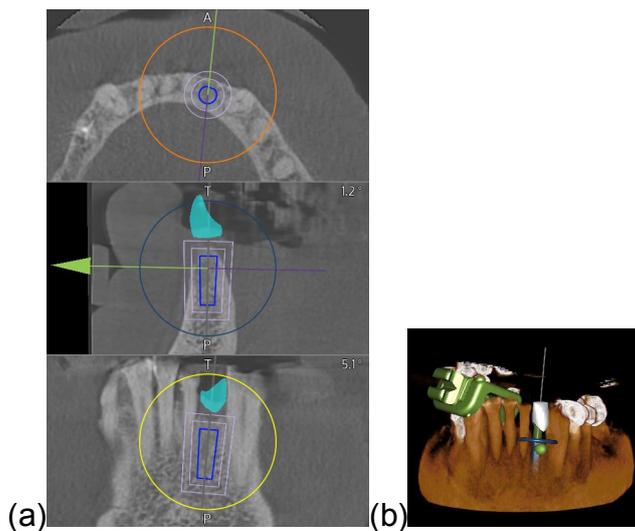


**Figure 40 :** Radiographie panoramique post-opératoire. (tirée de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

### Cas n°3

#### Contexte :

Le patient présente un édentement encastré antérieur mandibulaire avec absence de la 32. L'espace en coronaire et le couloir de pose sont étroits de par l'absence d'une incisive mandibulaire. Il n'y a pas de convergence radiculaire.



*Figure 41 :* (a) Coupes transversale, sagittale et frontale de CBCT centrées sur 32 avec planification implantaire. (b) Reconstitution virtuelle du projet prothétique associé à la planification implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

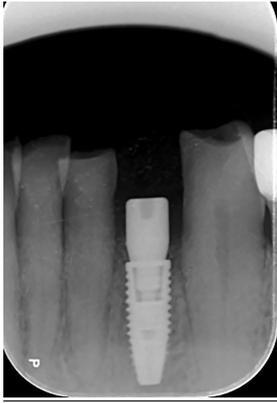
Objectif : Pose d'un implant dentaire conformément au projet prothétique dans le respect des distances de sécurité entre les différents éléments dentaires et implantaires.

#### Gestion :

Au vu de l'espace coronaire entre 31 et 33, l'utilisation d'un guide n'est pas envisageable, notamment full guide.

Un implant au diamètre de type « narrow » a été posé avec une émergence et un axe conforme au projet prothétique en technique Bone Level.

La stabilité primaire étant satisfaisante (supérieure à 35 N/cm<sup>2</sup>), la mise en place de la vis de cicatrisation autorise un seul temps chirurgical.

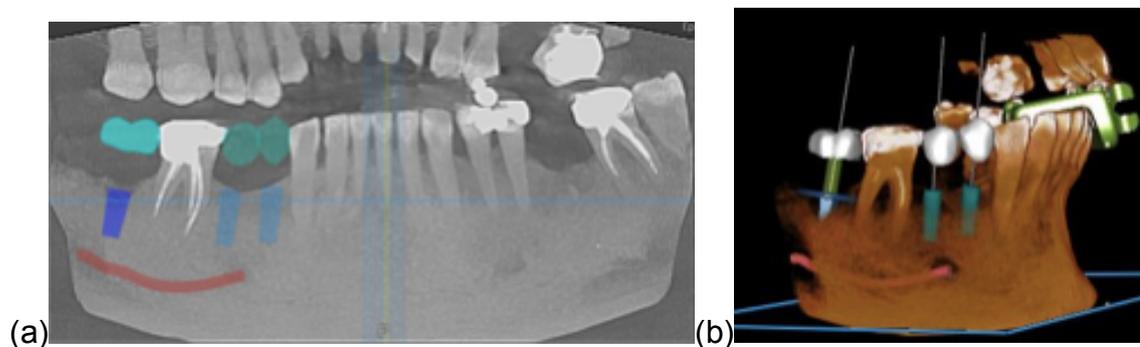


*Figure 42* : Radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire centrée sur 32. (tirée de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

### Cas n°4

#### Contexte :

Le patient présente plusieurs édentements. On relève l'absence des prémolaires mandibulaires droites 44 et 45 ainsi que l'absence de la deuxième molaire mandibulaire droite 47. La première molaire mandibulaire gauche 36 est également absente ainsi que la deuxième prémolaire maxillaire gauche 25. Le patient présente une ouverture buccale limitée.



*Figure 43* : (a) Reconstitution panoramique après planification implantaire pour le remplacement de 44, 45 et 47. (b) Reconstitution virtuelle du projet prothétique associé à la planification implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

Objectif : 1<sup>ère</sup> phase de traitement au niveau du secteur 4 avec la mise en place de 3 implants dentaires en place de 44, 45 et 47 selon le projet prothétique dans un contexte de limitation d'ouverture buccale et présence d'obstacles anatomiques à savoir le canal du nerf alvéolaire inférieur pour 47 et la présence de l'émergence du nerf alvéolaire inférieur entre 44 et 45.

#### Gestion :

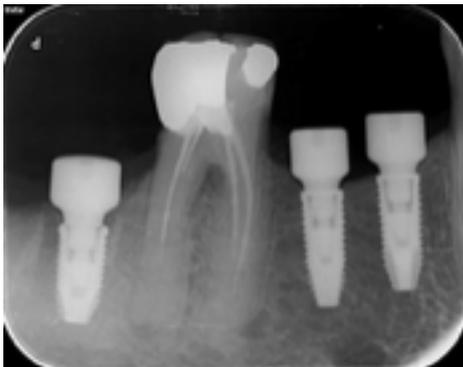
L'espace de 14mm entre la première molaire mandibulaire droite 46 et la canine mandibulaire droite 43 permet d'envisager une réhabilitation prothétique au moyen de deux implants dentaires.

La planification nous permet d'exploiter le volume osseux en avant et en arrière de l'émergence du nerf alvéolaire inférieur et de poser deux implants de 11,5mm et de diamètre de type « narrow » avec des émergences et des axes parallèles conformes au projet prothétique tout en respectant l'espace biologique.

Un implant de 10mm et de diamètre de type « regular » a été posé en place de 47.

La stabilité primaire de implants étant satisfaisantes, les vis de cicatrisation ont été mises en place.

Il est prévu d'extraire la 46 afin de réaliser un bridge implanto-porté de 44 à 47 mais celle-ci a été conservée pendant la phase d'ostéo-intégration pour conserver un calage postérieur à droite.

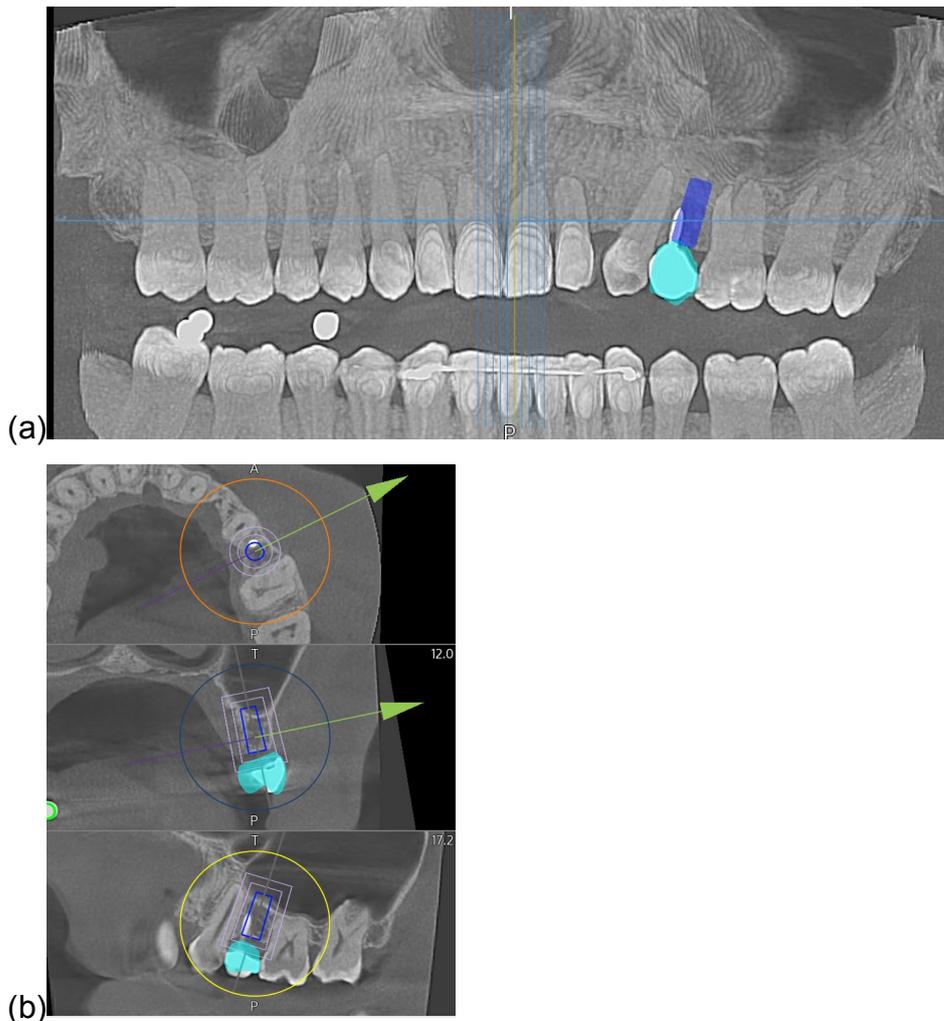


*Figure 44* : Radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire centrée sur le secteur 4. (tirée de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

### **Cas n°5 :**

#### **Contexte :**

Le patient présente un édentement encastré secteur 2 avec absence de la deuxième prémolaire maxillaire gauche 25. Le volume osseux est réduit en vestibulo-palatin et en hauteur. L'absence de la canine maxillaire gauche 23 a engendré une mésio-version de la première prémolaire maxillaire droite 24.



**Figure 45 :** (a) Reconstitution panoramique après planification implantaire pour le remplacement de 25. (b) Coupes transversale, sagittale et frontale de CBCT centrées sur 25 avec planification implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

**Objectif :** Pose d'un implant dans axe contraint selon le projet prothétique. L'axe de forage ici ne doit pas suivre les axes des couronnes dentaires.

**Gestion :**

Un implant dentaire de 10mm avec un diamètre de type « narrow » a été posé en place de 25 avec une émergence et un axe conformes au projet prothétique en vue d'une réhabilitation prothétique implanto-porté. L'apex est ancré dans le plancher sinusien.



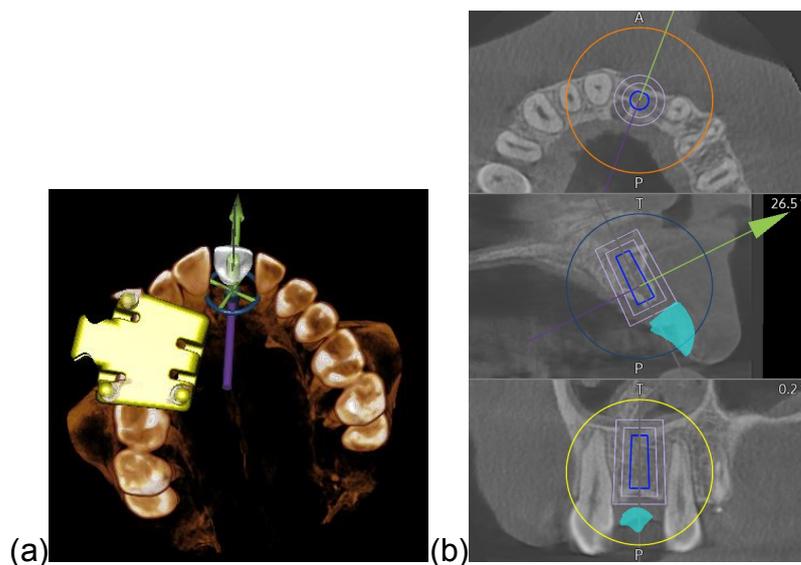
*Figure 46* : Radiographie rétro-alvéolaire post-opératoire centrée sur 25. (tirée de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

## Cas n°6

### Contexte :

Le patient présente un cas d'esthétique antérieur avec mise en charge immédiate.

Le patient présente un édentement encastré dans le secteur antérieur maxillaire avec absence de l'incisive centrale maxillaire gauche 21. On relève une fonte osseuse vestibulaire, une inclinaison du procès alvéolaire et la présence de l'orifice du canal naso-palatin et des fosses nasales en regard de l'édentement.



*Figure 47* : (a) Reconstitution virtuelle du projet prothétique associé à la planification implantaire. (b) Coupes 3D après planification implantaire pour le remplacement de 21. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

Objectif : Pose d'un implant dans un volume osseux réduit en secteur esthétique.

L'axe implantaire doit permettre une mise en esthétique immédiate au moyen d'une prothèse transvissée avec un éventuel rattrapage d'axe selon le système implantaire utilisé.

Gestion :

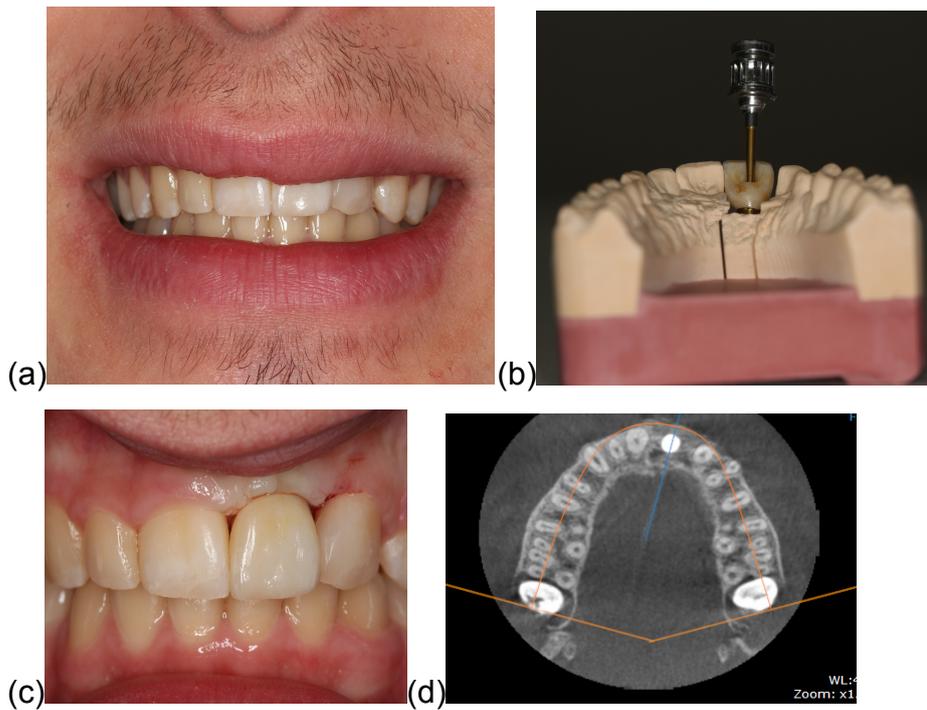
La mise en place d'un implant de 11,5m et de diamètre type « regular » dentaire a été réalisée en place de 21. L'axe et l'émergence implantaire sont conformes au projet prothétique. La stabilité primaire est satisfaisante (>35 N) et permet la mise en esthétique immédiate.

A l'aide du concept d'homothétie (entre 11 et 21), une prothèse provisoire a été réalisée en laboratoire en utilisant une Tibase provisoire solidarisée à une couronne provisoire et avec un profil concave atraumatique.

En peropératoire, la prothèse provisoire a été visée et ajustée afin d'être en infraclusie.

L'axe prothétique, proche de l'axe implantaire, dispense d'utiliser un système de rattrapage d'axe ici.

A noter que pour une esthétique réussie, il était nécessaire de mettre en place l'implant selon un axe identique à la planification.



**Figure 48 :** (a) Photographie exobuccale de face, post-opératoire. (b) Photographie du modèle maxillaire en plâtre avec la couronne réalisée pour la mise en esthétique immédiate. (c) Photographie intrabuccale post-opératoire centrée sur les incisives maxillaires. (d) Coupe transversale de CBCT post-opératoire centrée sur l'arcade maxillaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

### **Cas n°7**

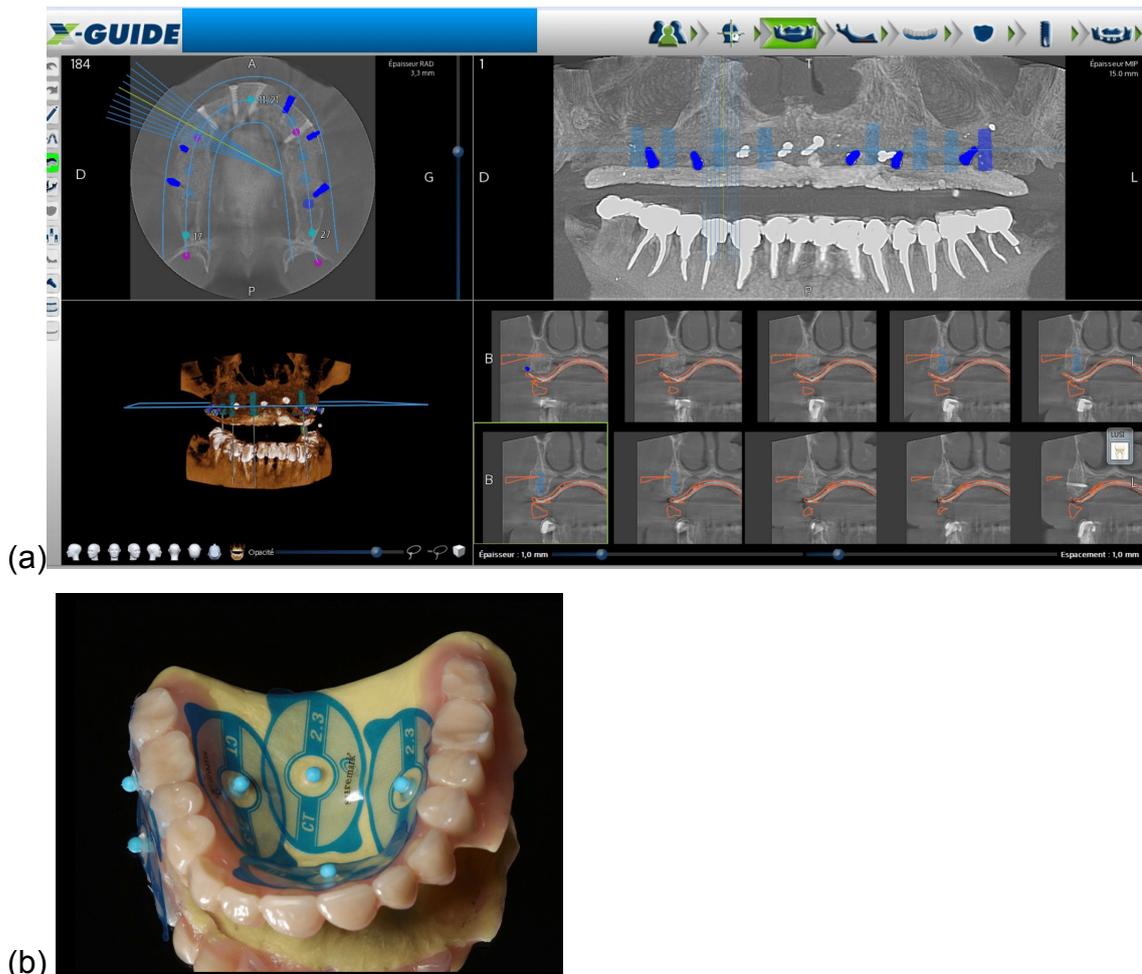
#### **édenté total maxillaire :**

**Contexte :**

Le patient présente un édentement total maxillaire. Il a bénéficié d'une greffe d'apposition osseuse au niveau du prémaxillaire. La hauteur sous sinusienne est limitée et on note la présence de 4 vis de synthèse.

Le projet prothétique est la mise en place d'une prothèse fixe au maxillaire.

On observe un bandeau de gencive kératinisée favorable.



**Figure 49 :** (a) Cliché de l'interface X-Guide comprenant une reconstitution panoramique et des coupes, transversales et frontales, après planification. (b) Photographie de la prothèse maxillaire réalisée en vue de la mise en charge immédiate, ici complété au niveau de la voûte palatine par du silicone afin de supporter les repères radiographiques (patches bleus) nécessaires au matching du fichier DICOM avec le fichier STL. (tirés de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

**Objectif :**

Mise en place de 8 implants dentaires au maxillaire dans des positions stratégiques : en fonction du volume osseux disponible et d'une répartition sur l'ensemble de l'arcade, en présence de matériel d'ostéosynthèse, conformément au projet prothétique en vue d'une mise en charge immédiate.

**Gestion :**

En technique "Flapless", 8 implants de 10mm sont positionnés parallèlement et avec une émergence et un axe conforme à la planification. Ils ont été mis en place en position de 17, 16, 14, 12, 23, 25, 26, 27, sous anesthésie locale.

L'implant en 27 a nécessité un ancrage plus apical afin d'obtenir une stabilité primaire suffisante. Il n'a pas bénéficié d'une conjonction avec les autres implants dans le cadre de la mise en charge du bridge provisoire maxillaire et une vis de cicatrisation a été posée sur cet implant.

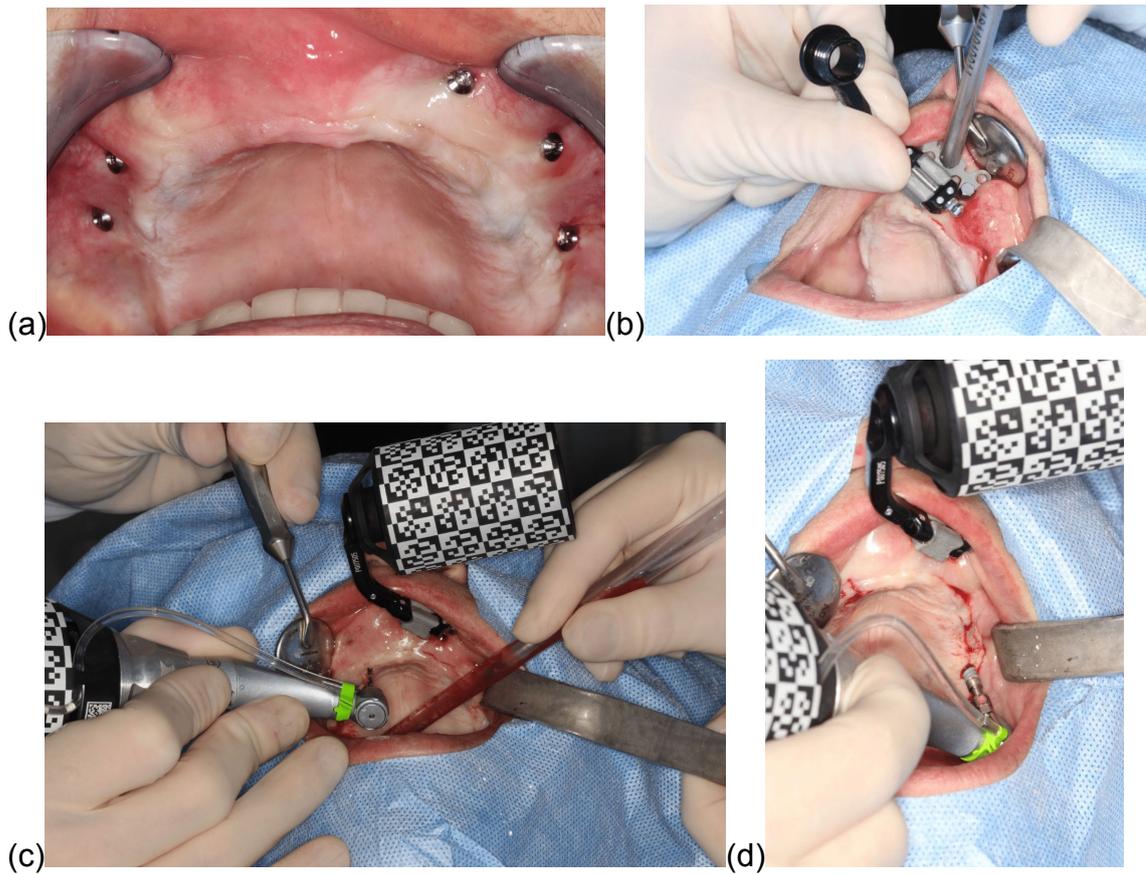
Sur les 7 autres implants, dont la stabilité primaire était satisfaisante, ont été mis en place des piliers coniques ainsi que la réhabilitation provisoire transvissée sur Tibase avec conjonction résine et sans renfort.

Ces 7 implants ont été positionnés avec une plateforme implantaire relativement à la même hauteur ce qui facilite la mise en charge immédiate par un engagement prothétique uniforme (tous les piliers coniques intermédiaires sont de même longueur).

Enfin, la navigation dynamique a permis d'éviter un conflit entre implant et matériel d'ostéosynthèse.

L'épaisseur de gencive kératinisée a autorisé une gestion sans lambeau pour une meilleure cicatrisation et une meilleure esthétique. Il n'y avait pas de nécessité d'enlever les vis de synthèse qui ne présentaient aucun conflit avec le forage et les implants.

La greffe au prémaxillaire a permis la mise en place des implants sur cette zone afin d'éviter une longueur de pontique trop importante et permet d'améliorer les rapports intermaxillaires en posant les implants dans le couloir prothétique.



**Figure 50:** (a) Photographie intra-buccale de l'arcade maxillaire avec 5 minivis. (b) Photographie extra-buccale de la mise en place du E-Clip. (c) Photographie per-opératoire au cours du forage. (d) Photographie extra-buccale au cours de la pose implantaire. (tirées de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)



**Figure 51:** Radiographie panoramique post-opératoire après mise en charge immédiate. (tirée de la collection personnelle du Dr B.ABADIE)

## **3.2. Définition des cas complexes**

La complexité d'un cas est un paramètre non mesurable de manière formelle mais on peut citer un nombre de situations ou difficultés qui rendent un cas plus complexe à traiter. Celles-ci peuvent par ailleurs s'additionner.

Cette difficulté peut être chirurgicale mais également prothétique.

Voici une liste non exhaustive des difficultés primaires rencontrées dans la pratique implantaire.

### **3.2.1. Difficultés chirurgicales**

#### **3.2.1.1. Hauteur osseuse**

Au maxillaire, la présence d'avant en arrière, des fosses nasales et des sinus maxillaires peuvent poser une difficulté dans le sens vertical principalement.

A la mandibule, le nerf alvéolaire inférieur et son émergence posent également une difficulté dans la dimension verticale principalement aussi.

#### **3.2.1.2. Position**

Dans le sens vestibulo-palatin ou vestibulo-lingual, le volume osseux conditionne la position de l'implant. Tout déficit osseux représente une difficulté plus ou moins surmontable en angulant l'implant comme en présence d'un volume osseux en forme de "goutte d'eau" dans le secteur antérieur maxillaire.

L'orifice naso-palatin constitue dans certains cas un obstacle anatomique dans le positionnement incisif maxillaire.

#### **3.2.1.3. Convergence radiculaire**

La convergence radiculaire de dents bordant l'édentement à implanter réduit le volume osseux disponible à la pose implantaire bien qu'en vue clinique, les couronnes offrent un espace satisfaisant.

Il peut être nécessaire de déporter la pose implantaire en vestibulaire ou en buccal, ou d'anguler l'implant pour trouver un couloir favorable.

#### **3.2.1.4. Procidence sinusienne**

Comme dans le cas des convergences radiculaires, il peut être difficile d'envisager une pose implantaire face à un sinus procident. La possibilité d'incliner d'un certain angle le forage et l'implant pour chercher l'avant du sinus en mésial ou la tubérosité en distal en exploitant le volume existant.

Les cloisons de refend sont aussi intéressantes dans ce cas.

#### **3.2.1.5. Matériel chirurgical**

La présence de vis ou de plaque posées lors de greffes osseuses, de chirurgie orthognathique ou de réduction de fractures peut interférer avec la zone de pose implantaire idéale.

Il est donc intéressant de pouvoir réaliser des poses intercalaires sans devoir déposer le matériel chirurgical notamment sous anesthésie locale en cabinet où ce n'est pas aisé. Cela présente également un intérêt si le patient est atteint d'une pathologie (exemples : haut risque hémorragique, diabète), afin de réaliser un geste moins invasif.

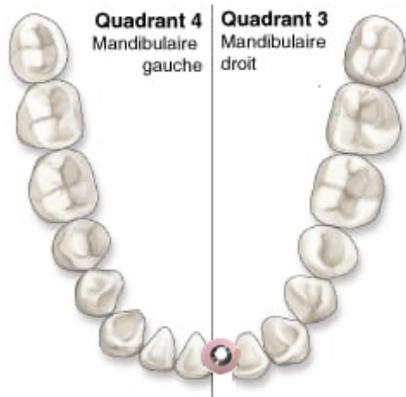
### **3.2.2. Limites prothétiques**

#### **3.2.2.1. Versions dentaires ou espace réduit**

Dans des cas de versions dentaires, il est parfois nécessaire de dissocier l'axe de forage de l'axe coronaire pour ne pas commettre d'erreur de positionnement.

Dans des espaces très réduits, l'utilisation de guides peut poser un problème en termes d'encombrement de par l'épaisseur de la douille et la résine.

Dans ce cas de figure, l'utilisation d'un guide chirurgical est impossible car l'espace mésio-distal ne peut pas contenir les gaines ainsi que la résine qui les supporte.



*Figure 52* : Schéma personnel illustrant l'impossibilité d'utiliser un guide chirurgical en cas d'espace coronaire réduit.

### **3.2.2.2. Implants multiples**

Lors de la pose de plusieurs implants en un seul temps chirurgical, la difficulté est de transférer la position des émergences implantaire définie dans la planification chez un patient qui présente peu de repères dentaires ou anatomiques, en cas de réhabilitation totale avec 6 ou 8 implants maxillaires par exemple.

### **3.2.2.3. Position du col implantaire**

Le positionnement du col implantaire peut présenter une difficulté en secteur esthétique mais également en cas d'espace prothétique réduit.

En secteur esthétique, il est de règle d'enfouir le col implantaire de 3mm.

En postérieur, on peut avoir à enfouir l'implant de quelques dixièmes de millimètre avec précision tout en contrôlant la profondeur et la proximité d'éléments anatomiques ce qui est compliqué avec un guide à cause de son utilisation en butée.

### **3.2.3. Difficulté prothétique et chirurgicale**

À l'aide de la simulation des objectifs thérapeutiques et de la planification, une prothèse provisoire peut être préparée pour être fidèle à la réalité clinique post opératoire. Le jour de l'intervention, le praticien ajuste cette prothèse sur les piliers provisoires.

### **3.2.3.1. Édentement antérieur avec importante composante esthétique**

L'axe implantaire ainsi que le col et l'émergence, positionnés fidèlement à la planification, permet une esthétique optimisée lors de la mise en esthétique immédiate d'un édentement antérieur.

Il est nécessaire de prendre en compte la composante prothétique liée au système implantaire pour un éventuel rattrapage d'axe en prothèse transvissée.

### **3.2.3.2. Réhabilitation prothétique totale avec mise en charge immédiate**

Le matching de la prothèse avec le volume osseux doit permettre un positionnement stratégique des implants en vue d'une mise en charge immédiate. La répartition des implants ainsi que des zones d'émergence peut nécessiter une angulation implantaire par exemple dans le cas d'un All on 4 mandibulaire : émergence implantaire la plus distale possible en évitant le nerf alvéolaire inférieur et réduction du porte-à-faux du cantilever.

La planification implantaire tient compte des corrections prothétiques des piliers intermédiaires offertes par le système implantaire.

La navigation dynamique permet le contrôle en temps réel du positionnement du forêt par rapport aux éléments anatomiques ou aux implants dentaires déjà posés, à la différence du guide physique et permet de réaliser une régularisation osseuse de crête sans avoir à modifier la planification.

La navigation dynamique permet également de repositionner un implant en cas de problématique per-opératoire (curetage ou rupture de la corticale vestibulaire) ou d'un manque de stabilité qui nécessite d'enfouir plus que prévu l'implant voire de changer de site implantaire pour obtenir un ancrage plus important.

### **3.2.4. Indications**

La navigation dynamique est donc un outil nouveau indiqué dans de nombreux cas "complexes".

On peut dresser une liste non exhaustive de ces indications:

- Extraction implantation immédiate
- chirurgie minimalement invasive
- patient à l'état général dégradé
- limitation d'ouverture buccale
- Pose implantaire simple
- mise en charge immédiate ou mise en esthétique immédiate
- implantation sur arcade complète (All on 4 ou All on 6)
- pose implantaire complexe associée ou non à un autre acte

### 3.3. Parcours patient

Le X-Guide permet d'envisager le traitement implantaire et prothétique du début à la fin.

En optimisant les rendez-vous, le parcours du patient est simplifié.



*Figure 53* : Processus de prise en charge du patient avec X-Guide.

1<sup>er</sup> « temps patient » :

La première consultation constitue un maillon important de la chaîne de soin.

Durant cette consultation, plusieurs points sont à aborder pour inclure le patient dans le parcours de soins personnalisé.

Le praticien explique l'intérêt du traitement implantaire, ses risques et ses bénéfices, l'indication relative au cas et répond aux éventuelles interrogations du patient.

Les explications et la compréhension de la situation par le patient vont lui permettre d'adhérer au projet de soin en créant un climat de confiance.

Un examen clinique ainsi qu'une acquisition radiographique tridimensionnelle, des photographies et des empreintes sont réalisés ce jour.

1<sup>er</sup> « temps praticien » :

Le praticien utilise toutes les informations recueillies lors de la première consultation pour simuler les objectifs thérapeutiques.

La matching des fichiers DICOM et STL avec le projet prothétique lui permet de réaliser la planification implantaire.

2<sup>ème</sup> « temps patient » :

Lors de ce rendez-vous, le praticien s'appuie sur la planification et la simulation des objectifs thérapeutiques pour corroborer ses premières explications.

Le patient peut visualiser le résultat escompté.

Le praticien soumet le devis au patient et obtient son consentement éclairé.

Temps laboratoire :

La prothèse peut éventuellement être réalisée pour une mise en charge ou une mise en esthétique immédiate.

2<sup>ème</sup> « temps praticien » :

La commande de l'accastillage et de l'ancillaire implantaire peut être réalisée.

Le X-Guide dispense de la réalisation d'un guide. Cela permet un gain de temps puisqu'il n'est pas nécessaire d'essayer le guide. De plus, lorsque le guide n'est pas adapté il faut en reconfecionner un autre puis l'essayer à nouveau.

Le X-Guide permet un gain de temps voire l'économie d'un ou plusieurs rendez-vous.

## Temps chirurgical :

La majeure partie du travail a été réalisée en amont.

La préparation de la salle est réalisée par les assistantes lorsque le praticien accueille le patient.

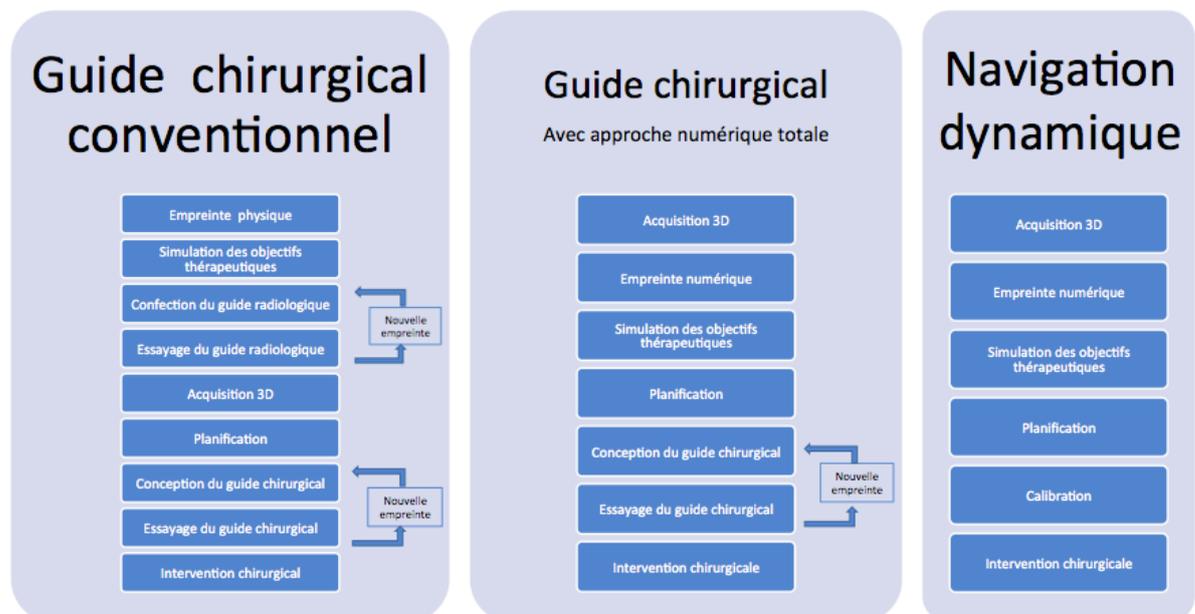
L'acte chirurgical est réalisé en suivant la planification réalisée.

Le parcours patient à l'aide du X-Guide repose sur trois piliers.

Premièrement le parcours est assuré, le protocole et la chronologie sont clairement définis et le gain en précision, en sécurité et en confort du système consolident l'assurance d'une prise en charge efficace.

Deuxièmement, le parcours patient est écourté et optimisé. Le nombre d'étapes et donc de rendez-vous est diminué tout en conservant la précision et la sécurité que le système offre.

Enfin, le parcours patient est en sens unique et n'est source d'aucun retour en arrière.



**Figure 54 :** Schéma récapitulatif du flux de travail lors de l'utilisation d'un guide chirurgical ou de la navigation dynamique

### **3.4. Conclusion**

Pour un praticien expérimenté en implantologie, intégrer l'utilisation de la navigation dynamique constitue souvent une transition abrupte.

La pose de l'implant en vision indirecte et le rapport aux écrans ou aux nouvelles technologies est parfois difficile à appréhender. Un apprentissage est nécessaire mais il apparaît que la courbe d'apprentissage est rapide dans la plupart des cas.

Néanmoins ce système confère une précision indiscutable notamment grâce au codage évolué des trackeurs.

La sécurité et le confort lors de la pose implantaire sont aussi améliorés par rapport aux anciens systèmes de navigation dynamique en implantologie.

### **3.5. Axes d'amélioration**

Depuis peu, l'utilisation de la réalité virtuelle suscite un intérêt grandissant de la part de la communauté scientifique.

Microsoft a développé HoloLens, des lunettes de réalité virtuelle utilisables dans le domaine médical.

Couplées avec des logiciels médicaux de navigation, elles servent de système de navigation dynamique. Cette technologie vise à obtenir une vision plus large et simplifiée du champ chirurgical pendant l'opération.

Google a développé de son côté les Google Glass qui ont notamment été utilisées en chirurgie plastique.(43)

Toutes les informations sont visibles dans les lunettes en vision périphérique ou superposition : planification et projet prothétique virtuel, ou au travers pour ce qui est du réel en vision centrale.(44)

L'idée d'une représentation « holographique » en trois dimensions est aussi à l'étude et permettrait de visualiser des zones non visibles en vision directe afin d'instrumenter ces zones difficiles d'accès ou à risque.

Cette technologie permettrait de juguler un des freins de la navigation qui est de garder une vision de son champ opératoire et d'un écran avec une cible.

L'utilisation de la robotique active peut aussi être envisagée avec comme intérêt la gestion des différences de densité osseuse.

En effet, une des limites de la navigation étant la préparation osseuse à main levée sans pilotage au moyen d'un guide physique ; une différence de densité osseuse peut induire une déviation de l'axe de forage ou de profondeur.

Le robot permet le forage dans un axe et à une profondeur établie sans dévier malgré les différences de densité osseuse et plus globalement d'améliorer la précision de forage et de pose.

On peut imaginer à l'avenir une addition de ces différentes technologies comprenant la réalité virtuelle augmentée, une navigation dynamique et une composante robotisée afin d'envisager une pose implantaire avec un résultat sans précédent.

1. Taylor RH. Medical Robotics and Computer-Integrated Surgery. In: 2008 32nd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference. 2008. p. 1-1.
2. Bermes-Klaine R. DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE. 2013;131.
3. Taylor RH, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery. *IEEE Trans Robot Autom.* oct 2003;19(5):765-781.
4. La navigation en chirurgie orthognathique. Application à l'ostéotomie de Le Fort I- ClinicalKey [Internet]. 2020 [cité 8 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.clinicalkey.fr/#!/content/playContent/1-s2.0-S2213653313001845?scrollTo=%23refInSitubib0005>
5. Mora MA, Chenin DL, Arce RM. Software Tools and Surgical Guides in Dental-Implant-Guided Surgery. *Dent Clin North Am.* juill 2014;58(3):597-626.
6. Davarpanah K, Demurashvili G, Daas M, Rajzbaum P, Capelle-Ouadah N, Szmukler-Moncler S, et al. Implantologie assistée par ordinateur. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* 1 sept 2012;113(4):259-75.
7. Yang G-Z, Cambias J, Cleary K, Daimler E, Drake J, Dupont PE, et al. Medical robotics—Regulatory, ethical, and legal considerations for increasing levels of autonomy. *Sci Robot.* 15 mars 2017;2(4):eaam8638.
8. Bergeles C, Guang-Zhong Yang. From Passive Tool Holders to Microsurgeons: Safer, Smaller, Smarter Surgical Robots. *IEEE Trans Biomed Eng.* mai 2014;61(5):1565-76.
9. Marino MV, Shabat G, Gulotta G, Komorowski AL. From Illusion to Reality: A Brief History of Robotic Surgery. *Surg Innov.* 1 juin 2018;25(3):291-6.
10. Robot. In: Wikipédia [Internet]. 2020 [cité 10 juin 2020]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Robot&oldid=171639115>
11. Lang JE, Mannava S, Floyd AJ, Goddard MS, Smith BP, Mofidi A, et al. Robotic systems in orthopaedic surgery. *J Bone Joint Surg Br.* 1 oct 2011;93-B(10):1296-9.
12. Arthobot article [Internet]. [cité 10 juin 2020]. Disponible sur: [https://www.brianday.ca/imagez/1051\\_28738.pdf](https://www.brianday.ca/imagez/1051_28738.pdf)
13. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* févr 1988;35(2):153-60.
14. Lane T. A short history of robotic surgery. :3.
15. Chirurgie assistée par ordinateur (CAO) [Internet]. Inserm - La science pour la santé. 2020 [cité 8 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/chirurgie-assistee-par-ordinateur-cao>
16. Devito DP, Kaplan L, Dietl R, Pfeiffer M, Horne D, Silberstein B, et al. Clinical Acceptance and Accuracy Assessment of Spinal Implants Guided With SpineAssist Surgical Robot: Retrospective Study. *Spine.* nov 2010;35(24):2109-15.
17. Les différents types de guides chirurgicaux - Article 3Dcelo [Internet]. 2018 [cité 13 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.3dcelo.com/les-differents-types-de-guides-chirurgicaux/>
18. Vercruyssen M, Fortin T, Widmann G, Jacobs R, Quirynen M. Different techniques of static/dynamic guided implant surgery: modalities and indications. *Periodontol 2000.* 2014;66(1):214-27.
19. Mediavilla Guzmán A, Riad Deglow E, Zubizarreta-Macho Á, Agustín-Panadero R, Hernández Montero S. Accuracy of Computer-Aided Dynamic Navigation Compared to Computer-Aided Static Navigation for Dental Implant Placement: An In Vitro Study. *J Clin Med.* déc 2019;8(12):2123.

20. Saeidi H, Opfermann JD, Kam M, Raghunathan S, Leonard S, Krieger A. A Confidence-Based Shared Control Strategy for the Smart Tissue Autonomous Robot (STAR). In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2018. p. 1268-75.
21. Smart Tissue Autonomous Robot Raises the Bar on Surgery Precision [Internet]. [cité 17 juin 2020]. Disponible sur: <https://bioe.umd.edu/news/story/smart-tissue-autonomous-robot-raises-the-bar-on-surgery-precision>
22. Opfermann JD, Leonard S, Decker RS, Uebele NA, Bayne CE, Joshi AS, et al. Semi-autonomous electrosurgery for tumor resection using a multi-degree of freedom electrosurgical tool and visual servoing. In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) [Internet]. Vancouver, BC: IEEE; 2017 [cité 21 nov 2020]. p. 3653-60. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8206210/>
23. Boesecke R, Brief J, Raczkowski J, Schorr O, Daueber S, Krempien R, et al. Robot Assistant for Dental Implantology. In: Niessen WJ, Viergever MA, éditeurs. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2001 [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001 [cité 12 juin 2020]. p. 1302-3. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/3-540-45468-3\\_204](http://link.springer.com/10.1007/3-540-45468-3_204)
24. Robot dentist in China is first to fit implants in patient without any human involvement [Internet]. Dentistry.co.uk. 2019 [cité 25 mai 2021]. Disponible sur: <https://dentistry.co.uk/2019/04/26/robot-dentist-china-first-fit-implants-patient-without-human-involvement/>
25. Robot dentist is first to fit implants without a human touch [Internet]. South China Morning Post. 2017 [cité 13 juin 2020]. Disponible sur: <https://www.scmp.com/news/china/article/2112197/chinese-robot-dentist-first-fit-implants-patients-mouth-without-any-human>
26. Hernandez D, Garimella R, Eltorai AEM, Daniels AH. Computer-assisted Orthopaedic Surgery. *Orthop Surg.* 2017;9(2):152-8.
27. Navigation Devices [Internet]. [cité 13 nov 2021]. Disponible sur: <http://www.robodent.de/page61/page65/page65.html>
28. Educational Setup [Internet]. [cité 13 nov 2021]. Disponible sur: <http://www.robodent.de/page61/page67/page67.html>
29. Implantologie dentaire assistée par ordinateur : intérêts de la navigation du système Robodent® - ClinicalKey [Internet]. [cité 16 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.clinicalkey.fr/#!/content/playContent/1-s2.0-S2213653313001870?returnurl=https%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2213653313001870%3Fshowall%3Dtrue&referrer=>
30. Somogyi-Ganss E. Evaluation of the Accuracy of NaviDent, a Novel Dynamic Computer-Guided Navigation System for Placing Dental Implants. :105.
31. Navident-case-study-Ghent-University-Jan.pdf [Internet]. [cité 10 déc 2020]. Disponible sur: <https://www.claronav.com/wp-content/uploads/2017/04/Navident-case-study-Ghent-University-Jan.pdf>
32. Miller DM. "Trace and Place is a real tipping point for dynamic navigation guidance. It has streamlined and simplified the workflow in both the diagnostic and surgical phases to allow state of the art technology to be an everyday component of my surgical implant practice. I can't imagine going back!" Dr. George Mandelaris, Periodontist. :12.
33. Uysal DH. Dynamic navigation in fully edentulous maxilla. 2017;4.
34. Block MS, Emery RW, Lank K, Ryan J. Implant Placement Accuracy Using Dynamic Navigation. *Int J Oral Maxillofac Implants.* févr 2017;32(1):92-9.

35. Block MS, Emery RW, Cullum DR, Sheikh A. Implant Placement Is More Accurate Using Dynamic Navigation. *J Oral Maxillofac Surg.* juill 2017;75(7):1377-86.
36. Chirurgie assistée par ordinateur la navigation dynamique système x-guide [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2018 [cité 16 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/chirurgie-assistee-par-ordinateur-la-navigation-dynamique-systeme-x-guide/x-guide\\_workflow-1.pdf](https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/chirurgie-assistee-par-ordinateur-la-navigation-dynamique-systeme-x-guide/x-guide_workflow-1.pdf) [Internet]. [cité 14 nov 2021]. Disponible sur: [https://x-navtech.com/wp-content/uploads/2019/10/x-guide\\_workflow-1.pdf](https://x-navtech.com/wp-content/uploads/2019/10/x-guide_workflow-1.pdf)
37. X-Nav Technologies. What is X-Mark [Internet]. 2020 [cité 7 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=Gp6qARMX6DQ&feature=youtu.be>
38. X-Nav Technologies. X-Mark Calibration for Handpiece and Probe Tool [Internet]. 2020 [cité 7 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=lwdQyh64IrA&feature=youtu.be>
39. X-Nav Technologies. Understanding System Check & Proper System Check [Internet]. 2020 [cité 7 févr 2021]. Disponible sur: [https://www.youtube.com/watch?v=AT3NEMG\\_FvE&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=AT3NEMG_FvE&feature=youtu.be)
40. X-Nav Technologies. X-Mark for Edentulous cases, Registration & Refinement [Internet]. 2020 [cité 15 nov 2021]. Disponible sur: [https://www.youtube.com/watch?v=3\\_NcTEovH7M](https://www.youtube.com/watch?v=3_NcTEovH7M)
41. About X-Guide [Internet]. X-Nav Technologies. [cité 15 nov 2021]. Disponible sur: <https://x-navtech.com/about-x-guide/>
42. Davis CR, Rosenfield LK. Looking at Plastic Surgery through Google Glass: Part 1. Systematic Review of Google Glass Evidence and the First Plastic Surgical Procedures. *Plast Reconstr Surg.* mars 2015;135(3):918-28.
43. Pellegrino G, Mangano C, Mangano R, Ferri A, Taraschi V, Marchetti C. Augmented reality for dental implantology: a pilot clinical report of two cases. *BMC Oral Health.* 19 juill 2019;19(1):158.

**Domaines** : Implantologie, Chirurgie buccale, Prothèse implantaire

**Mots clés Rameau**: Implant dentaire ; Chirurgie implantaire ; Navigation chirurgicale

**Mots clés FMeSH**: Implant dentaire ; Chirurgie implantaire, Navigation chirurgicale

Résumé de la thèse :

L'implantologie dentaire est une discipline de l'art dentaire qui a pour finalité la mise en place d'une prothèse implanto-portée, unitaire ou plurale, ou la stabilisation d'une prothèse amovible, au moyen d'une ou plusieurs racines artificielles, dans l'os maxillaire ou la mandibule.

La navigation dynamique, outil d'aide à la pose implantaire, permet de gérer certaines situations complexes avec sécurité et précision.

Après avoir présenté la robotique et la navigation chirurgicale et implantaire, ce travail a pour objectif d'expliquer le fonctionnement de la navigation dynamique en implantologie dentaire et son intérêt dans les cas complexes, à travers le système X-Guide. L'utilisation de la navigation dynamique sécurise la pose implantaire et améliore la prise en charge du patient.

A l'avenir, une addition des techniques de réalité virtuelle augmentée, de navigation dynamique et d'une composante robotisée est envisageable, avec pour but d'accroître encore le succès thérapeutique et l'optimisation du parcours de soins.

**JURY :**

**Président : M. le Professeur T. COLARD**

**Asseseurs : M. le Docteur L.NAWROCKI**

**M. le Docteur K.AGOSSA**

**M. le Docteur L.LAUWERS**

**Membre invité : M le Professeur G.RAOUL**