

UNIVERSITE DE NANTES  
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

Année 2019

N° 3532

**Évaluation *ex vivo* d'un guide chirurgical imprimé  
tridimensionnellement pour la chirurgie endodontique**

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

*Présentée et soutenue publiquement par*

**Loïc BUFFARD**

Né le 14/08/1993

Le 12/03/2019 devant le jury ci-dessous :

Président : Mme le Professeur Fabienne PEREZ

Assesseur : M le Docteur François BODIC

Assesseur : M le Docteur Zahi BADRAN

Invité : M. le Docteur Édouard LANOISELEE

Directeur de thèse : M. le Docteur Alexis GAUDIN

<b>UNIVERSITÉ DE NANTES</b>	
<b>Président</b>	Pr LABOUX Olivier
<b>FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE</b>	
<b>Doyen</b>	Pr GIUMELLI Bernard
<b>Assesseurs</b>	Dr RENAUDIN Stéphane Pr SOUEIDAN Assem Pr WEISS Pierre
<b>Professeurs des Universités Praticiens hospitaliers des C.S.E.R.D.</b>	
Monsieur AMOURIQ Yves Monsieur GIUMELLI Bernard Monsieur LE GUEHENNEC Laurent Monsieur LESCLOUS Philippe Monsieur BADRAN Zahi	Madame ALLIOT-LICHT Brigitte Madame PEREZ Fabienne Monsieur SOUEIDAN Assem Monsieur WEISS Pierre
<b>Professeurs des Universités</b>	
Monsieur BOULER Jean-Michel	
<b>Professeurs Emérites</b>	
Monsieur BOHNE Wolf	Monsieur JEAN Alain
<b>Praticiens Hospitaliers</b>	
Madame DUPAS Cécile (Praticien Hospitalier) Madame LEROUXEL Emmanuelle (Praticien Hospitalier)	Madame HYON Isabelle (Praticien Hospitalier Contractuel) Madame RICHARD Catherine (Praticien Attaché)
<b>Maîtres de Conférences des Universités Praticiens hospitaliers des C.S.E.R.D.</b>	<b>Assistants Hospitaliers Universitaires des C.S.E.R.D.</b>
Monsieur AMADOR DEL VALLE Gilles Madame ARMENGOL Valérie Madame BLERY Pauline Monsieur BODIC François Madame CLOITRE Alexandra Madame DAJEAN-TRUTAUD Sylvie Madame ENKEL Bénédicte Monsieur GAUDIN Alexis Monsieur HOORNAERT Alain Madame HOUCHMAND-CUNY Madline Madame JORDANA Fabienne Monsieur KIMAKHE Saïd Monsieur LE BARS Pierre Madame LOPEZ-CAZAUX Serena Monsieur NIVET Marc-Henri Madame RENARD Emmanuelle Monsieur RENAUDIN Stéphane Madame ROY Elisabeth Monsieur STRUILLLOU Xavier Monsieur VERNER Christian	Monsieur ALLIOT Charles Monsieur AUBEUX Davy Madame BARON Charlotte Madame BEAURAIN-ASQUIER Mathilde Madame BERNARD Cécile Monsieur BOUCHET Xavier Madame BRAY Estelle Monsieur HUGUET Grégoire Monsieur KERIBIN Pierre Madame LE LAUSQUE Julie Madame LEMOINE Sarah Monsieur NEMIROVSKY Hervé Monsieur OUVRARD Pierre Monsieur RÉTHORÉ Gildas Monsieur SARKISSIAN Louis-Emmanuel Madame WOJTIUK Fabienne
<b>Maître de Conférences</b>	
Madame VINATIER Claire	
<b>Enseignants Associés</b>	
Madame LOLAH Aoula (Assistant Associé)	Madame MERAMETDJIAN Laure (MC Associé) Monsieur GUIHARD Pierre (Professeur Associé)

**Par délibération, en date du 6 décembre 1972, le conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propre à leurs auteurs et qu'il n'entend leur donner aucune approbation, ni importance.**

## **REMERCIEMENTS :**

**A Madame le Professeur Fabienne PEREZ**

Professeur des Universités

Praticien Hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Toulouse 3

Habilitée à Diriger des Recherches

Chef du département d'Odontologie Conservatrice – Endodontie

Chef du service d'Odontologie Conservatrice et Pédiatrique

**-NANTES-**

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, veuillez recevoir le témoignage de mon plus profond respect.*

*Pour vos enseignements théoriques et pratiques tout au long de mes études et des vacations cliniques.*

*Veillez trouver ici l'expression de ma plus profonde gratitude.*

## **A Monsieur le Docteur Alexis GAUDIN**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de Conférences des Universités

Praticien Hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Nantes

Ancien Interne des Hôpitaux de Toulouse

Département d'Odontologie Conservatrice – Endodontique

**-NANTES-**

*Pour m'avoir fait l'honneur de diriger cette thèse.*

*Merci de votre disponibilité et de l'aide que vous m'avez apportée dans l'élaboration de cette étude.*

*Merci des conseils que vous m'avez apportés tout au long de mes vacances cliniques.*

*Veillez trouver ci joint l'expression de ma plus grande considération.*

## **A Monsieur le Docteur François BODIC**

Maître de Conférence des Universités

Praticien Hospitalier des Centres de Soins d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Nantes

Département de prothèse

**-NANTES-**

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury de thèse.*

*Pour vos enseignements pratiques et théoriques lors de mon cursus.*

*Veillez trouver ici le témoignage de mon profond respect.*

## **A Monsieur le Docteur Zahi BADRAN**

Professeur des Universités

Praticien hospitalier des centres de soins d'enseignement et de recherche dentaires

Docteur de l'Université de Nantes

Habilité à diriger des recherches

Département de Parodontologie

**-NANTES-**

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury de thèse.*

*Pour vos enseignements pratiques et théoriques tout au long de mes études.*

*Pour m'avoir initié à l'implantologie orale.*

*Veillez trouver ici le témoignage de ma plus profonde considération.*

**A Monsieur le Docteur Édouard LANOISELEE**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Praticien libéral

**-NANTES-**

*Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de ce jury de thèse.*

*Pour vos conseils, vos idées et votre disponibilité tout au long de ce projet.*

*Pour vos enseignements pratiques et théoriques lors de mes premières vacances cliniques.*

*Veillez trouver ici l'assurance de mes sentiments respectueux et de ma sincère considération.*

## Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Microchirurgie endodontique .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1. Définition .....</b>	<b>14</b>
1.1.1. Étapes de la microchirurgie endodontique .....	14
<b>1.2. Indications et contre-indications.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3. Taux de succès de l'endodontie chirurgicale .....</b>	<b>18</b>
<b>2. Flux numérique et endodontie.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1. Flux numérique et chirurgie dentaire .....</b>	<b>19</b>
2.1.1. Définition.....	19
2.1.2. Les guides chirurgicaux .....	19
2.1.3. Fabrication des guides chirurgicaux.....	22
2.1.4. Flux numérique complet et implantologie .....	23
2.1.5. Flux numérique complet et orthodontie.....	25
<b>2.2. Flux numérique complet et Endodontie .....</b>	<b>28</b>
2.2.1. Applications.....	28
2.2.2. Concept de la chirurgie endodontique guidée .....	29
2.2.3. Indications de la chirurgie endodontique guidée .....	33
<b>3. Objectifs de l'étude.....</b>	<b>34</b>
<b>4. Matériel et méthodes .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Protocole.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2. Planification .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. Prototypage .....</b>	<b>40</b>
<b>4.4. Validation du design et impression .....</b>	<b>43</b>
<b>4.5. Protocole de mesures.....</b>	<b>44</b>
<b>5. Résultats .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Discussion .....</b>	<b>48</b>
<b>6.1. Méthodologie de la planification .....</b>	<b>48</b>
<b>6.2. Protocole.....</b>	<b>49</b>

6.3.	Design du guide chirurgical .....	49
6.4.	Validation du cahier des charges.....	50
6.5.	Analyse des résultats .....	52
6.6.	Comparaison à la littérature .....	53
6.7.	Protocole de mesures.....	54
6.8.	Les biais.....	55
6.9.	Objectifs de la seconde partie de l'étude .....	55
6.10.	Protocole modifié pour la seconde étude .....	56
	<b>Conclusion .....</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>61</b>

# **Évaluation ex vivo d'un guide chirurgical imprimé tridimensionnellement pour la chirurgie endodontique**

## **Introduction**

La chirurgie endodontique consiste en la mise en forme, la désinfection et l'obturation du système canalaire par voie rétrograde afin de prévenir toute récurrence de lésion péri apicale. Le pronostic d'une telle intervention était considéré comme incertain avec des taux de succès très variables allant de 25-90%(1,2,3). Cependant, depuis les 25 dernières années, la chirurgie endodontique a drastiquement changé grâce à l'essor de la magnification optique, de l'imagerie diagnostique tridimensionnelle, des inserts ultrasonores et des matériaux d'obturation (4). Le terme de chirurgie endodontique a évolué vers la notion de microchirurgie endodontique.

Ces évolutions techniques et matérielles ont significativement amélioré les taux de succès par rapport à la chirurgie endodontique conventionnelle pour atteindre 90% (5,6). Le taux de succès de microchirurgie endodontique est similaire au taux de succès de l'implantologie même si la comparaison est difficile tant les deux thérapeutiques sont différentes(7,8).

Les difficultés principales liées aux traitements rétrogrades sont les accès complexes aux apex (notamment sur les molaires maxillaires et mandibulaires) et la proximité des structures anatomiques que sont le nerf mentonnier, le nerf alvéolaire inférieur (NAI), le sinus maxillaires ainsi que les fosses nasales. Sans une planification aboutie, ces difficultés peuvent être un frein au succès de microchirurgie endodontique.

Afin de lever ces difficultés, il a été proposé dans cette étude une technique de chirurgie endodontique utilisant un guide chirurgical, on parle alors de chirurgie guidée.

Cela rejoint les évolutions numériques dans les domaines de l'implantologie et de l'orthopédie dento-faciale (ODF) qui utilisent des guides chirurgicaux afin de gagner en précision, en fiabilité et en sécurité sur certains types d'interventions.

Les concepts de chirurgie guidée sont éprouvés dans les domaines de l'implantologie et de l'ODF et sont permis par les innovations dans la Conception et Fabrication Assistée par

Ordinateur (CFAO). L'essor croissant de l'impression tridimensionnelle participe également à la démocratisation des guides. L'impression « 3D » est de plus en plus utilisée dans tous les domaines de production (automobile, ingénierie, médecine, ...) et s'améliore ainsi rapidement en proposant des matériaux de plus en plus performants pour des coûts de plus en plus faibles. Ces facteurs rendent l'impression tridimensionnelle au cabinet plus facilement accessible.

L'hypothèse de départ était donc d'extrapoler ces innovations à la chirurgie endodontique afin de créer un guide et de mesurer la précision d'une telle technique avec un essai sur mâchoire porcine.

Toutefois, ce concept est encore naissant et est très peu abordé dans la littérature scientifique. C'est pourquoi cette étude pilote propose l'élaboration d'un protocole de mesures de la précision de guides chirurgicaux destinés à la chirurgie endodontique.

L'objectif de ce travail était de valider un protocole de modélisation et fabrication permettant ensuite une étude de plus grande ampleur afin de quantifier la précision d'une telle technique.

L'étude a été réalisée sur une mâchoire porcine. En effet les structures dentaires et parodontales étant similaires à celle de l'humain, le modèle porcin permet la prise de clichés radiographiques, la prise d'empreintes optiques, la modélisation et la fabrication d'un guide chirurgical et enfin la réalisation de la chirurgie guidée.

Après introduction des différentes notions et comparaison aux autres domaines de la chirurgie dentaire, ce travail propose la description de l'étude pilote qui a été réalisée. Les résultats obtenus sont quantifiés et enfin critiqués afin d'élaborer un protocole abouti pour la seconde partie de l'étude.

# 1. Microchirurgie endodontique

## 1.1. Définition

La microchirurgie consiste en l'utilisation de grossissement optique par un microscope opératoire afin de réaliser un type de chirurgie. Utilisée dans de nombreux domaines de la médecine, elle connaît un succès croissant en chirurgie dentaire et est considérée comme une des révolutions de ce domaine médical.

Les grossissements optiques ont permis de faire évoluer l'instrumentation, de faciliter l'accès visuel et instrumental aux systèmes canaux, de diminuer la taille des ostéotomies nécessaires, de mieux inspecter les racines dentaires et *in fine* de fiabiliser la chirurgie endodontique. Le terme reconnu actuellement est celui de microchirurgie endodontique (9).

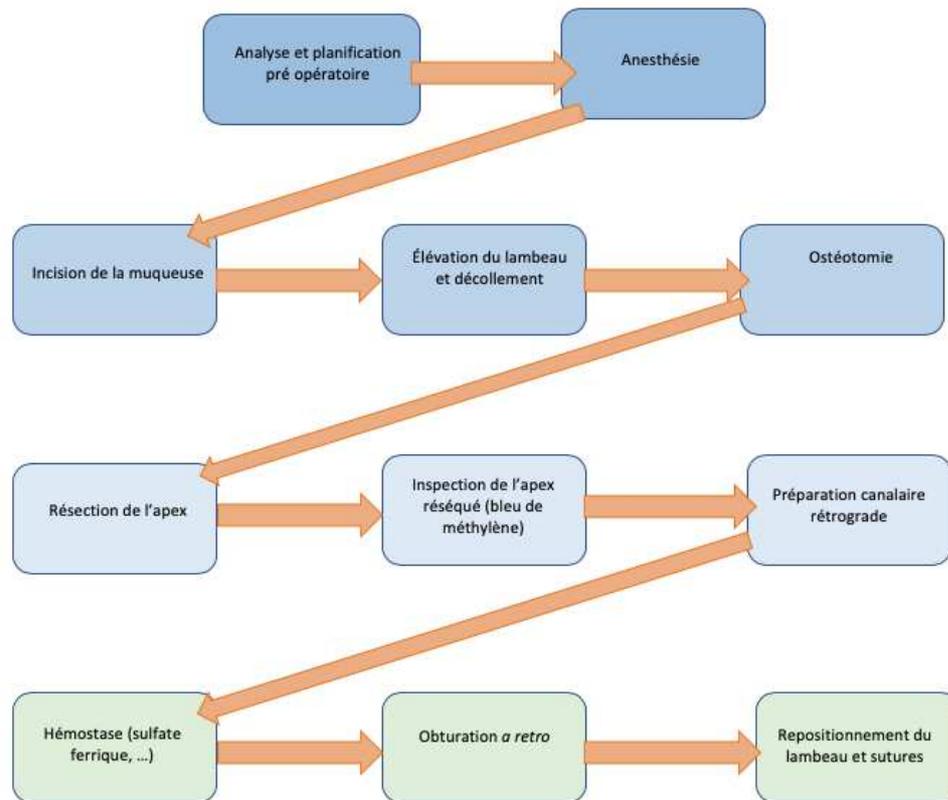
D'après les recommandations de la Société Européenne d'Endodontie (10), la microchirurgie endodontique se définit comme une procédure utilisée quand l'approche du traitement canalair est techniquement trop complexe voire impraticable.

Les objectifs de la microchirurgie endodontique sont :

- Procéder à l'ablation d'une partie de la racine dentaire qui ne peut pas être désinfectée et/ou obturée avec un matériau d'obturation canalair adéquat, et dont le contenu peut causer ou maintenir une inflammation,
- Faciliter l'accès à la portion apicale, ainsi que la préparation canalair permettant son obturation étanche vis à vis des tissus péri radiculaires.

### 1.1.1. Étapes de la microchirurgie endodontique

Les étapes de la microchirurgie endodontique suivent un protocole précis (**Fig.1**).



**Fig.1. Étapes de la réalisation d'une microchirurgie endodontique**

Quelques variations peuvent être réalisées en per opératoire. Par exemple dans les cas dits « fenestrés » où la lésion apicale a traversé la corticale osseuse, ou encore dans des cas particuliers comme les « dens in dente » ou certaines anatomies particulières.

## 1.2. Indications et contre-indications

Comme expliqué précédemment, un échec endodontique qui ne répond pas à une thérapeutique de retraitement orthograde peut nécessiter une chirurgie apicale (10).

Le choix thérapeutique se base sur l'évaluation clinique, les facteurs intrinsèques à la dent traitée et extrinsèques.

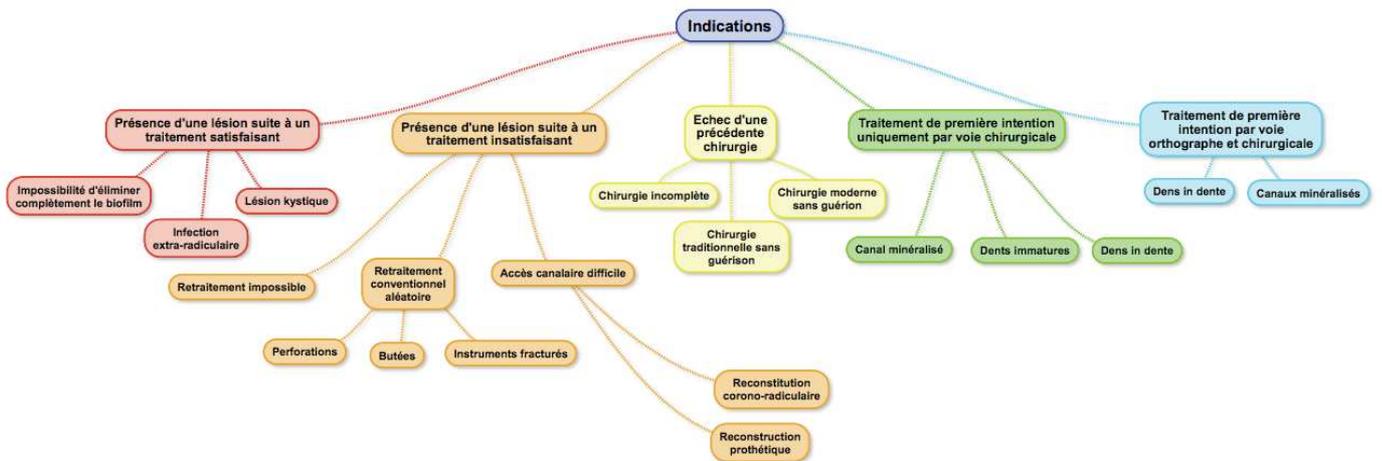
Selon les recommandations de la Société Européenne d'Endodontie, les indications de l'endodontie chirurgicale sont nombreuses (10) :

1. Découverte radiologique d'une lésion inflammatoire péri radiculaire d'origine endodontique (LIPOE) et/ou de symptomatologie, associées avec un canal obstrué (le retrait de l'obstruction étant impossible, ou trop risqué en termes de dommages pour la dent concernée)
2. Extrusion de matériaux avec découverte clinique ou radiographique d'une LIPOE et/ou de symptômes persistants sur une période prolongée
3. Persistance ou émergence d'une symptomatologie après le traitement endodontique orthograde alors que le retraitement n'est pas approprié
4. Accidents de préparation comme la perforation d'une racine ou du plancher pulpaire et qui ne sont pas traitables par l'abord de la cavité d'accès

Des contre-indications existent également (10) :

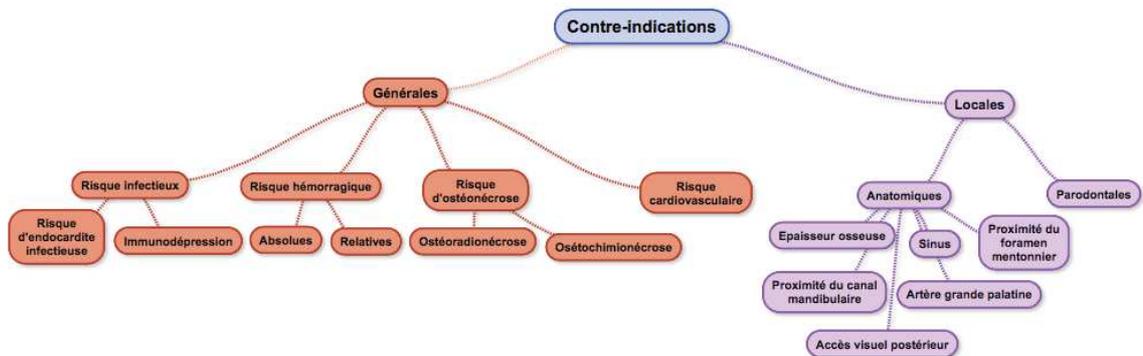
1. Facteurs anatomiques locaux comme l'impossibilité d'accès à la partie apicale de la racine
2. Support parodontal insuffisant / Dent non conservable
3. Patient non coopératif
4. Patient présentant un historique médical contre-indiquant la chirurgie ou les traitements endodontiques en général.

En prenant en compte tous ces facteurs, B. KHAYAT et G. JOUANNY (11) proposent une arborescence plus claire de ces indications.



**Fig. 2 – Arborescence des indications de la chirurgie endodontique – « La chirurgie endodontique Tout simplement », B. KHAYAT & G. JOUANNY**

De même les contre-indications peuvent être résumées selon une arborescence schématique :



**Fig. 3 – Arborescence des contre-indications de la chirurgie endodontique – « La chirurgie endodontique Tout simplement », B. KHAYAT & G. JOUANNY**

### **1.3. Taux de succès de l'endodontie chirurgicale**

Les études sur le succès endodontique reposent sur deux types de paramètres (12):

- Subjectifs : c'est à dire l'absence, la régression ou persistance des symptômes cliniques en réponse à des tests cliniques
- Objectifs : à l'aide d'un examen radiologique bi dimensionnel voire tridimensionnel

L'échec endodontique est défini comme l'apparition ou la persistance de signes cliniques ou radiologiques (Lésion inflammatoire péri-radulaire d'origine endodontique ou LIPOE).

La notion de succès endodontique est plus délicate à définir. En effet à l'échec endodontique s'opposent la guérison et les situations en voie de guérison (12).

Le taux de succès de la chirurgie traditionnelle sans aide visuelle se situe entre 40 et 90% et entre 85 et plus de 90%(13) dès lors qu'un microscope opératoire est utilisé.

Le taux de succès exact en endodontie micro chirurgicale varie selon les études.

Toutefois les méta-analyses les plus récentes (6) montrent des résultats variables entre 91% (14) et 93.1% (15) à 24 mois post opératoires sur des échantillons supérieurs à 100 dents traitées.

Selon Strbac et al., l'utilisation des techniques microchirurgicales modernes permet une diminution des échecs et des besoins de retraitements endodontiques qu'avec les techniques traditionnelles (9). Il est à noter que la présence de complications lors du retraitement endodontique, comme une ovalisation du foramen ou une perforation, fait chuter le taux de succès à 50% (16).

L'utilisation de nouveaux matériaux, comme les biocéramiques, permettrait une augmentation des taux de succès des retraitements rétrogrades par rapport à d'anciens matériaux d'obturation comme l'amalgame. Selon Abusrewill et al. les biocéramiques atteignent un taux de succès de 86,4% à 95,6% entre 1 et 5 ans post opératoires. Toutefois les résultats des biocéramiques tendent à égaler d'autres matériaux comme l'IRM et le Super EBA (17).

## **2. Flux numérique et endodontie**

### **2.1. Flux numérique et chirurgie dentaire**

#### **2.1.1. Définition**

Le flux numérique désigne l'utilisation des outils informatiques et numériques dans la succession des étapes de production d'un produit ou de réalisation d'une action précise.

En chirurgie dentaire, il désigne l'utilisation des outils informatiques (logiciels de radiographie 2D et 3D, logiciel de planification implantaire, ...) et numériques (empreinte intra orale optique, imagerie tridimensionnelle, ...) permettant la réalisation d'un acte technique ou l'élaboration d'un dispositif médical.

Le terme de « flux numérique complet » est utilisé lorsque chacune des étapes de la production est assistée par un outil numérique et/ou informatique.

Pour cela il est souvent utilisé des techniques de Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur ou CFAO.

Le flux numérique est notamment utilisé pour :

- Fabriquer des éléments de prothèse fixée (inlay core, couronne, bridge, couronne sur implant, ...).
- Fabriquer des éléments de prothèse amovible.
- Modéliser et fabriquer des guides chirurgicaux.
- Assister les traitements ODF.

#### **2.1.2. Les guides chirurgicaux**

Un guide chirurgical est un dispositif médical permettant à l'opérateur d'être assisté dans une ou plusieurs des étapes d'une chirurgie.

Il peut servir de repère visuel (vérifier un axe implantaire), d'aide à la chirurgie (forage pilote, préparation du site implantaire, ...) et peut même guider toutes étapes d'une procédure chirurgicale.

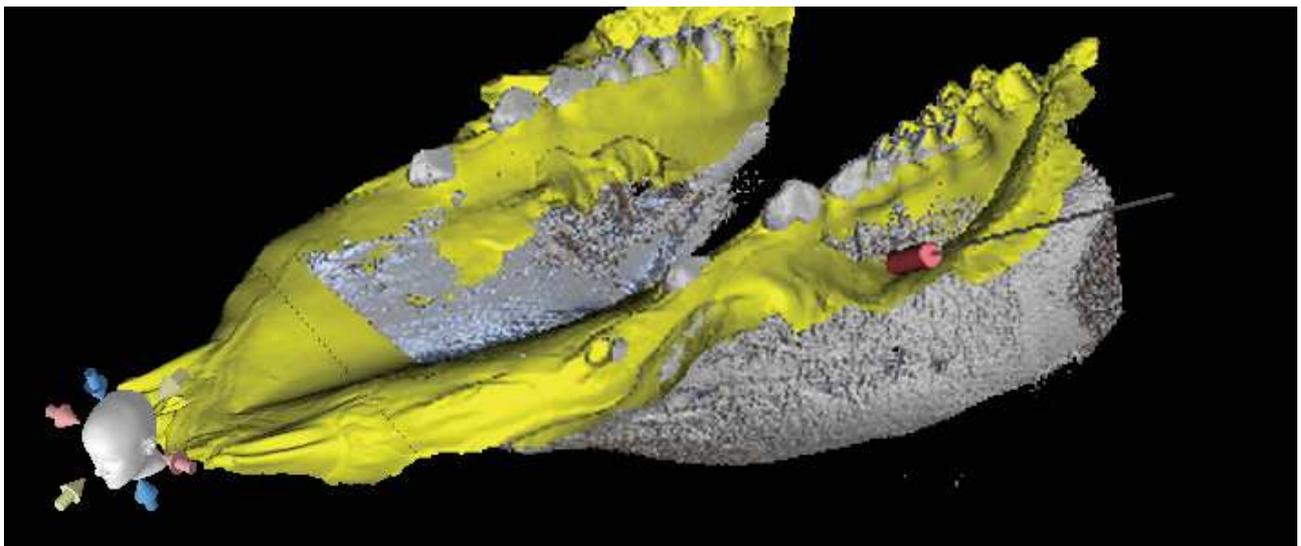
Là où il y a quelques années les logiciels ne permettaient que la planification, obligeant le praticien ou le prothésiste à fabriquer manuellement le guide (18), le « full digital workflow » ou « flux numérique complet » a désormais permis une chaîne numérique complète : depuis la prise d’empreinte à l’élaboration du produit fini par CFAO, toutes les étapes sont informatisées.

L’utilisation d’une chaîne entièrement numérique se généralise par l’accessibilité des nouveaux outils comme l’empreinte optique ou scanner optique intra oral qui permet la prise d’empreinte sans passer par un matériau physique.

L’empreinte numérique permet l’obtention d’un fichier STL (STéréo-Lithographie) qui représente les surfaces dentaires et muqueuses scannées.

Ce fichier peut ainsi être superposé aux images radiologiques ou « matching » obtenue sous format DICOM (Digital Imaging and Communication in Medicine)

Ce « matching » permet de combiner les informations de surfaces de l’empreinte optique (dentaires et muqueuses) avec les surfaces 3D obtenus via les données radiologiques du Cone Beam Computed Tomography ou CBCT (osseuses, dentaires, ...) afin de reproduire fidèlement la situation clinique du patient.



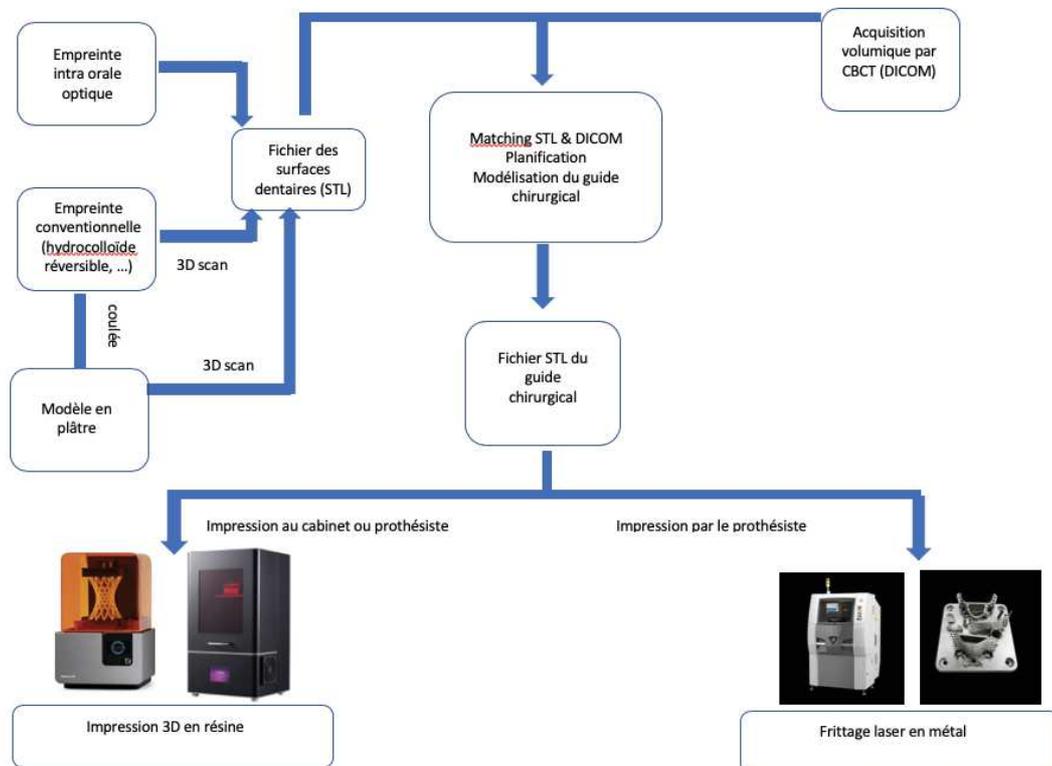
**Fig.4. Matching d’un fichier STL (en jaune) et DICOM (en gris) d’une mâchoire porcine. (BlueSkyPlan 4)**

L'utilisation d'une technique guidée permettrait de maximiser l'efficacité du traitement autant que la préservation des structures dentaires et parodontales, diminuant ainsi les suites post opératoires(19).

### 2.1.3. Fabrication des guides chirurgicaux

La fabrication des guides chirurgicaux évolue également très rapidement et connaît actuellement beaucoup d'innovations permises par l'impression 3D.

Ces techniques permettent des fabrications de plus en plus précises, avec des matériaux de plus en plus adéquats à la situation clinique et biocompatibles. Il peut s'agir d'impression 3D utilisant des cartouches de résine ou bien d'un frittage laser de cobalt chrome pour fabriquer des guides métalliques (**Fig.5**).



**Fig. 5. Étapes de fabrication d'un guide chirurgical** afin d'obtenir un dispositif en résine ou en métal.

#### **2.1.4. Flux numérique complet et implantologie**

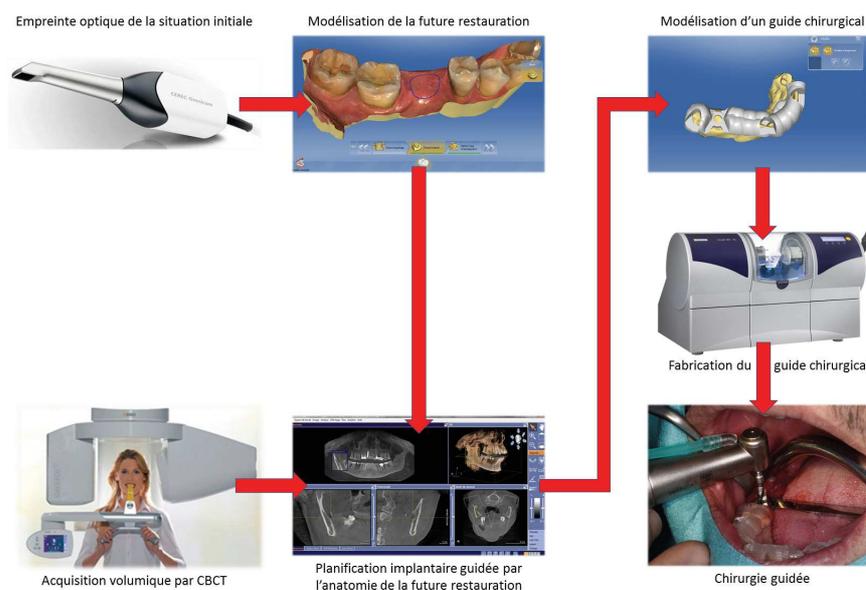
Le terme d'implantologie guidée désigne l'utilisation d'un guide chirurgical lors de la pose implantaire pour une ou plusieurs des étapes.

Cela concerne :

- Les guides chirurgicaux permettant de placer les témoins d'axe implantaire entre les étapes de forage afin de vérifier les axes,
- Les guides chirurgicaux permettant le forage pilote,
- Les guides chirurgicaux permettant plusieurs forages comme le système « douille sur douille ». Dans ce cas les forages peuvent être guidés, puis la pose implantaire peut se faire sans guide ou à travers le guide chirurgical.

Le flux numérique en implantologie est éprouvé et peut se résumer selon les étapes suivantes :

- Réalisation d'un CBCT.
- Réalisation d'une empreinte optique.
- Concordance ou « matching » des données DICOM et STL obtenues.
- Planification du forage nécessaire à la résection.
- Modélisation numérique d'un guide chirurgical.
- Impression tridimensionnelle du guide.
- Réalisation de la chirurgie.



Dr Christian Moussaly

**Fig. 6. La chaîne numérique en implantologie orale (20) (avec l'autorisation de l'auteur Dr Christian Moussaly)**

Selon la littérature scientifique, les techniques d'implantologie guidées sont plus fidèles à la planification que les techniques non guidées.

Beaucoup d'études se sont basées sur la précision d'une telle technique (21,22,23,24).

Les résultats vont systématiquement dans le sens d'une précision accrue dès lors qu'un guide chirurgical est utilisé. Les techniques complètement guidées sont plus précises que celles partiellement guidées (21) et devront être considérées comme les techniques de référence dès lors qu'il existe une exigence particulière de précision (anatomique ou esthétique).

L'hypothèse de cette étude pilote était donc de transposer cette précision à une technique de chirurgie endodontique.

### **2.1.5. Flux numérique complet et orthodontie**

En Orthopédie Dento-faciale, les empreintes physiques sont omniprésentes dans la pratique quotidienne de l'orthodontiste.

Le but est d'obtenir un modèle physique, permettant de planifier le plan de traitement à venir pour le patient.

De plus en plus, les empreintes physiques laissent leur place aux empreintes numériques à l'aide de scanners intra oraux.

Par conséquent, l'expansion du flux numérique en orthodontie connaît de nouvelles utilisations.

D'après la littérature scientifique, plusieurs utilisations sont possibles :

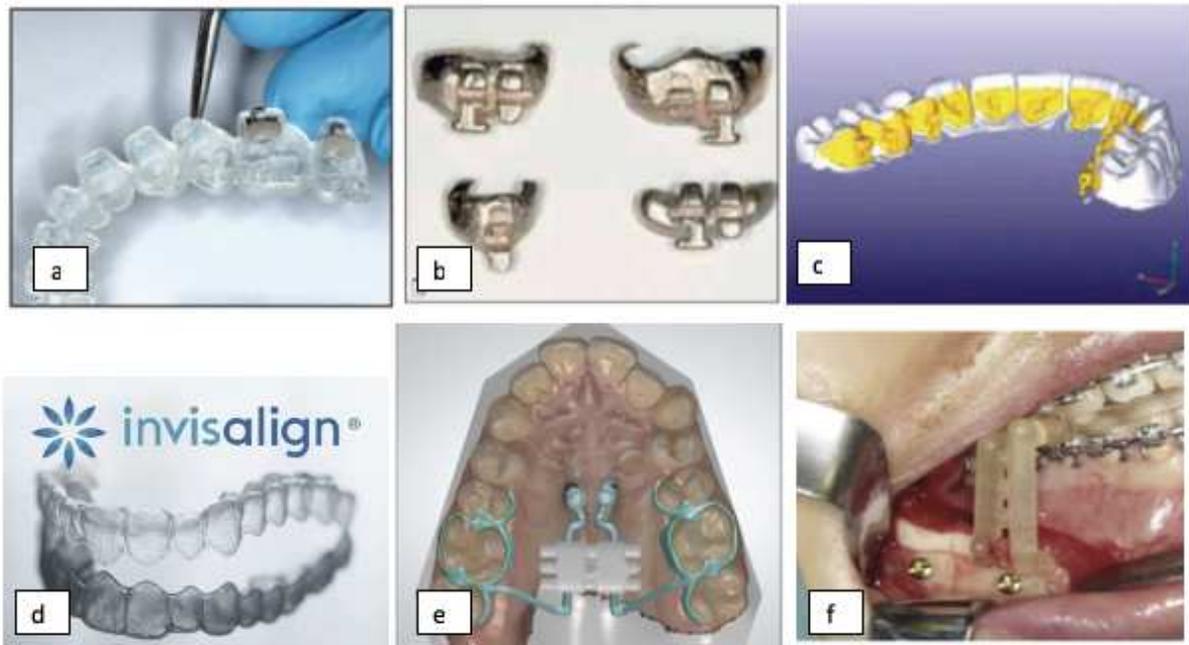
- Le traitement orthodontique virtuel, introduit par Silverman et al. est utilisé afin de construire un modèle tridimensionnel de la denture du patient, pour établir une planification virtuelle du traitement nécessaire. Ainsi, la position prédéterminée numériquement des attaches ou « brackets » est transférée à un guide de repositionnement imprimé en 3D en résine transparente.

Les brackets sont placés dans cette clé de repositionnement afin de réaliser des collages dits « indirects » sur les dents du patient (25,26) (**Fig.7.a**).

- Les brackets peuvent même être supportés par des bases métalliques réalisées sur mesure pour les dents de chaque patient de manière numérique, et fabriquées par frittage laser (26) (**Fig.7.b**).
- L'orthodontie linguale est également possible par flux numérique complet. Elle utilise des clés de repositionnement des brackets imprimés tridimensionnellement.

Les brackets peuvent être associés à des bases métalliques sur mesures modélisées numériquement et fabriquées par frittage laser (27) (**Fig.7.c**).

- Les traitements dits « invisibles » type INVISALIGN® (ALIGN TECH Inc. Amsterdam, Pays Bas) sont également réalisés en grande partie à partir d’empreintes numériques (**Fig.7.d**).
- La modélisation numérique et l’impression tridimensionnelle de plaques métalliques palatine supportée par mini implants palatins comme certains types de disjoncteurs palatins. Les dispositifs métalliques sont modélisés virtuellement et fabriqués par stéréolithographie (28) (**Fig.7.e**).
- L’impression 3D permet aussi la fabrication de fils en Nickel Titane destinés aux traitement orthodontiques (29).
- Enfin d’autres applications chirurgicales existent comme la fabrication de plaques de titane destinées au maintien des ostéotomies mandibulaires. Elle peuvent être associées à un guide imprimé en 3D à appui dentaire permettant le repositionnement précis de la plaque (30) (**Fig.7.f**).



**Fig.7. Différentes applications du flux numérique en orthodontie.**

**7.a. Guide de repositionnement des Brackets dans un traitement orthodontique multi attaches conventionnel « indirect »**

**7.b. Brackets modifiés avec base métallique fabriquées par stéréolithographie**

**7.c. Modélisation numérique des Brackets linguales**

**7.d. Gouttière de traitement orthodontique INVISALIGN®**

**7.e. Modélisation numérique du disjoncteur palatin supporté par mini implants**

**7.f. Guide de repositionnement à appui dentaire de la plaque d'ostéotomie mandibulaire**

Très peu d'études sont disponibles dans la littérature faisant objet de la précision des techniques CFAO en ODF car le coût des techniques traditionnelles reste peu élevé.

Quelques études tendent à réaliser des mesures de précision du collage indirect utilisant un guide (27, 31), mais cela concerne des applications très particulières de l'orthodontie et non pas des études sur la précision du guide en lui-même.

## **2.2. Flux numérique complet et Endodontie**

### **2.2.1. Applications**

L'endodontie a bénéficié au cours des années de l'apport du numérique. Cette évolution concerne :

- L'évaluation diagnostique :
  - Le diagnostic radiologique a d'abord été révolutionné par le tomodensitométrie (TDM). Elle se base sur l'absorption de rayons X par les tissus, et combine les coupes par informatique afin d'obtenir une image 2D ou 3D. Elle permet une visualisation tridimensionnelle dentaire et par conséquent la visualisation de facteurs pathologiques qui étaient difficilement perceptibles par l'imagerie bidimensionnelle (32).
  - Le Cone Beam Computed Tomography (CBCT) s'est ensuite répandu dans les pratiques dentaires. Il est proche du scanner et permet une acquisition d'informations tridimensionnelles ou voxels, traitées informatiquement. Cette technologie a permis d'augmenter le seuil de détection des lésions inflammatoires péri apicales d'origine endodontique (LIPOE), des fractures radiculaires, des résorptions. Le CBCT est utilisé également lors de la prise de décision car il apporte des informations tridimensionnelles pouvant impacter les actes endodontiques tout en étant moins irradiant que le scanner.
  - L'apport du CBCT en endodontie concerne le bilan pré-thérapeutique, le contrôle post opératoire et la surveillance ultérieure.
- La planification préopératoire
  - En endodontie orthograde à l'aide d'outils comme SICAT 3D Endo (Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA)
  - En endodontie chirurgicale à l'aide d'outils de visualisation d'images issues de CBCT.

En endodontie chirurgicale, très peu d'articles scientifiques et seulement quelques cas cliniques publiés dans la littérature font l'objet de la combinaison des outils d'imagerie (CBCT) et tridimensionnels (Scanner intra oral, Impression 3D).

Toutefois les avantages et les publications sont grandissants et concernent :

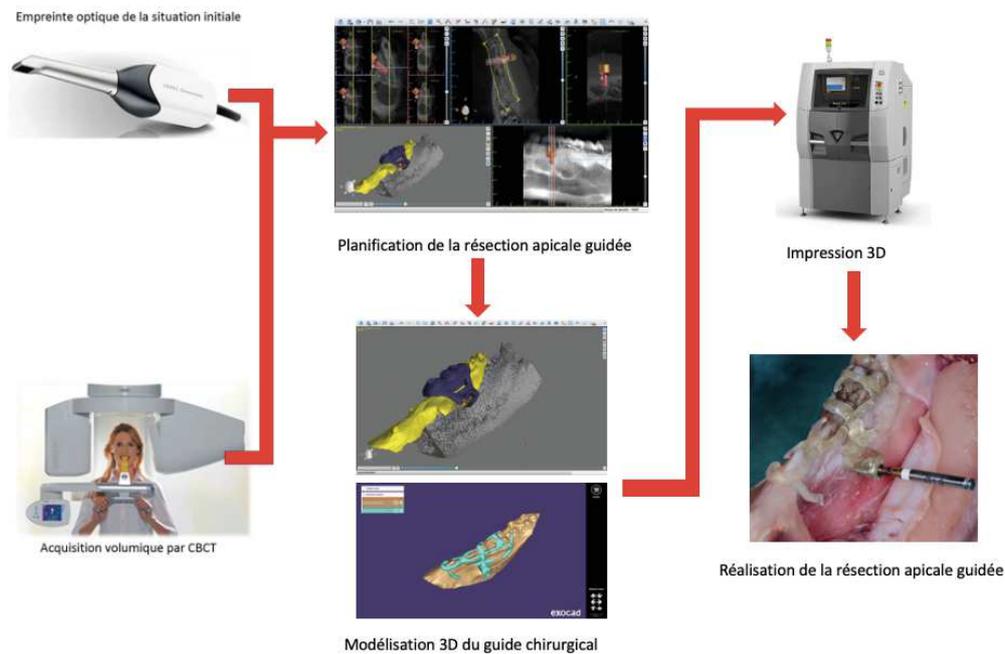
- L'impression 3D de modèles pré-chirurgicaux, permettant de planifier la chirurgie endodontique.
- L'impression de modèles pédagogiques pour la chirurgie endodontique mais également pour d'autres techniques endodontiques (33).
- La planification pré-chirurgicale et l'impression de guides chirurgicaux permettant l'accès à des canaux oblitérés (34). Ces guides ont été évalués en termes de précision par plusieurs études (35,36).
- Le design et l'impression tridimensionnelle d'un guide permettant la réflexion du lambeau en per opératoire (37).
- La planification pré chirurgicale d'une résection apicale et l'impression d'un guide. Plusieurs design ont alors été proposés (9,38,39,40).

### **2.2.2. Concept de la chirurgie endodontique guidée**

L'essor du CBCT, des guides chirurgicaux en implantologie puis dans d'autres domaines tels que l'orthopédie dento faciale et l'endodontie pour la réalisation des cavités d'accès, suggère que cette technique est extrapolable aux microchirurgies endodontiques.

Les difficultés principales liées aux traitement rétrogrades sont les accès complexes aux apex (notamment sur les molaires maxillaires et mandibulaires) et la proximité des structures nobles que sont le nerf mentonnier, le nerf alvéolaire inférieur (NAI) ou les cavités aériques. Sans une planification aboutie, ces difficultés peuvent être un frein au succès de l'endodontie microchirurgicale.

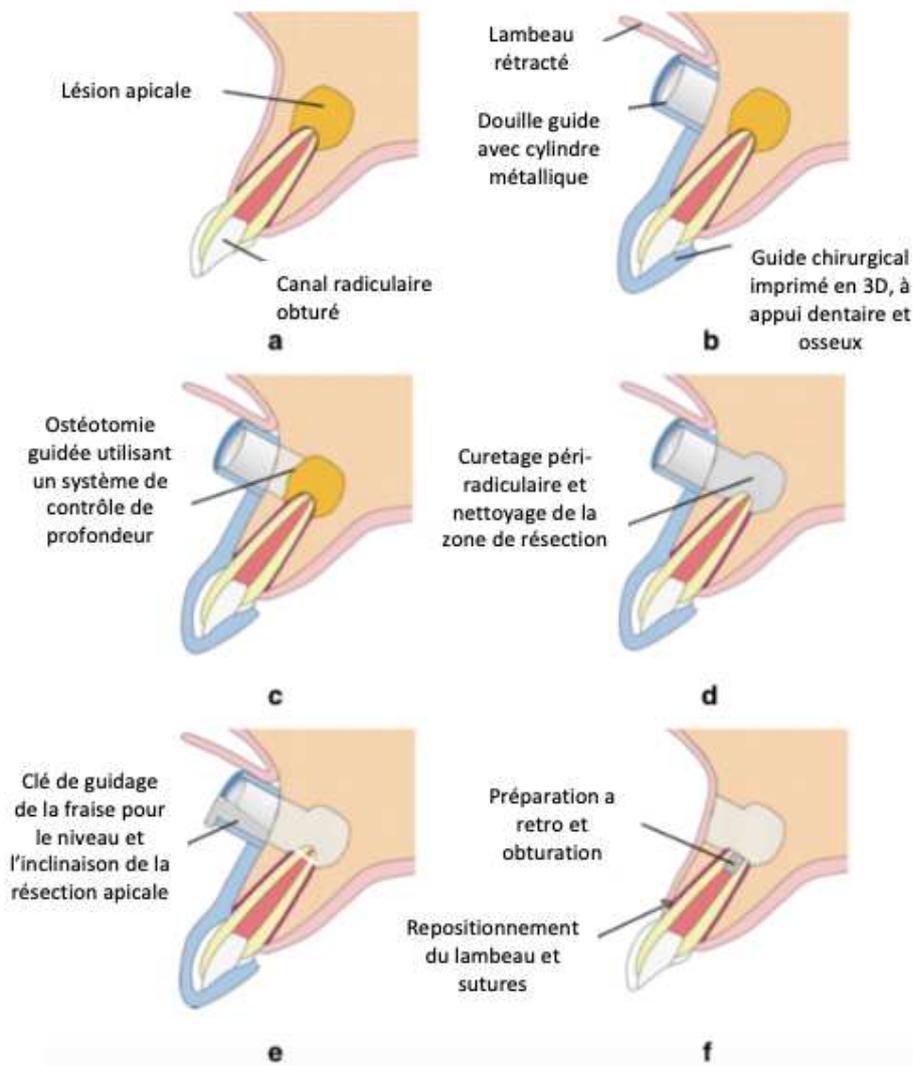
L'hypothèse initiale en termes de protocole est calquée sur celui de l'implantologie. Elle a été publiée par Pinsky et al. en 2007(41) en se basant sur les remarques anatomiques des accès aux apex dentaires de Libersa et al. de 1982 (42).



**Fig. 8. Hypothèse de la chaîne numérique chirurgie endodontique *a retro* (inspirée du Dr Christian Moussally)**

L'impression 3D peut être réalisée au cabinet, ou au laboratoire, après analyse de coûts et de qualité de la réalisation (**Fig.5**).

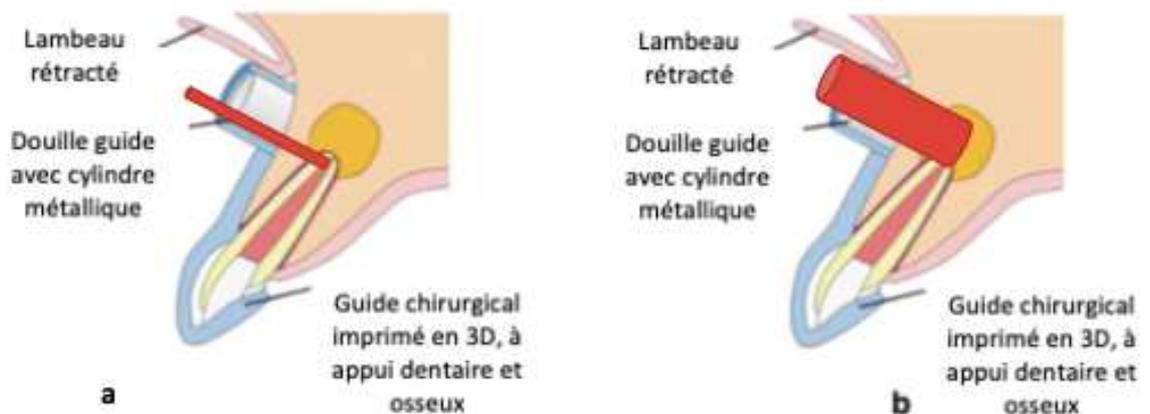
La revue de Shah & Chong (33) développe très bien les concepts d'utilisation de l'impression tridimensionnelle en endodontie non chirurgicale et chirurgicale. Ils proposent une succession de schémas explicatifs de la technique de résection guidée.



**Fig. 9. Traitement endodontique chirurgical assisté par un guide chirurgical imprimé tridimensionnellement pour la précision de l'ostéotomie et de la résection apicale. (Issu de Shah et Chong(33) traduit de l'anglais) a. Dent traitée nécessitant un traitement endodontique chirurgical. b. Élévation du lambeau et rétraction, positionnement stable du guide chirurgical à appui dentaire et osseux afin de localiser le site d'ostéotomie. c. Ablation de l'os cortical par des forets calibrés insérés dans la douille métallique. d. Ablation du tissu péri radiculaire infecté et exposition de l'apex. e. Insertion d'une clé de guidage pour la résection apicale avec un foret à contrôle de profondeur. f. Fermeture du lambeau et sutures après préparation et obturation a retro.**

Après analyse de littérature et réflexion sur le concept, deux tendances de chirurgie endodontique guidée semblent possibles.

- L'utilisation de guide chirurgical afin de réaliser une **localisation** de la LIPOE et/ou de l'apex dentaire concerné (**Fig.10.a**). Dans ce cas l'ostéotomie sera de faible diamètre (environ 1 à 2mm) et l'opérateur dégagera dans un second temps l'espace nécessaire pour l'accès visuel et instrumental.
- L'utilisation de guide chirurgical à l'aide de foret de gros diamètre ou de tréphine, permet directement **la résection apicale** (**Fig.10.b**). Dans ce cas l'ostéotomie correspond au volume nécessaire pour l'accès visuel et instrumental soit proche de 3 à 4mm de diamètre (19).



**Fig.10. Concepts de l'ostéotomie en endodontie chirurgicale guidée.** Schéma de Shah et Chong (33) modifié.

- a. Ostéotomie fine (en rouge) permettant la localisation de la LIPOE et/ou de l'apex dentaire visé
- b. Ostéotomie large (en rouge) permettant la résection apicale et l'accès à la LIPOE

Dans l'étude pilote, le premier concept de « localisation apicale guidée » à l'aide d'un foret de faible diamètre sera exploité.

Dans la littérature, une seule étude préclinique de Pinsky et al(41), s'intéresse à la précision d'une telle technique guidée. L'objet de l'étude était de démontrer la précision des guides dans les cas de résections apicales, et montrait un décalage vis à vis de la planification avec guide de 0,79mm contre 2,27mm sans guide.

Toutefois le guide utilisé est dédié à une situation *in vitro* et ne présente pas encore un design utilisable cliniquement, les techniques ayant beaucoup évolué depuis 2007.

### **2.2.3. Indications de la chirurgie endodontique guidée**

L'indication de chirurgie endodontique guidée serait de pallier les contre-indications citées précédemment : les accès complexes aux apex (notamment sur les molaires maxillaires et mandibulaires) et la proximité des structures nobles que sont le nerf mentonnier, le nerf alvéolaire inférieur (NAI) ou les cavités aériques.

De plus cette technique permettrait de faciliter certaines situations cliniques complexes et lever ainsi certains contre-indications relatives (**Fig.3**)

### 3. Objectifs de l'étude

L'hypothèse initiale était de savoir si les acquis de l'implantologie guidée (sécurité, précision, ...) étaient transposables à des guides chirurgicaux dont le but serait de réaliser des résections apicales et ainsi de quantifier la précision de cette technique chirurgicale.

Les objectifs de cette étude pilote étaient :

- Valider la méthode de planification à l'aide d'un CBCT et d'une empreinte optique afin d'obtenir un guide chirurgical à visée endodontique.
- Proposer un nouveau design de guide chirurgical.
- Valider un protocole informatique permettant les mesures de la précision.
- Valider la précision de la résection guidée par rapport à la planification en réalisant un CBCT post opératoire de la mâchoire.
- Éliminer les biais afin de réaliser une étude de plus grande ampleur sur la précision d'une telle technique.
- Proposer un protocole adapté et utilisable pour une étude *ex vivo*.

## 4. Matériel et méthodes

Un test de faisabilité a été effectué sur une mâchoire porcine afin de tester et de valider le design du guide chirurgical à l'aide d'un prototype, puis un guide métallique est modélisé et fabriqué.

Dans cette étude, un cahier des charges a été établi. Le guide chirurgical doit impérativement :

- Comporter un support dentaire sur 1 à 2 dents adjacentes en mésial et distal de la dent traitée,
- Être suffisamment rétentif pour libérer l'opérateur,
- Comporter un volet vestibulaire où se place une douille métallique du commerce ou un cylindre métallique usiné, qui doit guider le foret avec le moins de mobilité possible,
- Être léger et peu encombrant,
- Permettre l'irrigation du site opératoire,
- Bénéficier d'un contrôle de la profondeur de forage afin de libérer l'opérateur.

Le guide chirurgical suivra le concept de « localisation apicale guidée » (**Fig.10.a**) et devra permettre la localisation de l'apex infecté ou de la LIPOE à l'aide d'une ostéotomie de faible diamètre.

Le guide chirurgical s'adressera principalement aux cas dits « non fenestrés » où la LIPOE n'a pas entraîné de perforation corticale vestibulaire.

Son inclinaison devra être au plus proche de 80-90° de l'axe radiculaire (19).

Le ciblage de la lésion devra être fin (1-2mm) et précis, l'ostéotomie finalement réalisée par l'opérateur devra être la plus petite possible (3-4mm).

Des caractères facultatifs, dépendantes des possibilités techniques, ont également été mentionnées : posséder des ailettes vestibulaires facilitant le maintien du lambeau, un guide de lame de bistouri facilitant le tracé d'incision et une douille amovible permettant de libérer l'accès visuel guide en place pendant la préparation *a retro*.

La modélisation du guide se devra d'être rapide, reproductible et à moindre coût.

## 4.1. Protocole

Les caractéristiques principales de nos essais consistent en :

1. Réalisation d'un CBCT sur mâchoire porcine
2. Réalisation d'une empreinte optique sur la même mâchoire
3. Superposition des données DICOM et STL
4. Planification pré chirurgicale et design d'un prototype en résine de guide chirurgical à visée endodontique
5. Prototypage et essai sur mâchoire porcine
6. CBCT post opératoire et analyse des résultats
7. Validation et usinage d'un guide métallique

## 4.2. Planification

Dans le test de faisabilité, un CBCT haute résolution avec les réglages suivants : voxels = 0,16 mm, champ : 8cmx8cm, haute résolution destinée à l'endodontie, 85kV, 6mA, exposition 14,2s, 958mGy/cm<sup>2</sup> (Orthophos XG 3D Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA) a été réalisé sur une mâchoire porcine. Le support utilisé est sommaire dans ce premier cas. Il sera préconisé pour la suite de l'étude un support réglable en hauteur et en inclinaison, gradué dans les 3 dimensions de l'espace et en matériaux radioclairs.

Une empreinte tridimensionnelle a été réalisée sur la même mâchoire à l'aide d'une caméra CARESTREAM CS3600 (Carestream, State of New York, USA).

Les fichiers DICOM et STL ont été superposés en utilisant des repères anatomiques dentaires sur les logiciels BlueSkyPlan 4 (BlueSkyBio, USA), Simplant 18.0 (Dentsply Sirona, York, Pennsylvania, USA) et 3Shape Implant Studio (3Shape, Copenhagen, Denmark).

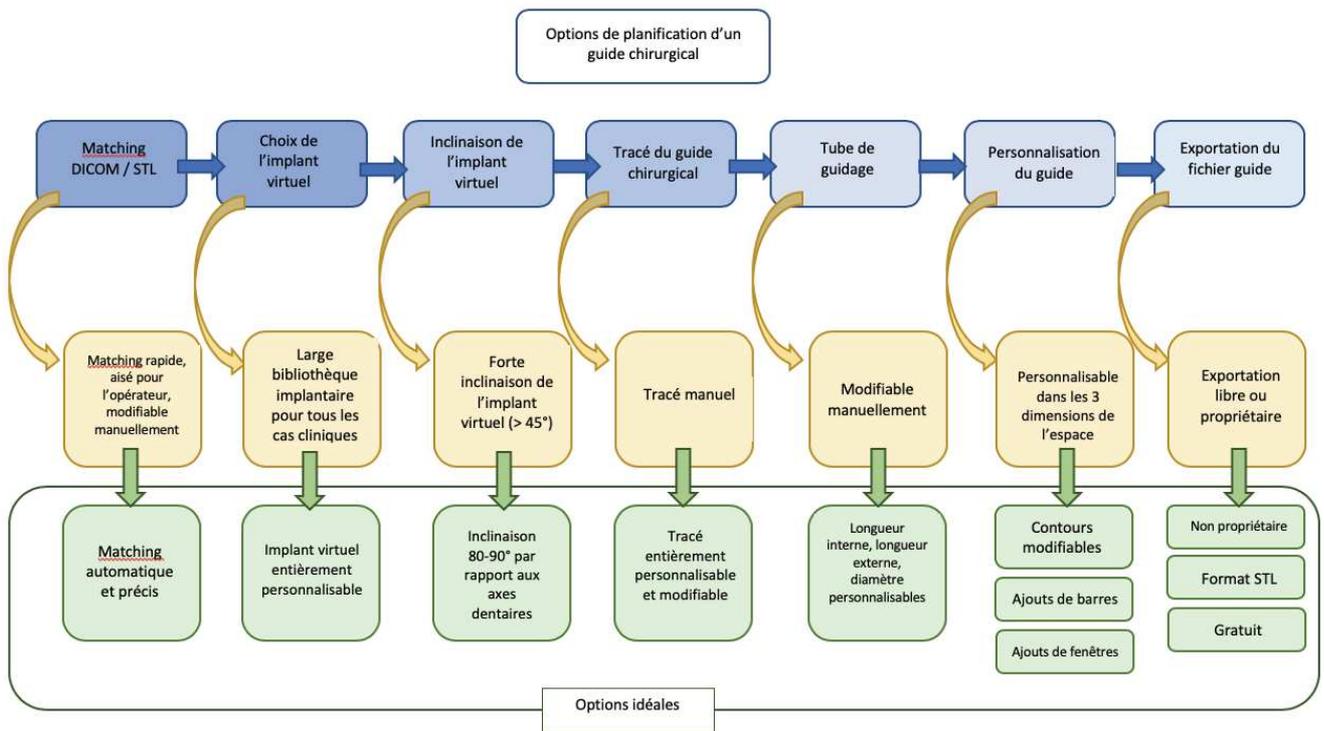
Plusieurs logiciels ont été utilisés afin de comparer leur efficacité dans la réalisation de guides chirurgicaux non destinés à l'usage implantaire. Le choix des logiciels s'est basé sur l'analyse de littérature (9, 37, 38, 41) et ainsi que sur le prêt des logiciels par les fabricants.

Un seul logiciel, SICAT ENDO (Dentsply Maillefer, York, Pennsylvania, USA) destiné aux microchirurgies endodontiques guidées était en développement mais n'a pu être testé dans cette étude.

Dans chaque cas un « implant virtuel » est utilisé pour planifier le forage à réaliser, ce dernier ne sert que de support visuel pour l'opérateur.

Chaque logiciel a été testé afin de placer un implant dans un axe très incliné par rapport aux axes dentaires, et de réaliser un guide chirurgical épousant la forme désirée.

Chaque logiciel se devra de respecter au mieux les critères d'une planification idéale pour un guide endodontique (**Fig.11**).



**Fig.11. Options nécessaires et options idéales permettant la planification d'un guide chirurgical à visée endodontique.**

La planification avec Simplant Pro 18.0 est réalisée avec un implant virtuel incliné à 45° par rapport à l'axe dentaire.

Un implant virtuel STRAUMANN Ø3.3, Longueur 12mm est utilisé.

Sa longueur est déterminée en fonction de l'épaisseur osseuse à traverser et permettant un tube de guidage suffisamment long pour éviter les déviations du foret (environ 5mm).

Un implant virtuel personnalisable est possible et permet de visualiser les dimensions du forage. La modélisation du guide est faite directement depuis l'interface logicielle. Un guide de contrôle de profondeur STRAUMANN Depth Control Sleeve 5.0 est modélisé. Les dimensions du guide dans les 3 plans de l'espace ont été réduites afin de limiter les défauts de calculs (**Fig.12.1**).

L'exportation STL du fichier guide est impossible. Il est obligatoire de passer par Simplant afin d'obtenir le guide.

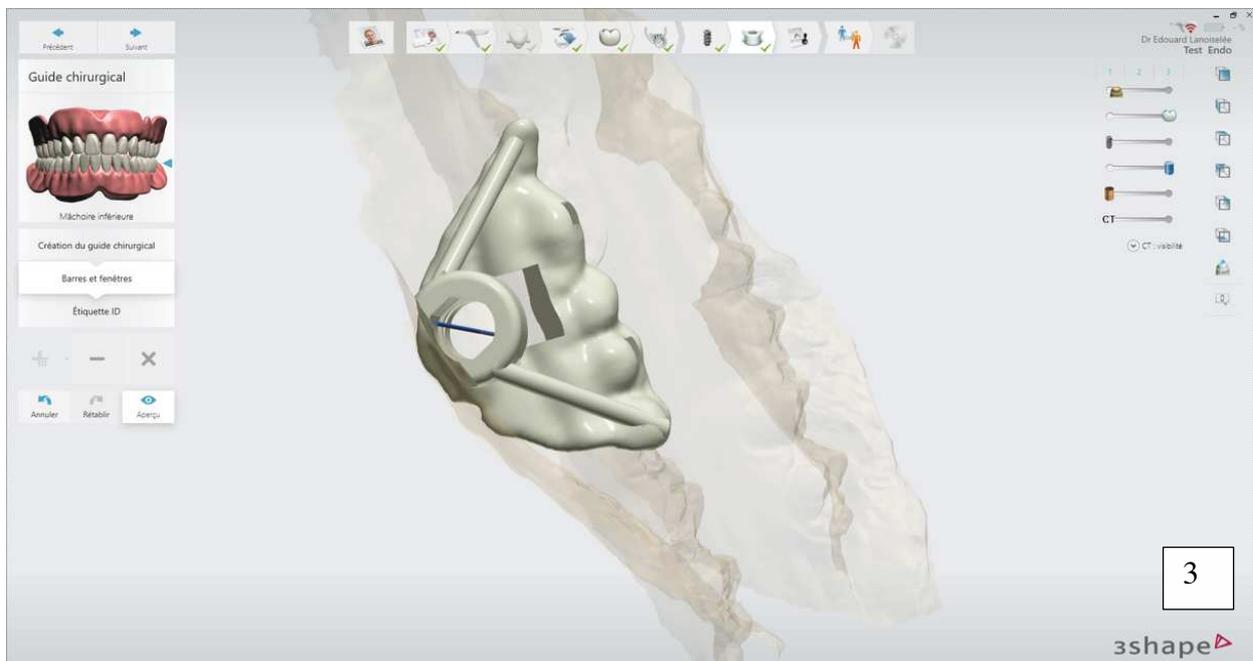
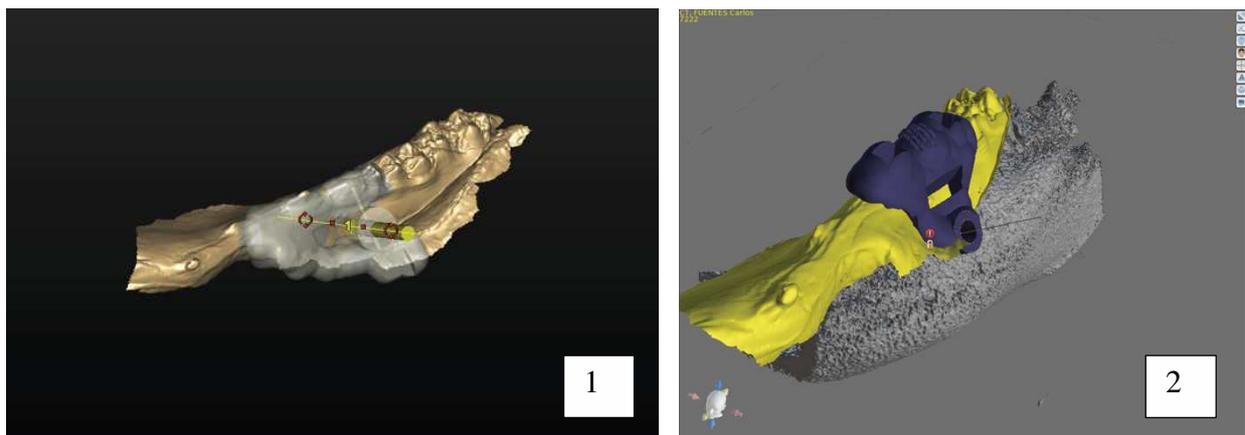
BlueSkyPlan 4.3 en mode utilisateur avancé est utilisé afin de planifier un fraisage à l'aide d'un implant STRAUMANN Ø3.3, Longueur 12mm. Le mode standard ne permet de réaliser que des guides destinés à l'implantologie, le mode avancé est donc nécessaire pour sortir de ce cadre.

Le guide modélisé est paramétré avec un contrôle de profondeur STRAUMANN Depth Control, système de douille qui permet de bloquer le foret à la profondeur de forage souhaitée. La modélisation du guide est réalisée directement depuis l'interface logicielle grâce au tracé précis des limites du guide chirurgical. L'épaisseur est obtenue avec un brossage réglé à 10.0mm (**Fig 12.2**).

En comparaison, une 3<sup>ème</sup> planification a été réalisée par un autre opérateur sur 3Shape Implant studio. Un implant virtuel STRAUMANN, Ø 4.1mm 10mm est placé depuis le vestibule.

La planification du guide est réalisée directement sur logiciel à l'aide des outils disponibles.

Trois fenêtres d'irrigation sont ajoutées. Le guide est épuré et deux barres de renfort sont ajoutées au cylindre (**Fig 12.3**).



**Fig. 12.1. Résultat de planification de guide avec Simplant Pro 18.0**

**Fig. 12.2. Résultat de planification avec BlueSkyPlan 4.3**

**Fig. 12.3. Résultat de planification avec 3Shape Implant Studio**

Pour l'étude, BlueSkyPlan 4 et 3Shape Implant Studio ont été retenus. Simplant Pro 18.0 présentait moins d'avantages et était moins maîtrisé par l'opérateur.

Dans tous les essais, la modélisation du guide est relativement fermée.

Afin d'avoir une plus grande amplitude de modifications du guide, le logiciel de modélisation EXOCAD (Darmstadt, Germany) est utilisé en complément.

### 4.3. Prototypage

Un guide chirurgical a été modélisé sur le secteur gauche en utilisant la bibliothèque des forets implantaires disponibles dans le logiciel en respectant notre cahier des charges. L'implant planifié sert de support visuel sur 3Shape et a été placé de sorte à ce que le forage permette une section de 4.49 mm de l'apex visé (= épaisseur de la racine).

Le forage virtuel correspond au forage pilote de 1,9mm de diamètre.

L'angle entre l'axe radiculaire et l'axe du foret est de 57°. Il n'a pas été possible d'avoir un axe proche de 80-90° (**Fig.11**) car les apex porcins sont beaucoup plus longs et orientés en lingual. De plus le fond du vestibule enregistrable par l'empreinte optique se situait beaucoup plus coronaire vis à vis des apex. Toutefois les facteurs anatomiques chez l'humain seraient plus favorables à un axe proche de 80-90°.

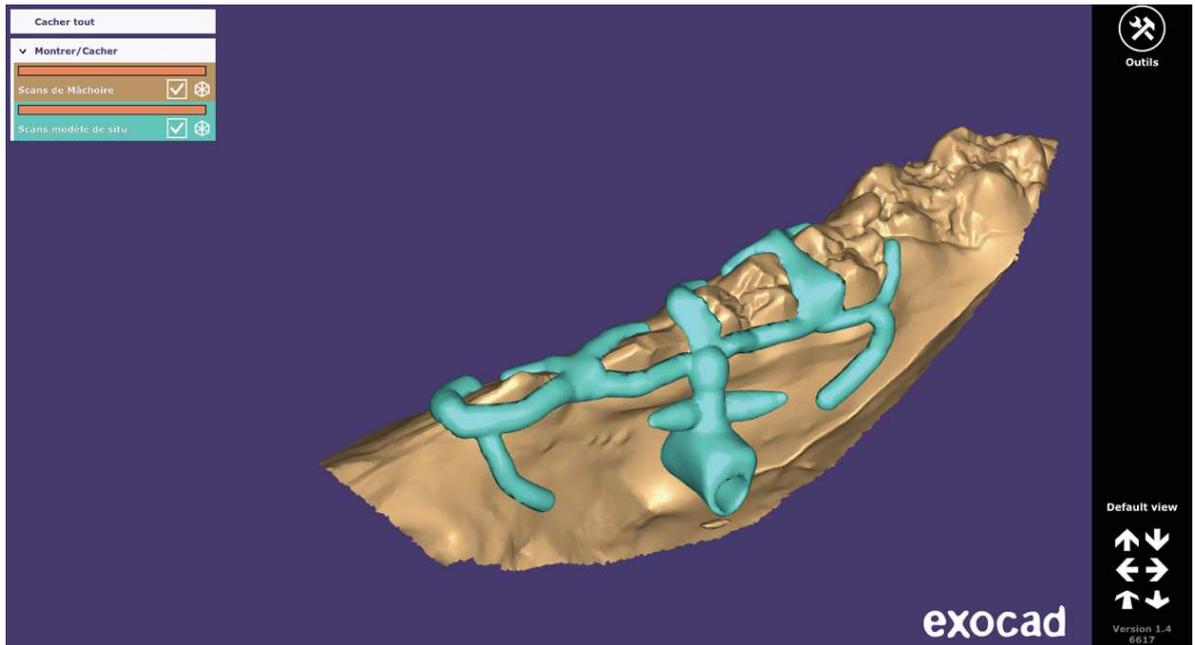
Un foret de 1,9mm de diamètre, et de longueur travaillante de 17 mm a été choisi dans cet essai avec une douille de guidage STECO Single Sleeve 2.0 x 5.0 mm. Le décalage est fixé à 6,3mm afin d'utiliser 16,5 mm de la partie travaillante du foret et d'avoir un contrôle de profondeur visuel sur le dernier marquage laser.

Le logiciel exocad® est utilisé afin d'avoir une plus grande amplitude de design (**Fig.13**).

Deux ailettes pour appuis muqueux sont ajoutées en mésial et distal afin d'éviter la bascule du guide lors du fraisage, ainsi que des picots permettant d'accrocher le lambeau.

Le recouvrement dentaire est partiel et passe la ligne de plus grand contour à la manière de crochets de prothèse amovible partielle à châssis métallique.

Le prototype du guide est imprimé avec l'imprimante 3D Form 2 (Formlabs, Somerville, Massachusetts, USA).



**Fig. 13. Modélisation du guide chirurgical sur exocad®**

La chirurgie est réalisée sur mâchoire décongelée. Les muscles des joues ont été réclinés afin de garantir un meilleur accès visuel et instrumental.

Le guide est placé sur les portions dentaires pour essai puis retiré. Le trait d'incision est réalisé grâce à une lame 15 et comprend une incision horizontale intrasulculaire sur toute la portion dentaire.

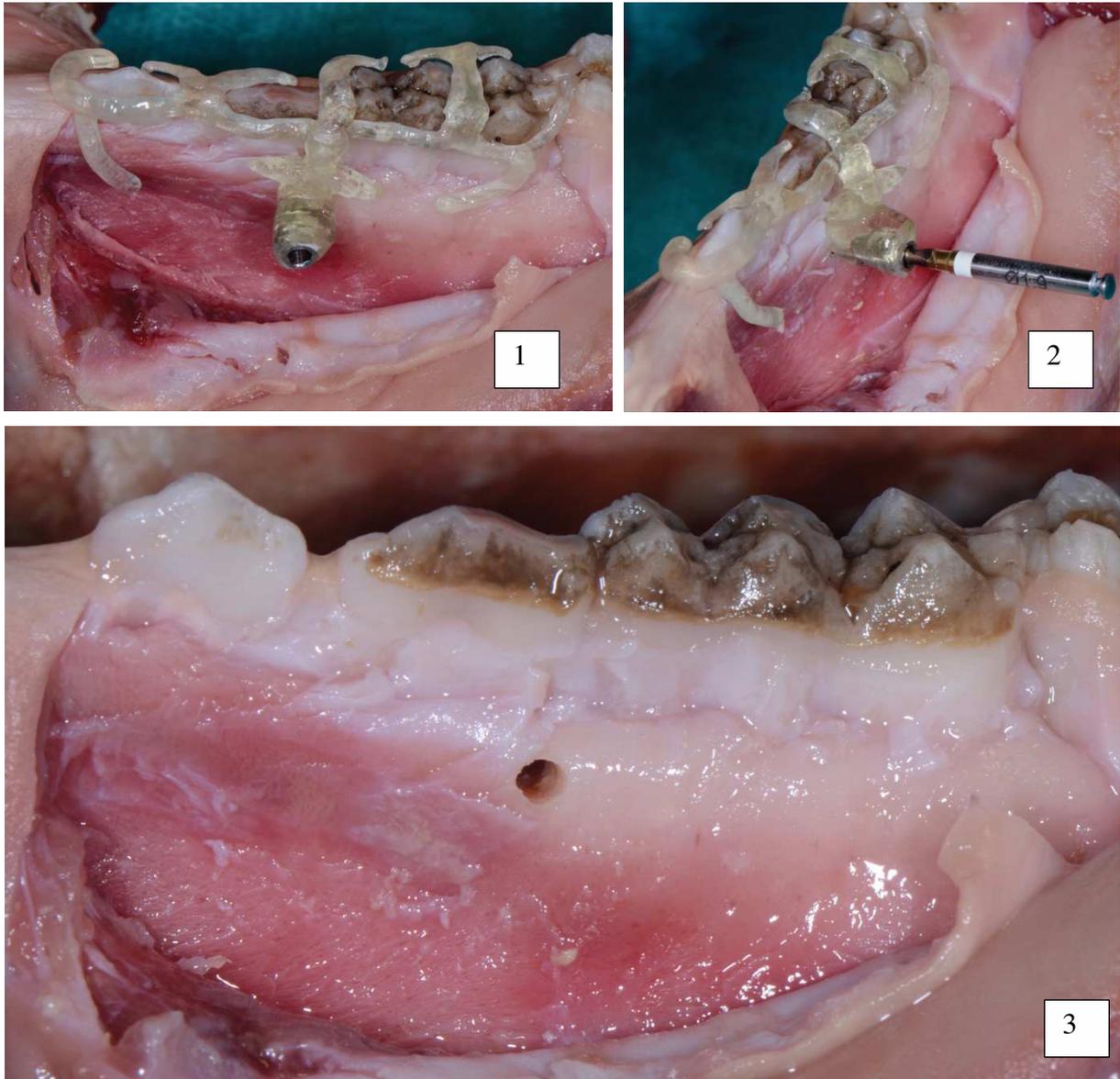
Le lambeau de pleine épaisseur est décollé puis le guide est remis en place. Le fraisage est effectué avec le foret jusqu'au marquage visuel sous irrigation.

Puis le guide est retiré afin de visualiser le forage réalisé.

Le guide est replacé, le foret remis en place dans la crypte osseuse.

Un scanner intra oral utilisant la même camera Carestream CS3600 est réalisé afin d'enregistrer la position du guide ainsi que l'émergence du forage dans un nouveau fichier STL. Ce second fichier pourrait être comparé à la planification initiale en format STL.

Des sutures berges à berges sont réalisées avec un fil Hu-Friedy 3.0 Nylon.



**Figure 14. - 14.1 : positionnement du guide après décollement du lambeau. 14.2 : Fraisage jusqu'au marquage laser prédéfini à l'aide du foret Ø1,9mm. 14.3. Fraisage obtenu après dépose du guide chirurgical.**

La mâchoire est ensuite scannée à l'aide d'un CBCT Orthophos XG 3D utilisant les mêmes paramètres. Ce second CBCT est réalisé afin d'avoir une comparaison d'imagerie pré opératoire et post opératoire.

#### 4.4. Validation du design et impression

Le guide est réalisé en métal pour tester la faisabilité de frittage laser d'un guide. Une douille de guidage est exceptionnellement utilisée pour copier le guide résine, les guides de l'étude suivante seront utilisés sans douille.

Il est fabriqué en Chrome-Cobalt par frittage laser via une imprimante Pro X DMP 200 dental (3D systems, Rock Hill, South Carolina, USA) par le Laboratoire BONGERT (La Roche sur Yon, France)



**Fig. 15. Guide chirurgical métallique obtenu par stéréolithographie**

**15.1. Vue occlusale du guide chirurgical.**

**15.2. Vue vestibulaire du guide chirurgical.**

**15.3. Vue linguale du guide chirurgical.**

Le but de la fabrication était également pour le technicien prothésiste de calculer le coût d'une telle technique et donc sa viabilité économique. En termes de production, le coût est similaire à un guide en résine plein avec une douille du commerce. En effet le guide métallique utilise moins de matière première et normalement pas de douille du commerce. Le coût global facturé au praticien se situe autour de 60 euros.

## **4.5. Protocole de mesures**

Les mesures sont réalisées en utilisant l'outil mesure de 3Shape Implant Studio. La planification initiale est utilisée afin d'avoir les marqueurs visuels : implant virtuel planifié et STL de l'empreinte optique initiale.

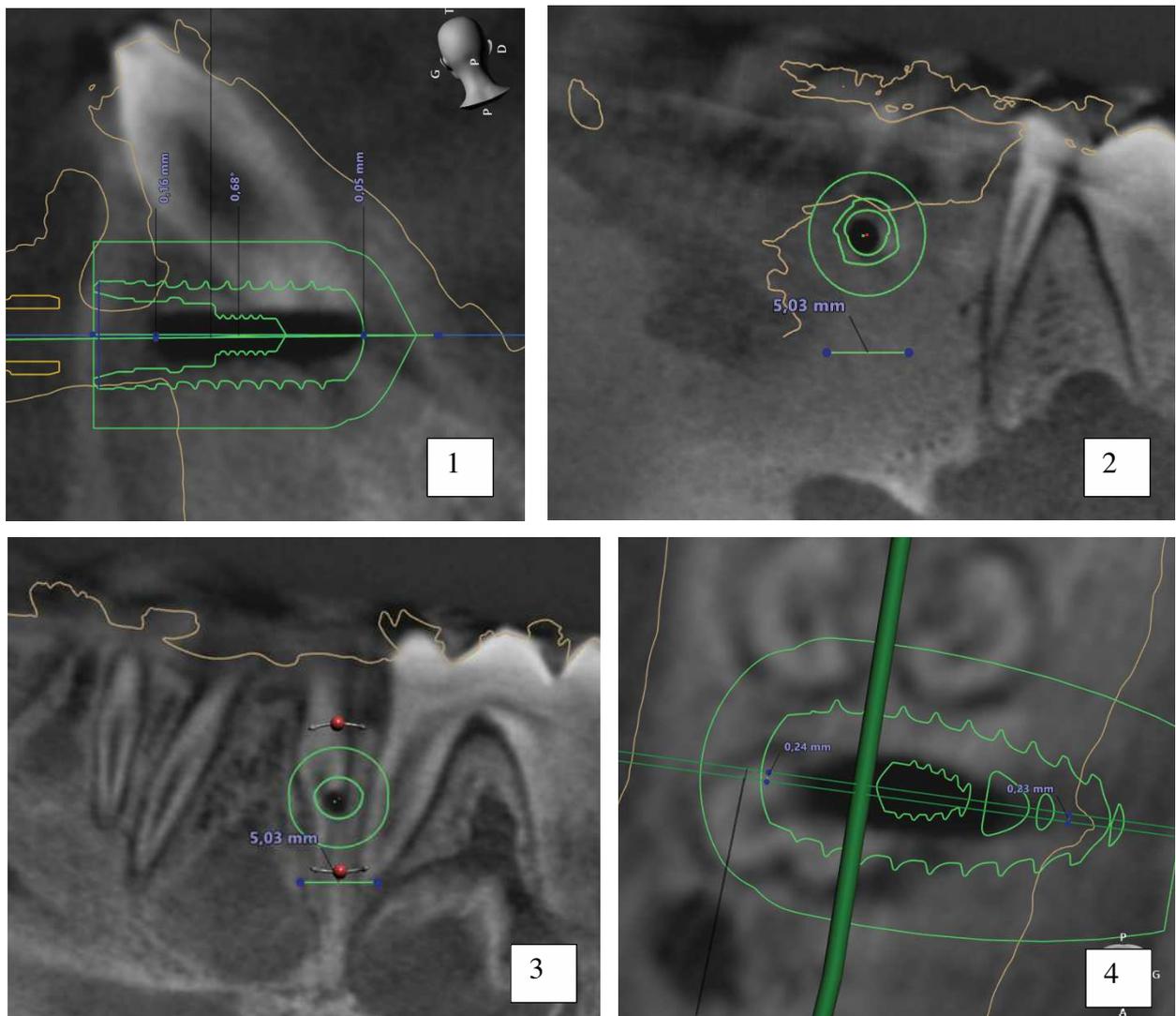
Le CBCT pré opératoire est ensuite substitué par le CBCT post opératoire en gardant les mêmes repères de l'espace. Le matching avec le fichier STL sert de référence pour vérifier que le CBCT est dans la bonne position spatiale.

Il est possible de visualiser sur la même coupe d'une part la planification et d'autre part le forage réalisé.

Chaque mesure est réalisée en deux points anatomiques (début et fin du forage) et dans les 3 plans de l'espace : frontal, sagittal et occlusal.

## 5. Résultats

Les mesures sont réalisées grâce à l'assistant de mesures de 3shape implant Studio. L'outil de mesure 3Shape comporte cependant des imprécisions sur les mesures très fines. Par conséquent les images ont été exportées avec une mesure étalon sur ImageJ, logiciel de mesures beaucoup plus précis (Développeur Wayne Rasband).



**Fig 16. 16.1. Mesures dans le plan frontal.**

**16.2. Mesures dans le plan sagittal au début du forage. (point vert : centre du forage, point rouge : centre de la planification)**

**16.3. Mesures dans le plan sagittal en fin de forage.**

**16.4. Mesures dans le plan occlusal.**

Les distances dans les plans frontaux et occlusaux sont fournies par 3Shape Implant Studio.

Pour les mesures dans le plan sagittal, les coupes d'intérêt sont exportées avec une valeur étalon (5.03mm) dans le logiciel ImageJ. Le centre du forage ainsi que le centre de la planification sont reportés puis les mesures sont effectuées à partir de ces points

Les mesures sont effectuées plusieurs fois par l'opérateur et les valeurs sont compilées dans un tableau. (**Table 1**)

Plan de l'espace	Point de mesure	Objet de mesures	Distance (mm)	Direction	Angulation
Plan sagittal	Début du forage	Décalage mésio-distal	0,25mm	Forage plus mésial	NA
		Décalage corono-apical	0,15mm	Forage plus apical	NA
	Fin du forage	Décalage mésio-distal	0,29mm	Forage plus mésial	NA
		Décalage corono-apical	0,19mm	Forage plus apical	NA
Plan frontal	Début du forage	Décalage corono-apical	0,16mm	Forage plus apical	0,68°
	Fin du forage	Décalage corono-apical	0,05mm	Forage plus apical	
Plan occlusal	Début du forage	Décalage mésio-distal	0,23mm	Forage plus mésial	lim(parallelisme)
	Fin du forage	Décalage mésio-distal	0,24mm	Forage plus mésial	
Profondeur de forage			16,47mm	Marqueur visuel : 16,5mm	

**Table 1. Mesures dans les 3 plans de l'espace du décalage entre la planification et le forage réalisé (les mesures correspondant aux mêmes objets dans les différents plans sont associées par couleurs) (NA : non applicable).**

Ces données indiquent que le forage réalisé est légèrement plus mésial et apical que la planification. Les axes entre les deux sont convergents dans le sens coronoapical (0.68°) et parallèles dans le sens mésio distal.

Toutes les données sont concordantes entre elles. Les écarts mesurés vont toujours dans la même direction, à savoir mésiale et apicale.

La différence la plus grande mesurée entre deux mêmes « objets » de mesures dans deux plans concerne l'écart de fin de forage dans les plans sagittal et frontal et est de 0.14mm.

La plus grande différence entre la planification et le forage réalisés est de 0.29mm.

La différence moyenne mesurée est de 0.195 mm.

En termes de profondeur de forage, ce dernier a été réalisé en per opératoire jusqu'au marquage laser de 16,5 mm. On mesure une profondeur de forage de 16,47mm depuis le bord osseux jusqu'à la pointe de la préparation. Le contrôle de profondeur de forage est donc précis à 0,03mm près dans cet essai.

## 6. Discussion

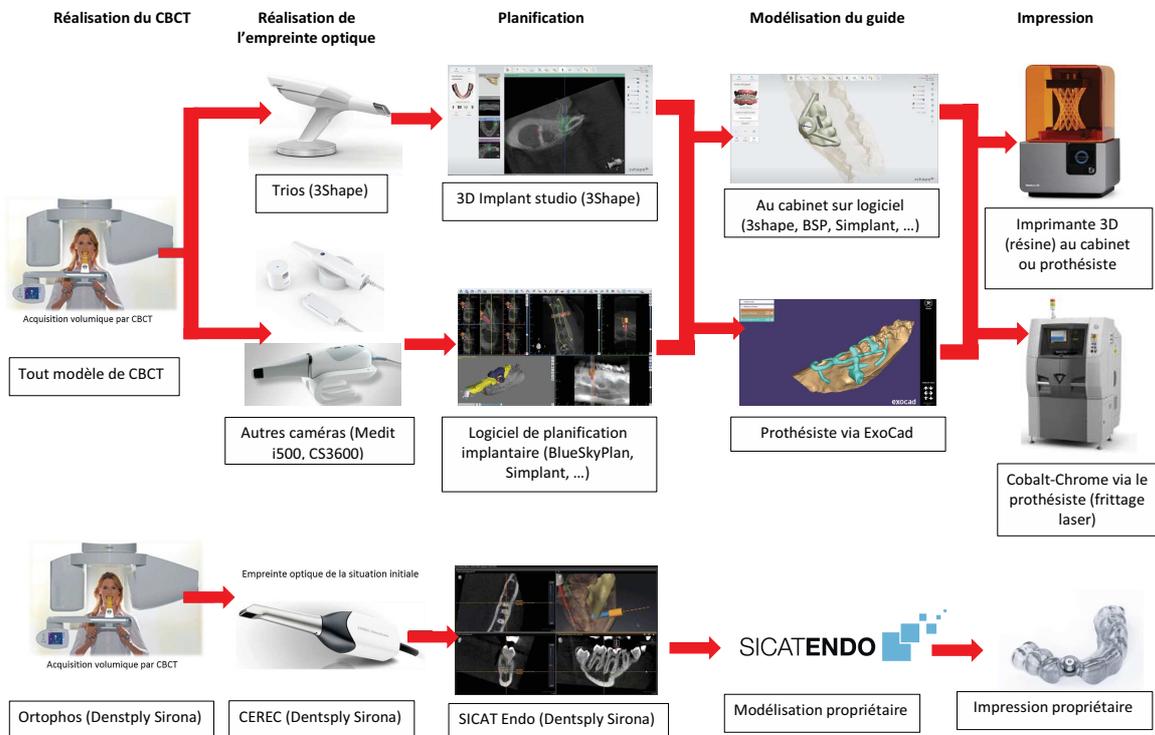
Le but de notre étude était de proposer un design de guide destiné aux résections apicales, de plus le projet devait prouver la faisabilité et la précision d'une telle technique.

### 6.1. Méthodologie de la planification

L'étude a permis de tester plusieurs logiciels de planification, ainsi que plusieurs possibilités en termes de matériels et de logiciel.

Le traitement des données a été plus complexe de par la multitude de logiciels utilisés. Il s'agirait de n'utiliser qu'une seule plateforme afin d'être certains de la compatibilité et de l'exportation des différents fichiers nécessaires.

L'idéal pour le clinicien serait de respecter une ligne directrice définie (**Fig.17**) sur le choix de la technique et du logiciel afin d'avoir un résultat prédictible et reproductible.



**Fig.17. Étapes de fabrication d'un guide chirurgical endodontique en fonction des matériels et suites logicielles disponibles.**

Pour les prochaines études, il s'agira de suivre une seule ligne directrice. A noter que seule la solution SICAT Endo est propriétaire mais n'utilise qu'une seule plateforme, évitant alors tout risque de perte de données ou de non compatibilité des différents fichiers.

## **6.2. Protocole**

Le protocole supposé concernait la possibilité de réalisation d'un guide à partir d'un CBCT (fichier DICOM) et d'une empreinte optique (fichier STL).

A l'issue des essais, il a été possible de réaliser un guide résine puis un métallique à partir des données. Les autres planifications sur différents logiciels ont également permis l'obtention de guides virtuels pouvant être imprimés par différentes techniques.

Le protocole supposé initialement, calqué sur celui utilisé en implantologie (**Fig.8**), est donc applicable à l'endodontie pour la réalisation de résections apicales guidées.

## **6.3. Design du guide chirurgical**

Deux types de design ressortent de l'étude :

- Les modélisations directement réalisées sur le logiciel de planification. Dans ce cas ils sont similaires à ceux d'implantologie :
  - En résine
  - Courbes arrondies à recouvrement complet
  - Présence d'une douille correspondant au foret utilisé
  
- Les modélisations réalisées par le prothésiste via exocad®
  - En cobalt-chrome
  - Schéma similaire à des crochets de prothèse amovible partielle à châssis métallique
  - Possibilité de ne pas utiliser de douille

Via exocad®, logiciel de modélisation tridimensionnelle, il est possible de réaliser beaucoup de design différents.

A noter que d'autres logiciels de modélisation tridimensionnelle non dédiée au domaine dentaire peuvent être utilisés comme MeshMixer (Autodesk Inc.) ou Blender (Blender Inc., Amsterdam, Pays-Bas), et permettent une modélisation manuelle d'un guide chirurgical.

## **6.4. Validation du cahier des charges**

Sur le prototype en résine, 8 facteurs sur 14 sont remplis (**Table 2**). Sur le guide métal, qui a pour but d'être le standard des prochaines études, 9 facteurs sur 14 sont réalisés (dont le facteur rétention qui n'a pu être testé).

Certains peuvent être améliorés (la rétention sur dents humaines sera sûrement plus adéquate). Les 4 facteurs facultatifs qui n'ont pas été possibles sur ce cas sont techniquement difficiles à réaliser. Il s'agira lors des prochaines études de surpasser ces complications techniques, toutefois elles ne sont pas indispensables au bon fonctionnement du guide.

Facteur du cahier des charges	Réalisation sur le guide de l'étude	Commentaires
Support dentaire sur 1 à deux dents adjacentes en <u>mésial</u> et distal	Réalisé	
Rétention suffisante	En résine : rétention faible En métal : sera testé dans la seconde étude	Manque de rétention suite à l'anatomie des dents porcines
Volet vestibulaire avec « douille » de guidage	Réalisé	Possibilité de ne pas avoir de douille du commerce si guide en métal
Léger / Solide	En résine : léger mais trop flexible En métal : léger et très rigide	En résine une épaisseur suffisante est nécessaire (cf. guide implantologie) Le métal permet un design plus fin et léger
Peu encombrant	Réalisé	Avantage du design <u>exocad</u> vs modélisation des logiciels
Irrigation possible	Irrigation efficace	
<b>Ø ostéotomie</b>	Ici localisation de la lésions avec ostéotomie faible (Ø 1.9 mm)	Si ostéotomie plus large : soit une succession de forets croissants pour éviter l'échauffement osseux, soit un nouveau design de foret
Inclinaison 80-90°	Peut être réalisée, ici 57° de par les circonstances anatomiques	Dépend des logiciels
Ailettes vestibulaires de réflexion du lambeau	Non réalisé	Réalisable avec <u>exocad</u>
Guide de lame de bistouri	Non réalisé	Techniquement difficile
Douille amovible	Non réalisé	Techniquement difficile
Planification rapide	Quelques minutes pour utilisateur confirmé	Dépend du logiciel utilisé et du niveau d'expérience
Planification reproductible	Reproductible car dépend de facteurs anatomiques	
Coût réduit	Environ 60 euros pour le guide (résine ou métal)	Coût global dépend du logiciel

Table 2. Validation des facteurs du cahier des charges initial.

## 6.5. Analyse des résultats

Selon l'étude de la précision des forages guidés de Pinsky et al. (41), il était mesuré une déviation systématiquement inférieure à 1mm entre la planification et le forage (cf partie 6.6).

Les résultats obtenus corroborent leurs données avec toutes nos déviations inférieures à 0.30mm.

Dans l'étude de Younes et al (21), qui mesure pour sa part la précision de l'implantologie guidée, les écarts entre la planification et la chirurgie varient de 0.43 à 0.97 mm. A l'instar de cette publication, les résultats obtenus sont également tous inférieurs à 1mm.

Tous les résultats corroborent une déviation inférieure à 0.3mm dans les 3 plans de l'espace. Bien entendu un seul cas a été réalisé, et les seules données disponibles ne permettent pas une réflexion statistique. La précision obtenue peut être non représentative d'un échantillon significativement viable.

Toutefois les résultats sont encourageants, la planification et la chirurgie sont précises, dans ce cas.

Il s'agira d'informatiser le processus de mesures. En effet la plus grande différence de valeur entre 0.05mm et 0.19mm pour le même objet de mesure est relativement grande.

Cela peut être dû aux mesures de l'opérateur, qui, bien qu'assistées par logiciel précis, sont effectuées par un opérateur humain.

Chaque opérateur aura forcément des mesures légèrement différentes en fonction des points de référence choisis.

Toutefois dans l'ensemble, les mesures réalisées pour le même objet dans différents plans sont concordantes entre elles.

Afin d'avoir de nouveaux résultats significatifs il s'agira de :

- Prendre des échantillons représentatifs
- Avoir un seul opérateur pour la planification et le forage afin d'éviter un biais opérateur dépendant (21)
- Automatiser les mesures par un logiciel

## 6.6. Comparaison à la littérature

Cette étude est la seule, selon notre connaissance, à réaliser une étude de précision d'un guide chirurgical à visée de résection apicale sur un modèle animal.

Après analyse de la littérature, une seule étude de Pinsky et al. (41) teste la précision d'un guide de résection apicale.

Deux groupes sont comparés : des forages réalisés à « main levée » avec pour seul support la planification pré opératoire et les connaissances anatomiques, et des forages réalisés via un guide chirurgical.

Les résultats montraient une précision accrue des forages guidés (distance entre la planification et la réalisation de 0.79mm en guidé vs 2.27mm en non guidé), un délabrement moindre (0.63 à 0.99mm en guidé vs 1.4 à 2.9mm en non guidé), ainsi que la concordance avec l'objet visé de la planification dans 88% des cas guidés contre seulement 20% des cas non guidés.

A noter que leurs mesures tiennent compte d'un marqueur radio-opaque qui sert de référence.

L'essai réalisé semble concorder avec leurs résultats car il est à noter une forte précision, un délabrement moindre et la concordance entre la planification et le forage. Toutefois un seul cas n'est pas suffisant pour valider une hypothèse similaire à l'étude de Pinsky.

Les autres études disponibles sont des rapports de cas (9, 38, 39, 40). Toutes les études utilisent des guides en résine.

Ye et al. ainsi que Giacomino et al. utilisent des tréphines.

L'avantage d'une telle technique est le carottage de l'apex réséqué ainsi que de l'os issu de l'ostéotomie.

L'utilisation d'une tréphine comporte un défaut puisque la résection sera semi circulaire et nécessite une reprise de l'ostéotomie et un polissage de l'apex pour être mis à plat.

Dans le cahier des charges proposé, l'approche ressemble à celle de Ahn et al (40). Un guide chirurgical est utilisé afin de faire un ciblage de l'apex avec un foret ou une fraise de

faible diamètre. L'ostéotomie doit ensuite être agrandie afin d'avoir l'accès visuel et instrumental suffisant.

Après analyse des différents cas, deux approches ressortent (**Fig.10**) :

- L'ostéotomie et la résection par une tréphine, permettant une ostéotomie de 3 à 5mm permettant l'accès visuel et instrumental d'emblée
- Le ciblage par un foret de faible diamètre puis l'évasement de l'ostéotomie par une fraise.

L'ostéotomie large (3-5mm) obtenue directement par un foret n'est, à ce jour pas réalisable du fait de l'échauffement osseux qui en résulterait et ainsi des complications post opératoires.

Il s'agirait d'utiliser une succession de forets de diamètres croissants, comme en implantologie, permettant un élargissement progressif du forage. Ce système est utilisé avec un système de « douille sur douille » permettant de guider chaque foret de diamètre croissant.

Une autre solution serait le développement d'une gamme de forets et de douilles dédiées aux résections apicales guidées, permettant de réduire le nombre d'instruments nécessaires. Ces forets seraient plus courts en termes de partie travaillante et de mandrin, pour permettre l'accès instrumental. Leur design et constitution devrait pallier le risque d'échauffement osseux.

## **6.7. Protocole de mesures**

Comme expliqué précédemment (Partie **6.5**), les mesures peuvent être opérateur-dépendant (choix de la coupe, choix des points de références, ...). Par ailleurs les logiciels de mesures utilisés (3shape Implant Studio, ImageJ) peuvent être manipulés avec une imprécision de quelques pixels.

Le technicien confirmé ayant participé à ce cas sera sollicité pour la suite de l'étude afin de réaliser des mesures automatisées sur le logiciel exocad®.

Il s'agira de segmenter le forage réalisé ainsi que le forage planifié afin de comparer leurs coordonnées dans l'espace comme utilisé dans d'autres études (21).

Cela assurera l'absence de biais opérateur-dépendant.

## **6.8. Les biais**

Plusieurs biais ont été recensés et seront à supprimer pour la seconde partie de l'étude :

- Échantillon significatif
- Utilisation de guides métalliques (la résine étant trop flexible et sources d'imprécisions)
- Prévoir un marquage radio-opaque sur les mâchoires afin de replacer dans l'espace les CBCT, il servira aussi de point d'origine des mesures. Ces marquages permettront également de mesurer la distorsion entre les CBCT pré opératoires et post opératoires. Ils pourront consister en l'insertion d'un cylindre métallique sur un repère dentaire ou osseux, ainsi visible sur l'imagerie.
- Utiliser une seule suite de logiciels (**Fig.14**) évitant les incompatibilités et les imprécisions. Dans la prochaine étude, 3Shape et exocad® seront utilisés (cf partie 6.10).
- Automatiser le processus de mesures via un logiciel (exocad®)

## **6.9. Objectifs de la seconde partie de l'étude**

Les objectifs de la seconde partie de l'étude étaient :

- Valider la reproductibilité de la réalisation d'un guide chirurgical métallique à visée endodontique, à partir d'une empreinte optique intra orale et d'un CBCT
- Valider le design utilisé dans la première étude sur un plus grand nombre de cas
- Réaliser une série de résections sur un échantillon représentatif, il faudra plusieurs mâchoires
- Valider la précision des résections guidées sur les essais en automatisant les mesures.

## 6.10. Protocole modifié pour la seconde étude

Suite à cette première étude pilote, nous proposons un protocole utilisable pour une seconde étude.

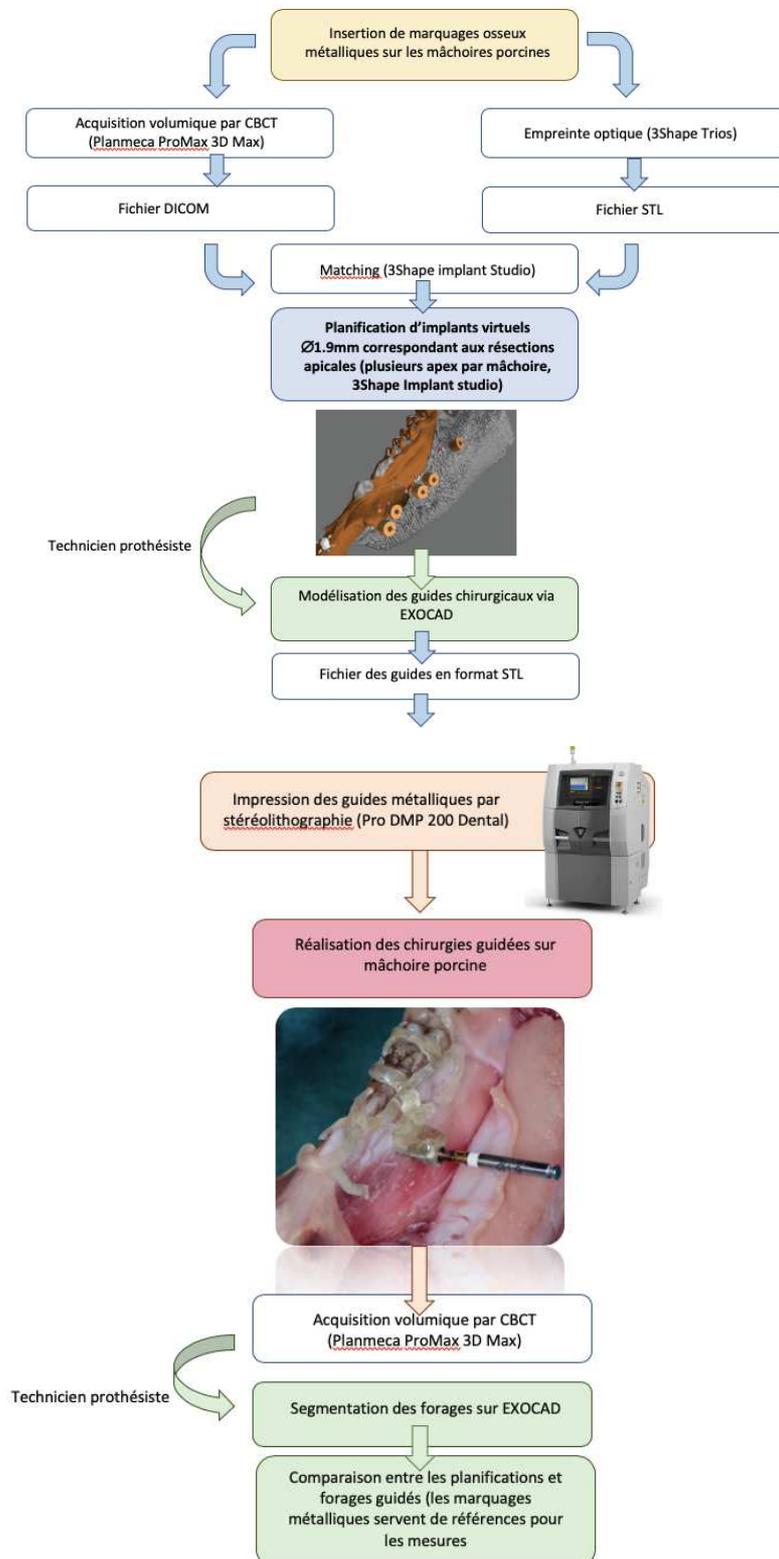
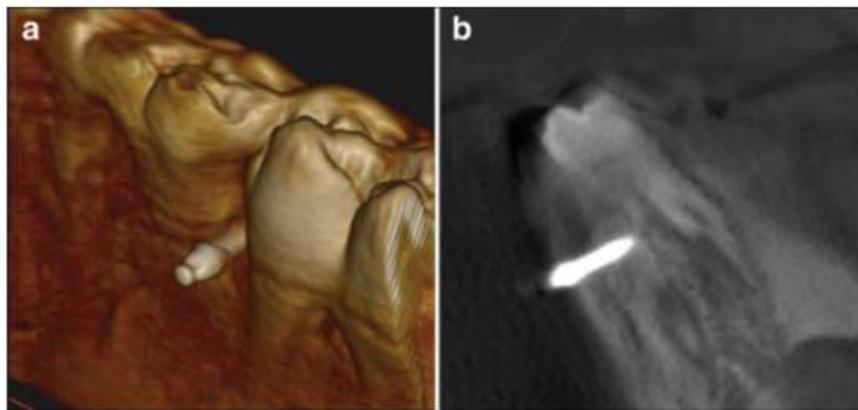


Fig. 18. Protocole destiné à la deuxième partie de l'étude sur un échantillon représentatif

- Insertion sur des repères d'intérêts (dentaire ou osseux) de marqueurs radio-opaques. Idéalement il s'agira d'en placer 2 (par exemple un antérieur et un postérieur) permettant deux points de repères dans chacun des plans de l'espace. Il pourrait s'agir de tiges métalliques à la manière des mini implants utilisés en ODF (43). D'après le CBCT proposé par Matys et al. un tel type de marqueur serait adéquat en repère radio opaque pour la seconde partie de l'étude.



**Fig.19. CBCT post opératoire après pose d'un mini implant orthodontique sur une mâchoire porcine.**

**19.a. Reconstitution tridimensionnelle du CBCT**

**19.b. Coupe frontale du CBCT**

- Réalisation d'un cone beam via un ProMax 3D Max (Planmeca, Helsinki, Finland). Idéalement il s'agira d'utiliser un support radioclaire réglable et gradué afin de pouvoir replacer les mâchoires dans leur position initiale en post opératoire.
- Réalisation d'une empreinte optique grâce à une caméra Trios (3Shape, Copenhagen, Denmark)
- Matching des données DICOM et STL sur 3Shape Implant Studio (3Shape, Copenhagen, Denmark)
- Planification de 3 à 4 résections par côté de la mâchoire sur chaque mâchoire

- Modélisation virtuelle des guides chirurgicaux
- Fabrication des guides chirurgicaux par frittage laser sur Pro DMP 200 Dental par le Laboratoire BONGERT (La Roche sur Yon, France)
- Réalisation des chirurgies guidées
- Réalisation d'un CBCT post opératoire
- Segmentation des fraisages et mesures des déviations par exocad®

A noter que la solution proposée par SICAT Endo (Dentsply Maillefer, York, Pennsylvania, USA), permettant un flux numérique avec un « interlocuteur logiciel » unique est également très intéressante. Il pourra s'agir de tester également cette solution, en comparaison avec le flux numérique que la seconde partie de l'étude proposera.

## Conclusion

Dans le monde de l'endodontie, de nouvelles techniques et innovations fleurissent de jour en jour. Ces techniques doivent permettre aux praticiens une plus grande sécurité ainsi que des résultats les plus fiables possibles, ceci dans l'intérêt des patients.

La CFAO est une innovation en implantologie, en ODF, en odontologie restauratrice, et en endodontie. La démocratisation importante de la CFAO montre l'intérêt grandissant des praticiens pour ces nouvelles techniques. La CFAO offre des possibilités de dentisterie minimalement invasive (cavité d'accès minimalement invasive, chirurgie minimalement invasive sans lambeau, ...) permettant un meilleur confort et une plus grande sécurité des soins. De plus, la CFAO peut être utilisée par des praticiens novices comme expérimentés pour peu qu'ils maîtrisent le flux numérique.

L'impression 3D participe à l'essor de la CFAO du fait de l'accès simple et du coût abordable des imprimantes 3D actuels. Le frittage laser est pour l'instant réservé aux prothésistes tant ces technologies sont coûteuses. Toutefois, le recourt grandissant (prothèse conjointe et adjointe) aux imprimantes laser permet de diminuer les coûts pour rejoindre ceux de l'impression 3D résine.

Le but de cette étude était de démontrer la faisabilité d'une technique assistée par CFAO pour la réalisation d'un guide chirurgical imprimé à visée endodontique.

Le flux numérique complet a permis la fabrication d'un guide métallique dédié à la microchirurgie endodontique. Ce guide présente plusieurs avantages (design léger autorisant un accès visuel et une irrigation facilités).

Bien que certains facteurs restent à améliorer, les résultats semblent prometteurs et garantiront probablement à l'avenir une précision accrue pour les jeunes praticiens comme confirmés.

Les biais ont pu être identifiés, il s'agira maintenant de réaliser la seconde étude sur un plus grand nombre de cas afin de valider la précision de cette technique qui n'est pour l'instant pas quantifiée dans la littérature scientifique.

L'étude montre aussi des limites, tant techniques qu'informatiques, qu'il adviendra de surpasser par la recherche et l'innovation.

Nul doute que le marché du numérique est en plein essor et va profondément modifier la manière d'exercer la dentisterie dans un futur proche.

## Bibliographie

1. Tsesis I, Rosen E, Taschieri S, Telishevsky Strauss Y, Ceresoli V, Del Fabbro M. Outcomes of surgical endodontic treatment performed by a modern technique: An updated meta-analysis of the literature. *J Endod.* 2013;39(3):332-9.
2. Tsesis I, Faivishevsky V, Kfir A, Rosen E. Outcome of surgical endodontic treatment performed by a modern technique: A meta-analysis of literature. *J Endod.* 2009;35(11):1505-11.
3. Song M, Shin S-J, Kim E. Outcomes of endodontic micro-resurgery: A prospective clinical study. *J Endod.* 2011;37(3):316-20.
4. Del Fabbro M, Corbella S, Sequeira-Byron P, Tsesis I, Rosen E, Lolato A, et al. Endodontic procedures for retreatment of periapical lesions. *Cochrane Database Syst Rev.* 2016;2016(10).
5. Setzer FC, Kohli MR, Shah SB, Karabucak B, Kim S. Outcome of endodontic surgery: a meta-analysis of the literature--Part 2: Comparison of endodontic microsurgical techniques with and without the use of higher magnification. *J Endod.* 2012;38(1):1–10.
6. Kohli MR, Berenji H, Setzer FC, Lee S-M, Karabucak B. Outcome of endodontic surgery: A meta-analysis of the literature—Part 3: Comparison of endodontic microsurgical techniques with 2 different root-end filling Materials. *J Endod.* 2018;44(6):923-31.
7. Chércoles-Ruiz A, Sánchez-Torres A, Gay-Escoda C. Endodontics, endodontic retreatment, and apical surgery versus tooth extraction and implant placement: A systematic review. *J Endod.* 2017;43(5):679-86.
8. Setzer FC, Kim S. Comparison of long-term survival of implants and endodontically treated teeth. *J Dent Res.* 2014;93(1):19-26.
9. Strbac GD, Schnappauf A, Giannis K, Moritz A, Ulm C. Guided modern endodontic surgery: A novel approach for guided osteotomy and root resection. *J Endod.* 2017;43(3):496-501.
10. European Society of Endodontology. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J.* 2006;39(12):921-30.
11. Khayat B, Jouanny G. *La chirurgie endodontique tout simplement.* Paris. Espace ID, 2015.

12. Gaudin A. Pronostic des retraitements endodontiques (orthogrades ou rétrogrades) versus implants, *Réalités cliniques* 2016(4)12:291-299
13. Floratos S, Kim S. Modern endodontic microsurgery concepts. *Dent Clin North Am.* 2017;61(1):81-91.
14. Taschieri S, Del Fabbro M, Testori T, Weinstein R. Endoscopic periradicular surgery: a prospective clinical study. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2007;45:242–4.
15. Li H, Zhai F, Zhang R, Hou B. Evaluation of microsurgery with SuperEBA as root-end filling material for treating post-treatment endodontic disease: a 2-year retrospective study. *J Endod* 2014;40(3):345–50.
16. Gorni FGM, Gagliani MM. The outcome of endodontic retreatment: a 2-yr follow-up. *J Endod.* janv 2004;30(1):1-4.
17. Abusrewil SM, McLean W, Scott JA. The use of Bioceramics as root-end filling materials in periradicular surgery: A literature review. *Saudi Dent J.* oct 2018;30(4):273-82.
18. Brothier J, Soenen A. Évolution des guides chirurgicaux implantaires réalisés au cabinet dentaire [Internet]. *magazine dentaire.* 2017. <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/evolution-des-guides-chirurgicaux-implantaires-realises-au-cabinet-dentaire/>
19. Kim S, Kratchman S. Modern endodontic surgery concepts and practice: A review. *J Endod.* 2006;32(7):601-23.
20. Moussaly C. La CFAO au service de l'implantologie [Internet]. *Dentalespace* 2017. <https://www.dentalespace.com/praticien/formationcontinue/implantologie-assistee-ordinateur-cfao-service-implantologie/>
21. Younes F, Cosyn J, De Bruyckere T, Cleymaet R, Bouckaert E, Eghbali A. A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *J Clin Periodontol.* 2018;45(6):721-32.
22. Kühl S, Payer M, Zitzmann NU, Lambrecht JT, Filippi A. Technical accuracy of printed surgical templates for guided implant surgery with the coDiagnostiX™ Software: Printed template for guided implantation. *Clin Implant Dent Relat Res.* 2015;17:e177-82.
23. Geng W, Liu C, Su Y, Li J, Zhou Y. Accuracy of different types of computer-aided design/ computer-aided manufacturing surgical guides for dental implant placement. *Int J Clin Exp Med* 2015;8(6):8442-8449 .

24. Shen P, Zhao J, Fan L, Qiu H, Xu W, Wang Y, et al. Accuracy evaluation of computer-designed surgical guide template in oral implantology. *J Cranio-Maxillofac Surg.* 2015;43(10):2189-94.
25. Spitz A. CAD/CAM Technology for digital indirect bonding *J Clin Orthod* 2018;52(11) 621-628.
26. Son K-H, Park J-W, Lee D-K, Kim K-D, Baek S-H. New virtual orthodontic treatment system for indirect bonding using the stereolithographic technique. *Korean J Orthod.* 2011;41(2):138.
27. Gimenez CMM. Digital technologies and CAD/CAM systems applied to lingual orthodontics: The future is already a reality. *Dent Press J Orthod* 2011 ;16(2):22-7 .
28. Graf S, Vasudavan S, Wilmes B. CAD-CAM design and 3-dimensional printing of mini-implant retained orthodontic appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2018;154(6):877-82.
29. Möhlhenrich SC, Jäger F, Jäger A, Schumacher P, Wolf M, Fritz U, et al. Biomechanical properties of CAD/CAM-individualized nickel-titanium lingual retainers: an in vitro study. *J Orofac Orthop* 2018;79(5):309-19.
30. Xue C, Tian Y, Wang L, Yang X, Luo E, Bai D. Surgical guide and CAD/CAM prebent titanium plate for sagittal split ramus osteotomy in the correction of mandibular prognathism. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2018;56(7):586-93.
31. Kim J, Chun Y-S, Kim M. Accuracy of bracket positions with a CAD/CAM indirect bonding system in posterior teeth with different cusp heights. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 2018;153(2):298-307.
32. Bellaiche N. Scanner et cone beam maxillo-facial: principes, limites et indications respectives. *Implantology* 2009; (1) 33-55.
33. Shah P, Chong BS. 3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. *Clin Oral Investig.* 2018;22(2):641-54.
34. van der Meer WJ, Vissink A, Ng YL, Gulabivala K. 3D Computer aided treatment planning in endodontics. *J Dent.* 2016;45(2):67-72.
35. Zehnder MS, Connert T, Weiger R, Krastl G, Kühl S. Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location. *Int Endod J.* oct 2016;49(10):966-72.
36. Nayak A, Jain PK, Kankar P, Jain N. Computer-aided design-based guided endodontic: A novel approach for root canal access cavity preparation. *Proceedings of the*

Institution of Mechanical Engineers, Part H. *J Engineer Med.* 2018;232(8):787-95.

37. Patel S, Aldowaisan A, Dawood A. A novel method for soft tissue retraction during periapical surgery using 3D technology: a case report. *Int Endod.* 2017;50(8):813-22.

38. Giacomino CM, Ray JJ, Wealleans JA. Targeted endodontic microsurgery: A novel approach to anatomically challenging scenarios using 3-dimensional–printed guides and trephine burs—A Report of 3 Cases. *J Endod.* 2018;44(4):671-7.

39. Ye S, Zhao S, Wang W, Jiang Q, Yang X. A novel method for periapical microsurgery with the aid of 3D technology: a case report. *BMC Oral Health* . 2018(12) [Epub ahead of print]

40. Ahn S-Y, Kim N-H, Kim S, Karabucak B, Kim E. Computer-aided design/Computer-aided manufacturing–guided endodontic surgery: guided osteotomy and apex localization in a mandibular molar with a thick buccal bone plate. *J Endod.* 2018;44(4):665-70.

41. Pinsky HM, Champleboux G, Sarment DP. Periapical surgery using CAD/CAM guidance: preclinical results. *J Endod.* 2007;33(2):148-51.

42. Libersa JC, Francke JP, Boudin G, Goudaert M, Libersa C. Anatomical basis for the surgical approach to the dental roots. *Anatomia Clinica.* sept 1982;3(3):221-7.

43. Matys J, Fliieger R, Tenore G, Grzech-Leśniak K, Romeo U, Dominiak M. Er:YAG laser, piezosurgery, and surgical drill for bone decortication during orthodontic mini-implant insertion: primary stability analysis—an animal study. *Lasers Med Sci.* 2018;33(3):489-95.

**BUFFARD (Loïc).** - Évaluation ex vivo d'un guide chirurgical imprimé tridimensionnellement pour la chirurgie endodontique – 66 f. ; ill. ; tabl. ; 43 ref. ; 30 cm (Thèse : Chir. Dent. ; Nantes ; 2019)

**RESUME :**

Grâce aux progrès réalisés les trente dernières années (utilisation des aides optiques et des inserts ultrasonores), la microchirurgie endodontique est devenue une option thérapeutique fiable avec un pronostic élevé. Néanmoins, cet acte technique est délicat. Il nécessite des compétences à la fois en endodontie et en chirurgie.

Récemment, l'utilisation de guide chirurgicaux a été proposée afin de sécuriser et de simplifier la technique opératoire. Les principes de réalisations de ces guides dérivent des travaux réalisés en implantologie et en orthodontie grâce au flux numérique et à la Conception Fabrication Assistée par Ordinateur.

L'objectif de cette thèse était de réaliser une étude pilote, évaluant la précision de ce type de guide pour la microchirurgie endodontique. Nous avons choisi d'utiliser un modèle animal *ex-vivo* (modèle porcin) permettant de mimer les procédures chirurgicales humaines. Le guide de microchirurgie endodontique a été réalisé après planification, modélisation et impression tridimensionnelle. Afin de quantifier la précision de ce guide par rapport à la modélisation virtuelle, une tomographie à faisceau volumique a été réalisée après ostéotomie.

Les résultats ont été obtenus à partir de mesures réalisées sur des logiciels de traitement et d'analyse d'image. Le forage réalisé était situé plus mésial et apical que la planification. Les axes entre les deux étaient convergents dans le sens coronapical et parallèles dans le sens mésio distal. Les déviations mesurées variaient de 0.05mm à 0.29mm. La différence moyenne mesurée était de 0.195 mm. Dans cet essai, le contrôle de profondeur de forage était précis à 0,03mm près.

Cette étude a mis en évidence un certain nombre de biais et de limites, ce qui nous a permis de proposer un protocole modifié et optimisé afin de réaliser une étude sur un échantillon de plus grande ampleur. Ces travaux s'inscrivent dans une démarche d'évaluation des nouvelles technologies appliquées au cabinet dentaire.

**RUBRIQUE DE CLASSEMENT :** Odontologie - Endodontie

**MOTS CLES MESH :** Étude clinique – Clinical Study  
Endodontie - Endodontics  
Microchirurgie - Microsurgery  
Impression tridimensionnelle – Printing, three dimensional

**JURY :** Président : Professeur PEREZ F.  
Directeur : Docteur GAUDIN A.  
Assesseur : Docteur LANOISELEE E.  
Assesseur : Docteur BADRAN Z.

**ADRESSE DE L'AUTEUR :** 98 Boulevard des Belges 85000 LA ROCHE SUR YON  
buffard.loic@gmail.com