

**UNIVERSITÉ DE LILLE**

**FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE**

Année de soutenance : 2020

N°:

THÈSE POUR LE  
**DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 12 OCTOBRE 2020

Par Margot AUDINEAU

Née le 21 Mai 1997 à Douai, France

**Développement d'un simulateur  
pour l'apprentissage pratique pré-clinique  
du traitement des perforations iatrogènes**

**JURY**

Président : Monsieur le Professeur Thomas COLARD

Assesseurs : Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ

Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT

Monsieur le Docteur Pascal OLEKSIK

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directeur Général des Services de l'Université	:	P-M. ROBERT
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 UNIVERSITÉS :**

P. BEHIN	Prothèses
<b>T. COLARD</b>	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>
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
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> Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
<b>C. OLEJNIK</b>	Responsable du Département de <b>Biologie Orale</b>
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
<b>M. SAVIGNAT</b>	Responsable du Département des <b>Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux</b>
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
<b>J. VANDOMME</b>	Responsable du Département de <b>Prothèses</b>

### ***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.

**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

Assesseur à la Recherche

*Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant la présidence de mon jury de thèse.*

*Soyez assuré de ma sincère reconnaissance et veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect pour la qualité de votre enseignement.*

# **Monsieur le Docteur Alain GAMBIEZ**

**Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Dentisterie Restauratrice Endodontie*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Diplôme d'Études Approfondies Sciences de la Vie et de la Santé

*Dès mon entrée à la faculté de chirurgie dentaire, ce fut un réel plaisir de découvrir à vos côtés la spécialité de l'endodontie.*

*Je vous remercie et reste admirative devant votre passion à transmettre vos connaissances.*

# **Monsieur le Docteur Lieven ROBBERECHT**

**Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Dentisterie Restauratrice Endodontie*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assesseur Développement Durable

*Vous m'avez initiée à l'endodontie dès mes premières années au sein de la faculté et ce fut un plaisir d'apprendre à vos côtés, toujours avec humour et bonne humeur.*

*Merci pour vos précieux conseils, votre savoir et votre expérience qui guideront ma pratique future.*

*Je vous suis également extrêmement reconnaissante pour votre patience et votre bienveillance à mon égard concernant la réalisation de ce travail.*

# **Monsieur le Docteur Pascal OLEKSIAK**

**Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD**

*Section Réhabilitation Orale*

*Département Dentisterie Restauratrice Endodontie*

Docteur en Chirurgie Dentaire

*Vous avez accepté spontanément et avec enthousiasme de siéger au sein de mon jury. Pour votre disponibilité, veuillez trouver ici l'expression de mes sincères remerciements et de ma reconnaissance.*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Les perforations iatrogènes</b>	<b>12</b>
2.1	Étiopathogénie	12
2.1.1	Définition	12
2.1.2	Étiologies	13
2.1.2.1	Élaboration de la cavité d'accès	13
2.1.2.2	Préparation canalaire	15
2.1.2.3	Retraitement endodontique	18
2.1.2.4	Reconstitution corono-radicaire	18
2.2	Diagnostic	19
2.3	Prise en charge	20
2.3.1	Matériaux	20
2.3.2	Protocoles	23
2.3.2.1	Perforation latéro-radicaire du 1/3 coronaire au 1/3 moyen	25
2.3.2.2	Perforation radicaire apicale ou de la constriction apicale	28
		29
2.3.2.3	Perforation du plancher pulpaire	30
2.3.3	Pronostic	31
2.3.3.1	Temps	31
2.3.3.2	Taille	31
2.3.3.3	Localisation	31
2.4	Problématique et objectifs	33
<b>3</b>	<b>Conception, fabrication et mise en œuvre du modèle pédagogique</b>	<b>34</b>
3.1	Matériels et méthodes	35
3.1.1	Sélection et mise en forme des dents	35
3.1.2	Numérisation et modélisation	36
3.1.3	Perforation	38
3.1.4	Fabrication par technique additive en stéréolithographie	40
3.1.5	Utilisation des modèles pédagogiques	41
3.2	Résultats et discussion	42
<b>4</b>	<b>Conclusion</b>	<b>48</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>49</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>53</b>
	<b>Table des tableaux</b>	<b>56</b>

# 1 Introduction

Les perforations pulpo-desmodontales font partie des complications pouvant survenir lors d'un traitement endodontique, et peuvent aboutir à la perte de la dent concernée. Elles sont dites iatrogènes lorsqu'elles sont causées par une erreur de procédure et sont susceptibles de survenir à chaque étape du traitement endodontique. Grâce à l'évolution des techniques de gestion des perforations, à la standardisation des protocoles et à l'apparition de nouveaux matériaux, le pronostic des dents perforées s'est considérablement amélioré ces dernières années.

Même si de nombreuses revues de littérature permettent un abord théorique de la gestion des perforations, un apprentissage pratique pré-clinique demeure indispensable pour acquérir la gestuelle de base. La visualisation et la mise en application des protocoles sont facilitées par l'utilisation d'un modèle pédagogique reproduisant une situation clinique la plus fidèle possible. Des dents humaines extraites peuvent être employées mais des problèmes éthiques, de reproductibilité et de risque infectieux se posent. Afin de pallier ces limites, des simulateurs endodontiques ont été développés [1]. Ils présentent certains avantages comme leur caractère aseptique et la standardisation mais, actuellement, aucun simulateur pour comprendre et apprendre à traiter les perforations iatrogènes n'est présent sur le marché [2].

Ainsi, l'objectif principal de cette thèse consiste en la conception et la fabrication d'un modèle endodontique pédagogique pour faciliter l'apprentissage pratique pré-clinique de la gestion des perforations endodontiques iatrogènes.

L'objectif secondaire est de produire ces mêmes modèles surdimensionnés pour faciliter la visualisation et la compréhension des perforations dans les 3 plans de l'espace.

## 2 Les perforations iatrogènes

### 2.1 *Étiopathogénie*

#### 2.1.1 Définition

Une perforation est une communication endo-parodontale d'origine mécanique (iatrogène) ou pathologique (non iatrogène) entre le système canalaire et les tissus de soutien de la dent ou la cavité buccale [3,4].

La perforation peut être de nature pathologique, c'est-à-dire non iatrogène. Les causes non iatrogènes sont notamment les résorptions radiculaires et les lésions carieuses [5]. La résorption dentaire est définie comme étant « un état associé à un processus physiologique ou pathologique provoquant une perte de tissu dentaire, cémentaire ou osseux » [4]. Elle est donc un processus de destruction des tissus dentaires consécutif à une infection et/ou un traumatisme [6]. La lésion carieuse est définie, quant à elle, comme « une infection bactérienne localisée et progressive entraînant la destruction d'une dent ». Elle débute par la déminéralisation de l'émail, puis par la diffusion des bactéries vers les tubulis dentinaires, provoquant ensuite une inflammation pulpaire, pouvant aller jusqu'à une nécrose, voire une perforation [4].

La perforation peut également être mécanique, c'est-à-dire iatrogène, lorsqu'il s'agit d'une erreur de procédure de la part du chirurgien-dentiste au cours du traitement endodontique d'une dent [5,7]. Elle est liée à une sur-préparation de la dent par le praticien et peut survenir à différents niveaux [8] (fig. 1) :

- Au niveau coronaire : supra-crestal, coronairement à l'attache épithéliale (a)
- Au niveau de la furcation radiculaire, ou plancher pulpaire (c)
- Au niveau latéro-radiculaire :
  - Tiers coronaire (b)
  - Tiers moyen (d)
  - Tiers apical (e)
- Au niveau apical : perforation de la constriction (f)

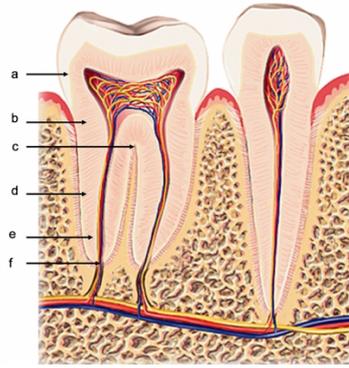


Figure 1 : Classification des perforations dentaires iatrogènes (source : UFSBD)

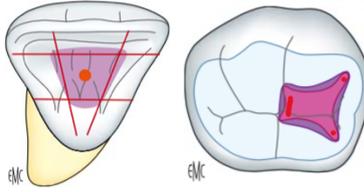
Leur survenue peut avoir des conséquences parodontales, comme une LIPOE (Lésion Inflammatoire Péri-radriculaire d'Origine Endodontique), une résorption osseuse, une déhiscence ou fenestration osseuse ou encore une récession gingivale [7].

## 2.1.2 Étiologies

Les perforations iatrogènes peuvent se produire à chaque étape du traitement endodontique [7,8].

### 2.1.2.1 Élaboration de la cavité d'accès

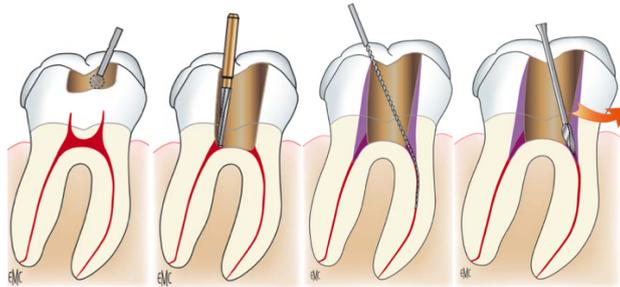
La cavité d'accès est la première étape de la thérapeutique endodontique. L'accès à l'endodonte s'effectue par la face palatine/linguale sur le groupe incisivo-canin et par la face occlusale de la dent sur le groupe prémolo-molaire. L'objectif est d'éliminer les interférences coronaires pour permettre un accès au tiers apical et à la première courbure. Pour y parvenir, il est nécessaire de retirer l'ensemble des tissus dentaires ou matériaux d'obturation situés entre la face d'accès de la dent et le plafond de la chambre pulpaire pour travailler sans obstacle tout en restant conservateur. Sa forme, sa position et sa taille sont en corrélation avec les espaces endodontiques sous-jacents (fig. 2). La ligne de contour de la cavité d'accès correspond à la projection du plafond de la chambre pulpaire sur la table occlusale [9].



*Figure 2 : Dessin de la cavité d'accès idéale selon le positionnement des cornes pulpaire sur incisive maxillaire et 1<sup>ère</sup> molaire mandibulaire [9]*

Ainsi, les quatre étapes de réalisation de la cavité d'accès sont (fig. 3) [9] :

- Élimination du plafond pulpaire.
- Élimination du contenu caméral.
- Recherche et relocalisation des entrées canalaire.
- Accès au 1/3 apical et à la première courbure.



*Figure 3 : Élimination du plafond pulpaire et du contenu caméral, élimination des triangles dentinaires à l'aide de limes manuelles ou de forets de Gates [9]*

Cependant, certains facteurs peuvent compliquer la réalisation de la cavité d'accès (tableau 1) [9]. Une méconnaissance de l'anatomie endodontique (fig. 4), une minéralisation intra-pulpaire (fig. 5), une malposition dentaire ou encore une mauvaise préparation de la cavité d'accès peuvent entraîner une erreur d'axe ou une fausse route et amener à une perforation.

Tableau 1 : Facteurs de risque de perforation liés à la réalisation de la cavité d'accès

Facteurs de risques	Conséquences
Méconnaissance de l'anatomie endodontique	Erreur d'axe ou sur-préparation mutilante
Minéralisation intra-pulpaire conduisant à une réduction du volume de la chambre pulpaire	Obstruction des entrées canalaire
Malposition dentaire	Erreur d'axe
Mauvaise préparation de la cavité d'accès	Persistance de contraintes coronaires (plafond pulpaire, triangles dentinaires)

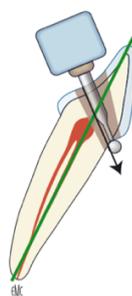


Figure 4 : Perforation coronaire vestibulaire d'une incisive due à une erreur d'axe [9]

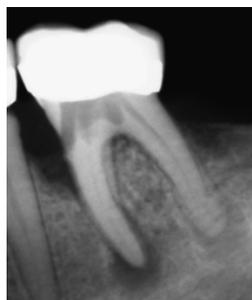


Figure 5 : Radiographie d'une perforation coronaire mésiale sur une molaire mandibulaire lors de la recherche des entrées canalaire [10]

### 2.1.2.2 Préparation canalaire

Suite à l'élaboration de la cavité d'accès, la préparation canalaire permet d'éliminer progressivement le contenu intra-canal jusqu'au foramen apical. Les aides visuelles et radiographiques sont recommandées afin d'éviter une sur-préparation des canaux ou une erreur d'axe. Elle repose sur l'action conjointe des instruments de préparation canalaire manuels et mécaniques (action mécanique) et des solutions d'irrigation (action chimique sur les tissus organiques par des désinfectants et des solvants) (fig. 6) [11].

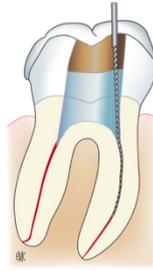


Figure 6 : Préparation canalaire : action mécanique et chimique [9]

Certains facteurs peuvent compliquer la préparation canalaire et augmenter le risque de fausse route, d'erreur d'axe ou de sur-préparation apicale, pouvant conduire à des perforations iatrogènes (tableau 2) [7,9]. Ces facteurs sont, par exemple, la présence de canaux minéralisés ou courbés (fig. 7), un défaut de courbure des instruments (fig. 8), une malposition de la dent à traiter ou encore l'absence d'utilisation de localisateur d'apex (fig. 9) ou d'aide visuelle.

Tableau 2 : Facteurs de risque de perforation liés à la préparation canalaire

Facteurs de risques	Conséquences
Présence de canaux minéralisés, avec utilisation conjointe de la rotation continue, sans aide radiographique	Fausse route
Présence de canaux fortement courbés, associée à une insuffisance d'ouverture de la cavité d'accès	Fausse route
Défaut de courbure des instruments	Fausse route
Préparation trop rectiligne du canal	Fausse route
Absence d'utilisation d'un localisateur d'apex lors de la détermination de la longueur de travail	Sur-préparation apicale
Malposition dentaire	Erreur d'axe
Absence d'utilisation d'aide visuelle	Erreur d'axe

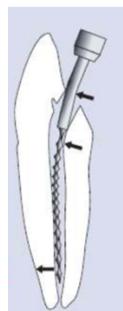
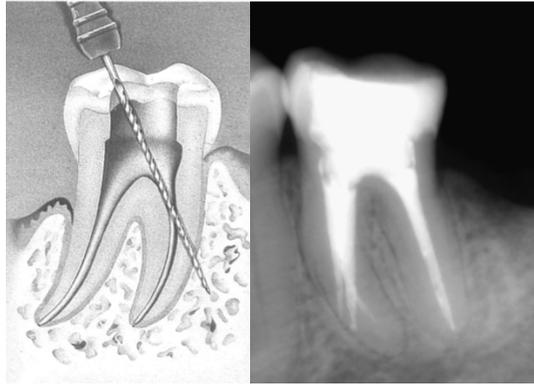


Figure 7 : Schéma illustrant l'insuffisance d'ouverture de la cavité d'accès sur une canine, entraînant des contraintes instrumentales coronaires, augmentant ainsi le risque de perforation apicale [12]

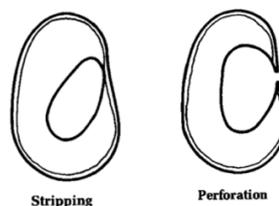


*Figure 8 : Schéma et radiographie d'une perforation latéro-radulaire au 1/3 moyen sur molaire mandibulaire causée par un défaut de courbure instrumentale [10,13]*



*Figure 9 : Radiographie d'une perforation de la constriction apicale d'une molaire mandibulaire causée par une sur-préparation, elle-même liée à l'absence d'utilisation de localisateur d'apex (le matériau d'obturation est à proximité du canal mandibulaire) [10]*

La perforation en stripping (fig. 10), ou perforation en bande [10] survient généralement lors de la préparation canalaire [14]. La technique d'appui pariétal minore le risque de stripping perforation par brossage privilégié du côté extérieur à la courbure.



*Figure 10 : Coupe axiale d'une racine présentant un stripping (à gauche), pouvant aboutir à une perforation (à droite) [15]*

### 2.1.2.3 Retraitement endodontique

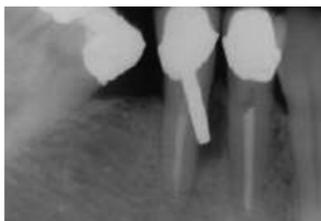
Lors de la recherche des entrées canalaire, de la dépose du matériau de reconstitution coronaire ou de la dépose de la gutta en force, des fausses routes peuvent survenir et aboutir à des perforations avec l'utilisation des instruments fonctionnant en rotation continue. Les facteurs de risques sont similaires à ceux énoncés pour l'élaboration de la cavité d'accès et la préparation canalaire [16].

### 2.1.2.4 Reconstitution corono-radulaire

Lors de la préparation du logement d'un tenon radulaire, plusieurs facteurs de risque tels qu'une erreur dans le choix de la racine à préparer, l'utilisation d'instruments surdimensionnés ou encore une erreur d'appréciation de l'axe radulaire peuvent aboutir à une perforation (par stripping, sur-préparation canalaire ou erreur d'axe (fig. 11) (tableau 3) [16] :

*Tableau 3 : Facteurs de risque de perforation liés à la préparation du logement d'un tenon radulaire*

<b>Facteurs de risque de perforation lors de la préparation du logement du tenon</b>	<b>Conséquences</b>
Mauvais choix de la racine à préparer par absence de connaissance anatomique (Privilégier la préparation de la racine palatine des prémolomolaires maxillaires et la racine distale des molaires mandibulaires)	Perforation après « stripping »
Utilisation d'un foret de diamètre et longueur surdimensionnés	Sur-préparation canalaire
Erreur d'appréciation de l'axe radulaire lors de l'aménagement du logement radulaire, liée à la non-utilisation d'aide radiographique	Erreur d'axe



*Figure 11 : Radiographie d'une perforation liée à une erreur d'axe de forage sur une prémolaire mandibulaire [5]*

## 2.2 Diagnostic

Afin de déterminer précisément la nature de la perforation (taille, localisation) et de la traiter précocement, il est essentiel de reconnaître les signes cliniques et/ou radiographiques suivants [7,8,10,17] :

- Un saignement soudain, l'apparition de sang sur les pointes de papier.
- Une instrumentation douloureuse soudaine des canaux radiculaires.
- Un axe dévié du canal perforant les parois dentaires (visible radiologiquement et/ou cliniquement).

Des outils d'aide permettent d'affirmer le diagnostic de perforation (tableau 4) [5,7,8,10,17].

*Tableau 4 : Outils d'aide au diagnostic des perforations et leur interprétation*

<b>Outils d'aide au diagnostic</b>	<b>Diagnostic positif</b>
Pointe de papier	Présence de sang sur la pointe de papier. Le passage successif de plusieurs pointes de papier ne suffit pas à obtenir l'hémostase. Cet indicateur est à moduler vis-à-vis de diagnostics différentiels comme la persistance de parenchyme pulpaire au sein du canal ou l'absence d'assèchement canalaire conventionnel
Radiographie rétro-alvéolaire (plan parallèle, incidence décalée)	Les instruments radio-opaques introduits dans le canal permettent de mettre en évidence la perforation
Localisateur d'apex électronique	Dépassement détecté par une lime de diagnostic engagée dans la perforation.
Aides optiques (loupes, microscope opératoire)	Visualisation précise des perforations
Sondage parodontal	Sondage positif en cas de perforation ancienne
Imagerie tridimensionnelle acquise par tomodensitométrie (Cone Beam)	Elle permet de confirmer la présence d'une perforation radiculaire suspectée mais également de déterminer avec précision son étendue, son origine et la situation exacte du point de communication endo-parodontale.

## **2.3 Prise en charge**

Dès 1903, Peeso déclare que le pronostic des perforations radiculaires dépend de la rapidité de diagnostic du défaut, du choix de traitement, des matériaux utilisés, de la réponse de l'hôte et de l'expérience du praticien [8]. Avant de débiter le traitement d'une perforation radiculaire, il est nécessaire et raisonnable de s'assurer du potentiel de conservation de la dent. Son traitement ou retraitement endodontique doit être possible, le support parodontal doit être suffisant et la dent doit pouvoir être restaurée [8]. Lorsque la perforation survient, le patient doit en être informé. Le praticien se doit de proposer les solutions thérapeutiques envisageables, même si l'avulsion s'avère être la seule solution. Il doit informer le patient des bénéfices et risques liés à une intervention ou une abstention thérapeutique. Le traitement d'une perforation consiste en son obturation et le choix du matériau dépend de la possibilité d'étanchéité, du positionnement de la communication endo-parodontale et de son étendue (gutta-percha, résine composite, ciment verre ionomère, silicate de calcium).

### **2.3.1 Matériaux**

Après la décontamination canalaire à l'aide d'hypochlorite de sodium concentré à 2,5% et d'EDTA liquide concentré à 17%, il est impératif d'obturer la communication endo-parodontale afin d'étanchéfier et d'empêcher le passage de bactéries entre le système canalaire et le milieu péri-radiculaire. Le cahier des charges du matériau d'obturation idéal des perforations est le suivant [8,10,18,19] :

- bactériostatique,
- bioactif (cicatrisation osseuse, desmodontale et tissulaire),
- biocompatible,
- herméticité,
- non dyschromiant,
- facilement manipulable,
- insoluble dans les fluides biologiques,
- non-résorbable,
- radio-opaque,
- temps de prise court.

Historiquement, différents matériaux utilisés en chirurgie dentaire (amalgame, plâtre de Paris, gutta-percha, feuille d'indium, ciment verre ionomère, eugénate renforcé) ont été proposés pour la réparation des perforations. Mais ces matériaux étaient susceptibles de provoquer des défauts parodontaux résiduels lors de la cicatrisation [20–22]. L'introduction de matériaux bioactifs à base de silicate de calcium a considérablement amélioré le taux de réussite de telles réparations [3,23].

On distingue à l'heure actuelle 4 matériaux différents pour obturer les perforations : la gutta-percha, la résine composite, le ciment verre ionomère et le silicate de calcium (principalement le Mineral Trioxide Aggregate (MTA) et la Biodentine™). Pour chacun de ces matériaux, nous allons étudier leurs propriétés en comparaison du cahier des charges attendu (tableau 5) [24–26,26–30]. L'introduction des ciments silicates de calcium a été considérée comme une percée majeure dans l'histoire de la chirurgie dentaire avec l'apparition du MTA dans les années 1990. Cependant, il existe plusieurs limites liées à l'utilisation de ce matériau : manipulation difficile, temps de prise lent et coût élevé. En 2010, l'apparition de la Biodentine™ a permis de palier certaines de ces limites en offrant une manipulation plus facile, en réduisant le coût et le temps de prise par rapport au MTA. Les deux matériaux offrent des propriétés biologiques similaires mais la Biodentine™ présente une résistance à la compression supérieure à celle du MTA (320 MPa versus 67 MPa), ce qui permet de l'utiliser comme substitut dentinaire [30,31].

Tableau 5 : Synthèse des propriétés des matériaux disponibles pour l'obturation des perforations [24–26,26–30]

<b>Matériaux</b> <b>Cahier des charges</b>	<b>Gutta-percha + Ciment Oxyde de Zinc Eugénol</b>	<b>Résine composite</b>	<b>Ciment verre ionomère</b>	<b>MTA</b>	<b>Biodentine™</b>
<b>Bactériostatique</b>	++	-	+	+	++
<b>Bioactivité</b>	-	-	=	+++ (Inducteur tissulaire)	+++ (Inducteur tissulaire)
<b>Biocompatibilité</b>	+	+	++	+++	+++
<b>Étanchéité</b>	++	++	++	+++	+++
<b>Manipulation</b>	+	+	++	-	+
<b>Insolubilité</b>	+	+	+	+	+
<b>Non-Résorbabilité</b>	+	+	+	+	+
<b>Radio-opacité</b>	+++	++	++	+++	+
<b>Temps de début de prise</b>	-	+++	+	- / + (selon la formulation)	+
<b>Propriétés mécaniques</b>	--	+++	++	-	++

En cas de défauts osseux importants, lorsque le matériau de réparation ne peut pas être soutenu, l'emploi d'une matrice résorbable peut être envisagée [10]. Les objectifs d'une telle matrice sont de contenir le matériau, empêcher son extrusion vers l'espace parodontal, éviter une inflammation supplémentaire et un retard de cicatrisation. Elle doit être stérile, facilement manipulable et biocompatible [8,17]. Les matériaux utilisés sont le collagène, le FDDB (allogreffe osseuse déminéralisée lyophilisée) ou encore l'hydroxyapatite.

Une étude de A. Al-Daafasa a cependant démontré que l'utilisation d'une matrice interne sous un MTA a certes empêché l'extrusion du matériau dans la zone perforée mais a également provoqué une réaction inflammatoire défavorable. De plus, son emploi n'a pas aidé à la régénération osseuse ni empêché la migration de l'épithélium dans la zone présentant le défaut. Par conséquent, le recours à cette technique ne doit pas être systématique car elle semble retarder la cicatrisation parodontale [32,33].

### **2.3.2 Protocoles**

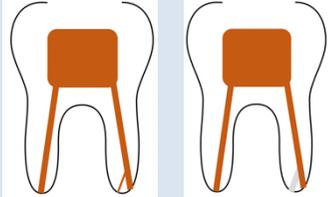
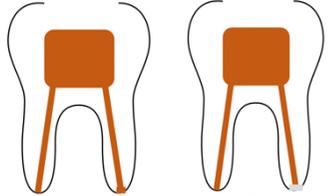
L'évolution des matériaux et des aides visuelles permet aujourd'hui de privilégier la méthode non-chirurgicale orthograde dans la gestion des perforations. Pour chaque type de perforation, plusieurs méthodes sont envisageables (tableau 6). En cas d'échec de ces techniques, il convient d'évaluer le potentiel de conservation de la dent [5,8,13,17,30,34,35].

Quelques indications de technique chirurgicale rétrograde persistent néanmoins si la dent présente une valeur stratégique (dent support de bridge ou encore de crochet pour prothèse amovible) et qu'il apparaît donc nécessaire de tenter sa conservation [5,8,10] :

- Perforation large, difficulté d'accès et d'étanchéification.
- Échec de cicatrisation après une technique non-chirurgicale.
- Obstacle coronaire de grande étendue dont la dépose présente un risque (ancrage radiculaire volumineux, bridge de grande étendue).
- Prise en charge du parodonte concomitante nécessaire.

Tableau 6 : Prise en charge à adopter face chaque type de perforation

Illustrations personnelles

Type de perforation	Méthode	Matériaux	Illustration
Coronaire : <ul style="list-style-type: none"> <li>Supra-gingivale</li> <li>Supra-crestale/Infra-gingivale</li> <li>Infra-crestale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Restauration adhésive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Composite/CVIMAR/CVI/SiCa</li> <li>CVI/SiCa</li> <li>SiCa</li> </ul>	
Latéro-radulaire 1/3 coronaire/moyen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obturation de la perforation + Traitement endodontique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SiCa</li> </ul>	
Latéro-radulaire 1/3 moyen/apical	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Perforation de petite taille</u> : Obturation de la perforation comme canal supplémentaire pendant le traitement endodontique (considérée comme variation anatomique)</li> <li><u>Perforation large</u> : Obturation de la perforation + Traitement endodontique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gutta-Percha</li> <li>SiCa</li> </ul>	
De la constriction apicale	<ul style="list-style-type: none"> <li><u>Perforation de petite taille</u> : Obturation de la perforation comme canal supplémentaire pendant le traitement endodontique (considérée comme variation anatomique)</li> <li><u>Perforation large</u> : Obturation de la perforation + Traitement endodontique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gutta-Percha</li> <li>SiCa</li> </ul>	
Du plancher pulpaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obturation de la perforation + Traitement endodontique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SiCa</li> </ul>	
Radulaire large	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obturation de la perforation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SiCa</li> </ul>	

Légende :  Pulpe  Composite, Ciment Verre Ionomère (CVI), Modifié par Adjonction de Résine (CVIMAR)  
 Gutta-Percha  SiCa

**Idéalement, le traitement endodontique suivi de l'obturation de la perforation sont effectués au cours de la même séance. Ceci est rendu possible uniquement si les conditions d'assèchement de la perforation et du canal sont réunies. Si l'assèchement du système canalaire est compromis par la perforation, il conviendra d'obturer la perforation dans un premier temps puis d'obturer le système canalaire lors d'une séance ultérieure [1,6,11,12,18,32,36].**

Nous allons maintenant détailler ci-dessous les différents protocoles de traitement d'une perforation selon sa localisation. Le matériau d'obturation de la perforation choisi est la Biodentine™ (Silicate de calcium) car il représente à l'heure actuelle une excellente solution thérapeutique vis-à-vis des autres matériaux proposés. De plus, il est utilisé en travaux pratiques à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Lille et dans le service d'odontologie au CHU de Lille.

### ***2.3.2.1 Perforation latéro-radicaire du 1/3 coronaire au 1/3 moyen***

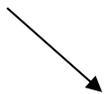
Le protocole de traitement des perforations latéro-radicales allant du 1/3 coronaire au 1/3 moyen est le suivant (fig. 12, protocole 1). Ce protocole n'est réalisable qu'en cas de perforation accessible.

- Mettre en place le champ opératoire.
- Réaliser la préparation chémo-mécanique du canal radiculaire à l'aide d'instruments endodontiques et d'une solution d'hypochlorite de sodium utilisés en alternance.
- Rincer à l'aide d'EDTA liquide 17% et effectuer un rinçage final à l'hypochlorite de sodium activé.
- Sécher le canal à l'aide de pointes de papier stériles.
- Obturer le système canalaire à la gutta-percha en technique à chaud, sous la perforation dans le canal concerné.
- Rincer la perforation à l'aide d'une solution d'hypochlorite de sodium activé par des instruments endodontiques. Sécher la perforation à l'aide de pointes de papier stériles.



#### Si aucun ancrage ne doit être posé

- Préparer la Biodentine® comme indiqué ci-dessous (protocole 2).
- Mettre en place la Biodentine® dans la perforation à l'aide d'un instrument adapté (type MTA Gun© ou porte-amalgame). Fouler la Biodentine® à l'aide d'un fouloir de Machtou au diamètre adapté jusqu'au remplissage complet du canal.
- Éliminer les excès, attendre le début de prise.



- Effectuer une radiographie de contrôle de l'obturation.
- Mettre en place une restauration provisoire pour contrôler la cicatrisation.

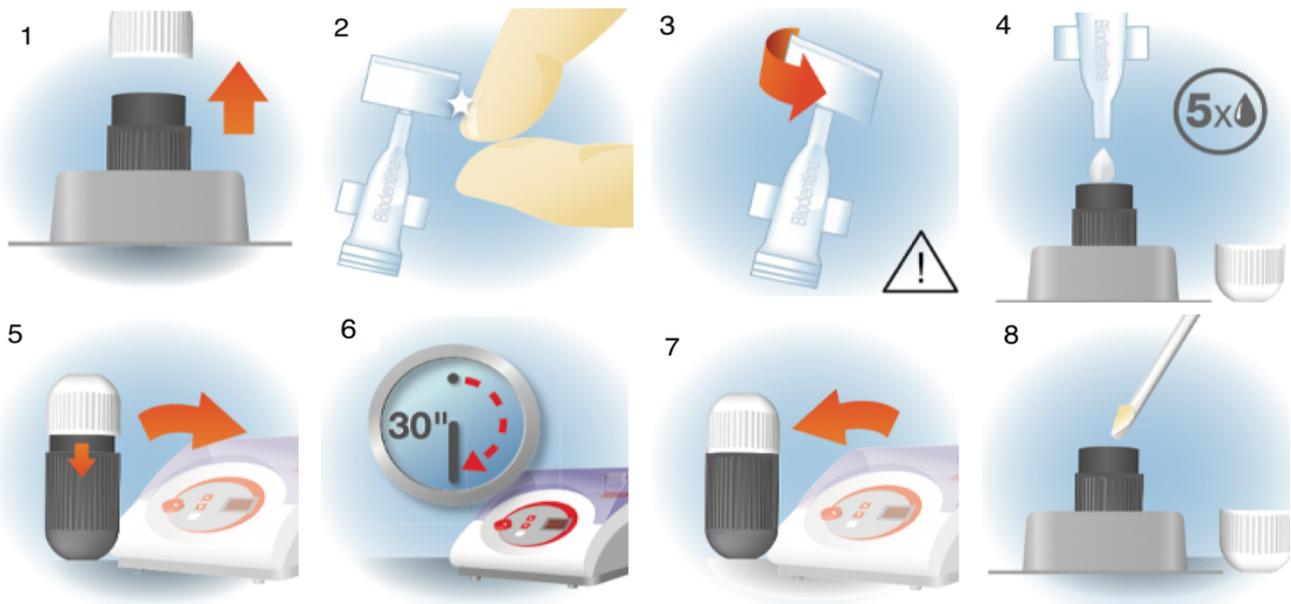


#### Si un ancrage doit être posé

- Protéger le canal principal à l'aide d'un cône de gutta-percha.
- Préparer la Biodentine® comme indiqué ci-dessous (fig. 13, protocole 2).
- Mettre en place la Biodentine® dans la perforation à l'aide d'un instrument adapté (type MTA Gun© ou porte-amalgame). Fouler la Biodentine® à l'aide d'un fouloir de Machtou au diamètre adapté.
- Attendre 12 minutes.
- Éliminer le cône.



Figure 12 : Traitement non-chirurgical des perforations latéro-radicales du 1/3 coronaire au 1/3 moyen (protocole 1)



*La Biodentine™ est conditionnée sous forme de capsules prédosées à triturer :*

1. *Ouvrir la capsule.*
2. *Détacher une mono dose de liquide et tapoter légèrement au niveau du bouchon scellé afin de faire descendre la totalité du liquide au fond de la mono dose.*
3. *L'ouvrir en tournant le bouchon scellé.*
4. *Verser entièrement le contenu de la mono dose (5 gouttes) dans la capsule.*
5. *Refermer la capsule.*
6. *La placer sur le vibreur pendant 30 secondes.*
7. *Ouvrir la capsule.*
8. *Récupérer le matériau Biodentine™ à l'aide d'un instrument adapté.*
9. *Placer la Biodentine™ sur le site de la perforation puis fouler. Une fois la perforation obturée, on peut reconstituer la dent avec la Biodentine® en matériau de reconstitution coronaire.*

*Figure 13 : Protocole de mise en œuvre de la Biodentine™, Biodentine Scientific File Septodont, courtoisie de la société Septodont (protocole 2)*

### **2.3.2.2 Perforation radiculaire apicale ou de la constriction apicale**

En cas de perforation latéro-radiculaire apicale ou de la constriction apicale, le traitement est similaire et la perforation est obturée comme une variation anatomique du système canalaire. Le choix du matériau et de la technique dépend du diamètre du canal : si le canal est large, on préférera un silicate de calcium. A l'inverse, on utilisera de la gutta-percha en cas de canal fin ou difficile d'accès. Le traitement consiste à créer un nouveau cône d'arrêt afin de garantir l'ajustage du maître cône et ainsi l'herméticité apicale [36] (fig. 14, protocole 3).

- Mettre en place le champ opératoire.
- Réaliser la préparation chémo-mécanique du canal radiculaire à l'aide d'instruments endodontiques et d'une solution d'hypochlorite de sodium utilisés en alternance.
- Recréer un cône d'arrêt.
- Rincer à l'aide d'EDTA liquide 17% et effectuer un rinçage final à l'hypochlorite de sodium activé.
- Sécher le canal et la perforation à l'aide de pointes de papier stériles.

Si le canal est de faible diamètre (< 25/100<sup>e</sup>)

- Obturer le système canalaire et la perforation à la gutta-percha en technique à chaud. La perforation est considérée comme une variation anatomique du canal.

Si le canal est de gros diamètre (> 25/100<sup>e</sup>)

- Préparer la Biodentine® comme indiqué ci-dessus (protocole 2).
- Mettre en place la Biodentine® dans la perforation à l'aide d'un instrument adapté (porte-amalgame, fouloir). Fouler la Biodentine® à l'aide d'un fouloir au diamètre adapté.
- Effectuer une radiographie de contrôle de l'obturation.
- Attendre 12 minutes.
- Réaliser la restauration coronoradiculaire/coronaire.

- Effectuer une radiographie de contrôle de l'obturation.
- Mettre en place une restauration provisoire pour contrôler la cicatrisation.

Figure 14 : Traitement non-chirurgical des perforations latéro-radicales apicales ou de la constriction apicale (protocole 3)

### **2.3.2.3 Perforation du plancher pulpaire**

Pour terminer, nous allons développer le protocole de traitement des perforations du plancher pulpaire (fig. 15, protocole 4) [30,37,38].

- Mettre en place le champ opératoire.
- Réaliser la préparation du système canalaire jusqu'aux 2/3 de la longueur à l'aide d'instruments endodontiques et d'une solution d'hypochlorite de sodium utilisés en alternance.
- Nettoyer la perforation au sérum physiologique puis réaliser l'hémostase.
- Rincer à l'aide d'EDTA liquide 17% et effectuer un rinçage final à l'hypochlorite de sodium activé.
- Sécher le canal et la perforation à l'aide de pointes de papier stériles.
- Protéger la lumière canalaire à l'aide de cônes de gutta-percha.
- Préparer la Biodentine® comme indiqué ci-dessus (protocole 2).
- Mettre en place la Biodentine® dans la perforation à l'aide d'un instrument adapté (type porte-amalgame). Fouler la Biodentine® à l'aide d'un fouloir au diamètre adapté, préférentiellement un petit fouloir à amalgame.
- Retirer les excès, attendre le début de prise.
- Retirer les cônes des canaux.
- Mettre en place un matériau type hydroxyde de calcium dans les canaux recouvert d'un matériau temporaire de type sulfate de calcium (exemple : cavit©).
- Effectuer une radiographie de contrôle de l'obturation de la perforation après dépose du champ opératoire.
- Lors d'une séance ultérieure, obturer le système canalaire à la gutta-percha en technique à chaud.
- Effectuer une radiographie de contrôle de l'obturation.
- Mettre en place une restauration provisoire pour contrôler la cicatrisation.

*Figure 15 : Traitement non-chirurgical des perforations du plancher pulpaire (protocole 4)*

### **2.3.3 Pronostic**

Les chances de succès lors du traitement d'une perforation radiculaire dépendent de la possibilité de réparer la perforation de manière à prévenir ou éliminer l'infection bactérienne sur le site. Un certain nombre de facteurs, notamment le temps écoulé entre la perforation et la détection, la taille et la forme de la perforation, ainsi que son emplacement, ont une incidence sur le potentiel de contrôle de l'infection du site perforé [8].

#### **2.3.3.1 Temps**

De nombreuses études [35,39] ont montré que moment le plus opportun pour réparer les perforations radiculaires est immédiatement après l'occurrence, afin d'éviter toute contamination [8,34]. Un traitement correct de la perforation peut ne pas toujours être possible en raison du manque de temps, de la faible expérience de l'opérateur ou du déficit d'équipements adaptés (aides visuelles ou encore matériaux). La perforation doit alors être obturée par un matériau temporaire adéquat et étanche jusqu'à réintervention. Le recours à un spécialiste peut être envisagé lorsque la perforation est inaccessible [8,34].

#### **2.3.3.2 Taille**

Les petites perforations sont plus faciles à réparer et offrent donc un potentiel de guérison prévisible avec un meilleur taux de succès [8]. Par ailleurs, les perforations larges peuvent entraîner un problème de fermeture incomplète du défaut, et donc une infection continue de la zone de perforation [8].

#### **2.3.3.3 Localisation**

La localisation de la perforation implique son emplacement mais aussi l'accès au site, sa visibilité et les structures anatomiques adjacentes (éléments nerveux, sinus) [5]. Les perforations coronaires à l'os crestal sont faciles d'accès et aisées à obturer : les dents peuvent donc être restaurées avec ou sans implication parodontale selon la situation gingivale. Lorsqu'une perforation se produit apicalement à l'os crestal ou au contact de l'attache épithéliale, elle est considérée comme ayant un bon pronostic si un traitement endodontique adéquat est effectué immédiatement et que le canal principal est accessible. Cependant, elle peut entraîner une contamination bactérienne de l'environnement le long du sillon gingival et, par la suite, une migration apicale de

l'épithélium vers le site de perforation si elle n'est pas traitée rapidement. Une poche parodontale se crée alors et une inflammation peut persister, réduisant le taux de succès du traitement [8]. Les perforations des furcations radiculaires (fig. 16), considérées comme critiques autrefois de par l'atteinte portée à l'attache parodontale [8], présentent désormais un pronostic correct, notamment grâce à l'utilisation de silicates de calcium [40].



*Figure 16 : Molaire mandibulaire présentant une perforation du plancher (A,B) Radiographie post-opératoire après obturation de la perforation de la furcation avec un silicate de calcium (C). Radiographie de suivi à 6 mois, on visualise une cicatrisation de l'os inter-radriculaire (D) [40]*

## **2.4 Problématique et objectifs**

Les perforations pulpo-desmodontales font partie des complications pouvant survenir lors d'un traitement endodontique. Selon les directives de la Société Européenne d'Endodontologie (ESE), il apparaît indispensable que les étudiants soient formés pour effectuer des traitements canalaires de bonne qualité [41,42]. Une formation à la gestion des perforations semble essentielle. De nombreuses revues de littératures permettent d'appréhender théoriquement la gestion des perforations. Cependant, la visualisation et la mise en application de protocoles afin d'acquérir des compétences manuelles essentielles à la pratique clinique sont facilitées par l'utilisation d'un modèle pédagogique lors de la formation pratique pré-clinique.

Les dents humaines extraites sont utilisées depuis de nombreuses années pour enseigner les procédures endodontiques [43]. Néanmoins, les inconvénients des dents naturelles, par exemple le risque de contaminations croisées, la difficulté à les obtenir, la standardisation ou encore les facteurs éthiques, ont conduit au développement de simulateurs alternatifs pour l'enseignement des procédures endodontiques [41].

À ce jour, divers modèles ont été conçus pour aider les étudiants à développer leurs compétences en endodontie [2], mais aucun modèle en trois dimensions pour comprendre et apprendre à traiter les perforations dentaires iatrogènes n'a encore été mis au point.

Ainsi, l'objectif principal de cette thèse est de concevoir et de fabriquer un modèle endodontique pédagogique présentant une perforation afin de faciliter l'apprentissage pratique pré-clinique de la gestion des perforations endodontiques iatrogènes.

L'objectif secondaire est de produire des modèles surdimensionnés qui facilitent la visualisation et la compréhension des perforations dans les 3 plans de l'espace.

### **3 Conception, fabrication et mise en œuvre du modèle pédagogique**

Pour répondre aux objectifs de cette thèse, deux simulateurs endodontiques présentant une perforation iatrogène ont été conçus à partir de dents naturelles grâce à une méthode de conception et fabrication assistée par ordinateur.

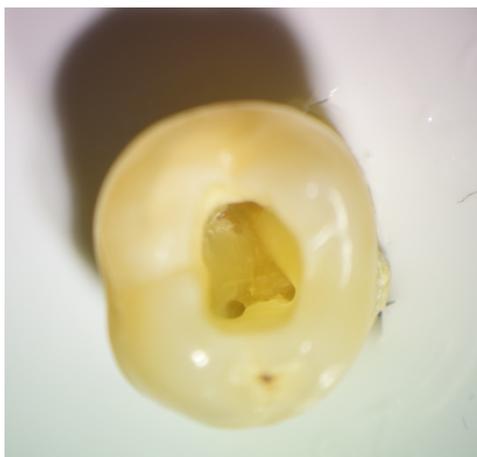
Dans ce travail, le terme « modèle virtuel » désigne la dent numérisée et modélisée et le terme « modèle pédagogique » désigne la dent imprimée en trois dimensions.

### 3.1 Matériels et méthodes

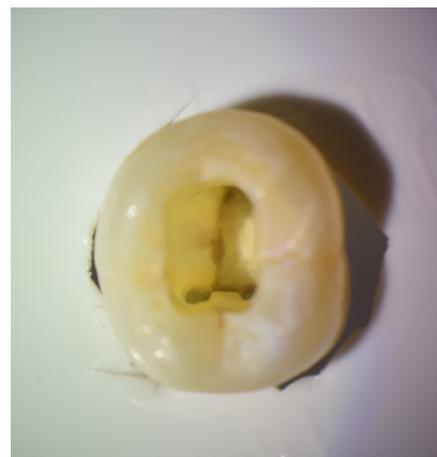
#### 3.1.1 Sélection et mise en forme des dents

Deux molaires mandibulaires ont été sélectionnées parmi un groupe de dents humaines extraites pour servir de modèle initial représentant deux types de perforation : latéro-radulaire au tiers coronaire et au niveau du plancher. Les dents ont ensuite été stockées dans du sérum physiologique maintenu à température ambiante. Les dents étaient matures, saines, exemptes de lésion carieuse, de restauration, de signe d'usure ou de résorption et présentaient un volume pulpaire large.

Une cavité d'accès type a été aménagée sur chaque dent à l'aide d'une fraise boule diamantée montée sur turbine et les entrées canalaires ont été relocalisées à l'aide d'un foret de Gates (Dentsply) monté sur contre-angle bague bleue afin d'éliminer les triangles de dentine (fig. 17). Le glide path a été réalisé de l'entrée canalaire jusqu'au foramen apical et la perméabilité canalaire a ensuite été contrôlée à l'aide d'une lime K 10. Une irrigation abondante à l'hypochlorite de sodium à 2,5% a été réalisée entre chaque passage instrumental afin d'éliminer les débris pulpaire et dentinaires. En effet, ceux-ci sont susceptibles d'interférer avec la perméabilité canalaire du modèle pédagogique lorsque celui-ci sera fabriqué.



*Photographie en vue occlusale  
de la cavité d'accès de la dent n°1*



*Photographie en vue occlusale  
de la cavité d'accès de la dent n°2*

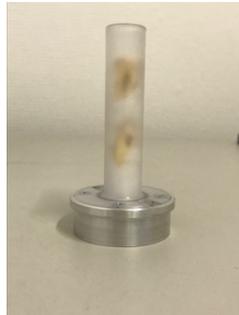
*Figure 17 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires avant perforation*

### 3.1.2 Numérisation et modélisation

Les dents naturelles ont ensuite fait l'objet d'un premier scan selon les paramètres suivants.

#### *Acquisition*

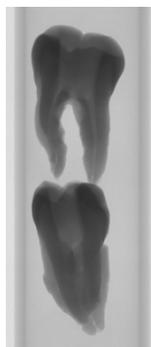
Les deux dents ont été positionnées sur un même porte-échantillon afin de réduire la durée d'acquisition (fig. 18). Elles ont ensuite été scannées à l'aide d'un microtomographe (SkyScan 1172 ; Bruker) à 100 kV, 100  $\mu$ A, avec une résolution isotropique de 20  $\mu$ m, selon 180° autour de l'axe vertical, un pas de rotation de 0,6° et un filtre aluminium + cuivre.



*Figure 18 : Photographie du porte échantillon contenant les 2 dents naturelles, permettant l'acquisition dans le micro-tomographe*

#### *Reconstruction*

Les images de chaque dent ont été reconstruites à l'aide du logiciel NRecon V1.7 (ring artifact correction : 2, beam hardening correction : 40%, and smoothing : 2) (fig. 19). Les images ainsi obtenues sont codées au format .TIF 8bits selon 256 niveaux de gris.



*Figure 19 : Dents en position de scan, avant reconstruction*

### Modélisation 3D

Après reconstruction, les dents ont été individualisées de manière similaire via le logiciel CTAn v1.17.7.2 en redéfinissant la région d'intérêt (aussi nommée ROI pour « region of interest »). Cette ROI englobe la totalité radio-opaque de la dent (correspondant aux tissus durs) ainsi que le contenu radio-clair présent au sein de la radio-opacité (correspondant au système canalaire) (fig. 20). Les données ont par la suite été importées vers le logiciel Avizo 2019.4. L'option *Edit New Label Field* a permis de segmenter la dent avec un seuil allant de 45 à 255 nuances de gris, puis les surfaces ont été générées. Les racines des dents modélisées ont dû être retravaillées pour effacer certaines imperfections et rendre le modèle plus uniforme (fig. 21). Une réduction du nombre de surfaces a dû être entreprise afin d'alléger le poids des fichiers (réduction de 4 millions à 500 000 surfaces). Pour finir, les données ont été exportées au format .STL (fig. 22).

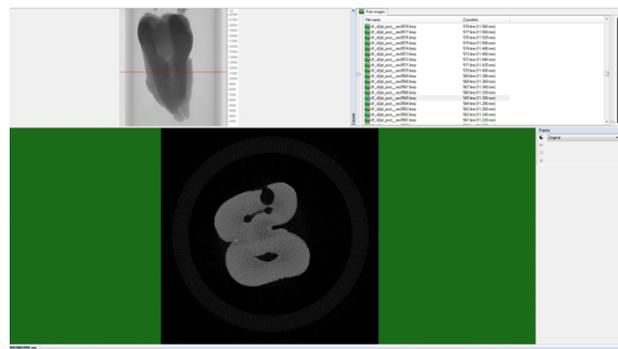


Figure 20 : Sélection de la région d'intérêt sur CTAn

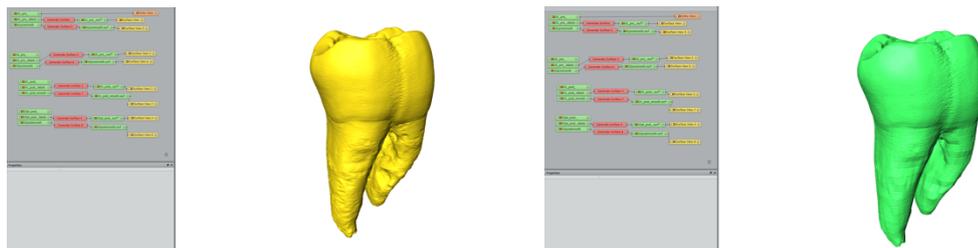
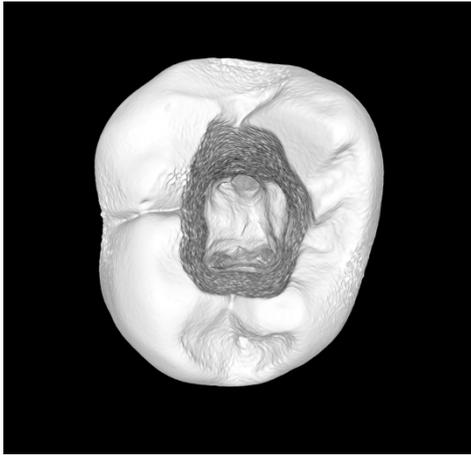


Figure 21 : Modèle virtuel segmenté et modélisé au format .STL sur Avizo avant lissage (Jaune) et après lissage (Vert) de l'état de surface



*Modélisation 3D en vue occlusale  
de la cavité d'accès de la dent n°1*

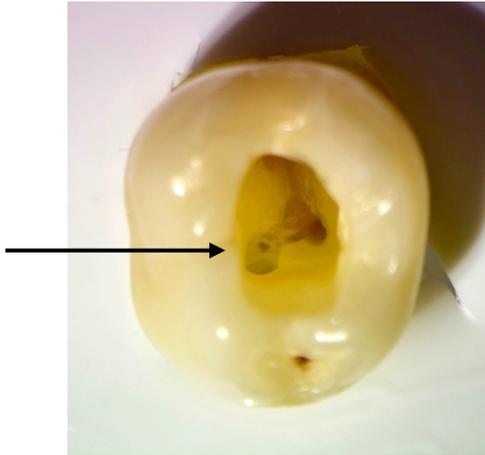


*Modélisation 3D en vue occlusale  
de la cavité d'accès de la dent n°2*

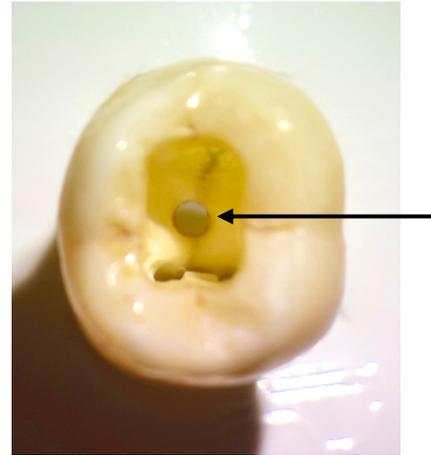
*Figure 22 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires avant perforation au format .STL*

### **3.1.3 Perforation**

Chaque dent naturelle a ensuite fait l'objet d'une perforation iatrogène intentionnelle réalisée à l'aide d'une fraise boule long col carbure de tungstène montée sur contre-angle bague bleue : l'une latéro-radicaire au  $\frac{1}{3}$  coronaire et l'autre au niveau du plancher pulpaire (fig. 23). Ces dents ont ensuite fait l'objet d'un second scan par micro-tomographie et d'une modélisation selon les mêmes paramètres que ceux énoncés précédemment (cf 3.1.2) (fig. 24).



*Photographie en vue occlusale de la perforation latéro-radicaire du canal MV de la dent n°1*

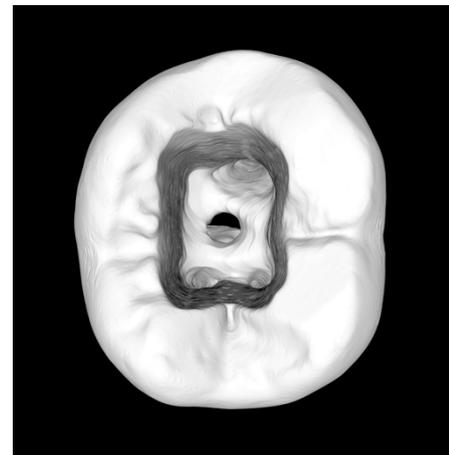


*Photographie en vue occlusale de la perforation au plancher de la dent n°2*

*Figure 23 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires après perforation*



*Modélisation 3D en vue occlusale de la perforation latéro-radicaire du canal MV de la dent n°1*



*Modélisation 3D en vue occlusale de la perforation au plancher de la dent n°2*

*Figure 24 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires après perforation au format .STL*

### 3.1.4 Fabrication par technique additive en stéréolithographie

Les modèles virtuels des dents perforées et non perforées au format .STL ont ensuite été chargés dans le logiciel Preform (FormLabs) pour l'étape de fabrication par stéréolithographie : Résine Dental Model, épaisseur de couche 25  $\mu\text{m}$ , épaisseur des points de contact 0,4mm (fig. 25 et 26).

Pour chaque type de perforation, un modèle en taille réelle et un modèle surdimensionné ont été conçus (X3).

La fabrication des modèles pédagogiques a été réalisée par polymérisation de couches successives (3D Form2 ; FormLabs) (fig. 27).

Une fois l'impression achevée, les pièces ont été nettoyées dans un bain d'alcool isopropylique pendant 20 minutes (FormWash), puis séchées et post-polymérisées à 60°C pendant 60 minutes dans une chambre de post-traitement UV (FormCure). Elles ont ensuite été séparées de leurs tiges de soutien et de leur plateforme.



Figure 25 : Visualisation des modèles virtuels sur plateau sur le logiciel PreForm, FormLabs et paramètres d'impression



Figure 26 : Modèles pédagogiques en taille réelle et surdimensionnés sur socle (points de contacts 0,4 mm)

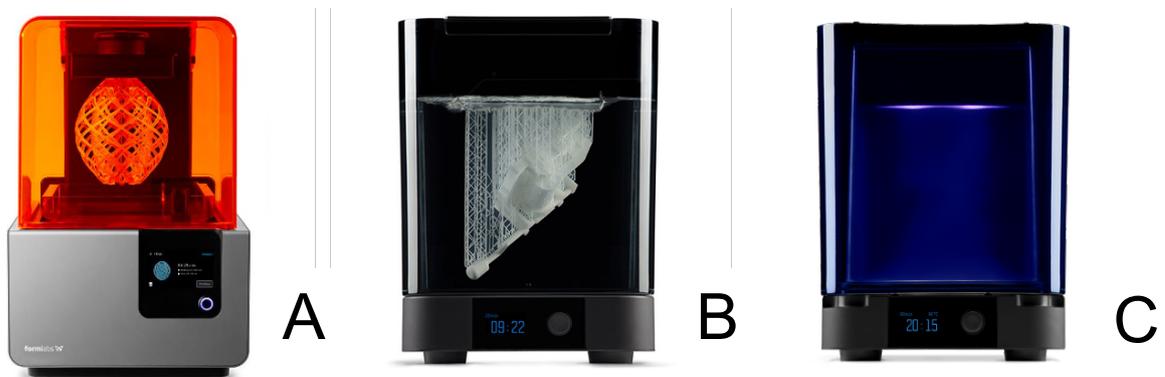


Figure 27 : Outils de fabrication : Imprimante FormLabs2 par stéréolithographie (A) ; FormWash (B) ; FormCure (C)

### 3.1.5 Utilisation des modèles pédagogiques

Afin de montrer la possibilité d'utiliser ces modèles lors d'une séance de travaux pratiques, les perforations ont été réparées par mise en place d'une Biodentine™ selon les étapes suivantes (Annexe 1) :

- Nettoyage et assèchement.
- Protection des entrées canalaires par mise en place de cônes de gutta-percha.
- Mise en place de Biodentine™.
- Élimination des cônes de gutta-percha et élimination des excès.

### 3.2 Résultats et discussion

Dans un souci d'éthique et en raison des critiques croissantes à l'égard de l'utilisation de dents humaines extraites [1], une formation pré-clinique sur les dents artificielles reproduisant la complexité des dents naturelles est nécessaire afin de garantir aux étudiants un apprentissage optimal avant de leur permettre de traiter les patients. A l'heure actuelle, seuls des simulateurs pour préparations de cavité d'accès, de facette, d'éviction carieuse, d'ostéotomie ou encore de résection apicale existent (VirTeaSy Dental VRC, Laval cedex, France et Simodont® Dental Trainer) [44,45], mais aucun n'a été conçu pour apprendre à gérer une perforation iatrogène.

L'objectif principal de cette thèse a été rempli et a permis de produire des simulateurs pour l'apprentissage de la gestion des perforations iatrogènes, utilisables lors des travaux pratiques (fig. 28).

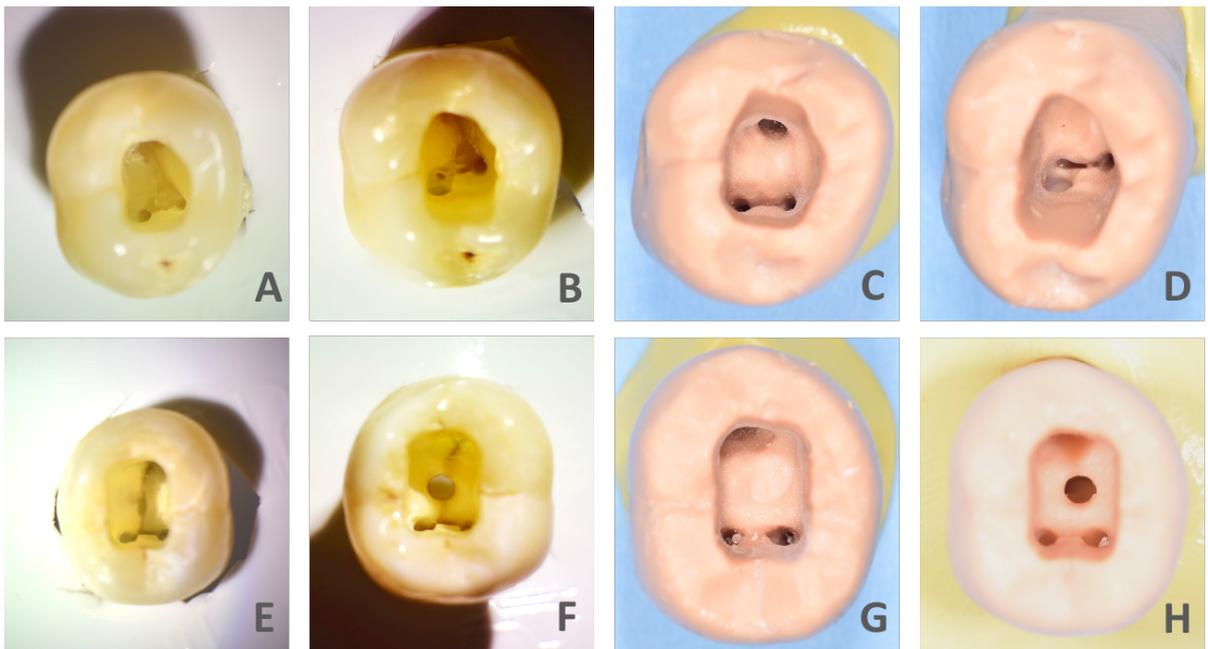


Figure 28 : Fabrication de modèles pédagogiques à partir de dents naturelles : dents naturelles avec cavité d'accès (A,E) ; dents naturelles perforées (B,F) ; modèles pédagogiques non perforés (C,G) ; modèles pédagogiques perforés (D,H)

### Description du modèle pédagogique

Le modèle pédagogique qui a été créé présente une couleur proche de la dent naturelle. Il permet de visualiser facilement le système canalaire et les variations anatomiques par un jeu d'ombre. Le modèle étant constitué d'un seul type de résine, il ne permet pas de différencier les types de dentine par leur couleur. Néanmoins, ceci ne constitue pas une limite en soi pour ce projet, qui est centré sur la gestion des perforations, quant à elles facilement identifiables. Ce modèle présente par ailleurs l'avantage d'être reproductible et aseptique, ce qui le rend particulièrement adapté pour une utilisation en travaux pratiques d'endodontie. En effet, la standardisation des procédures et des protocoles de traitement des perforations sur ces modèles permet à l'utilisateur d'acquérir de la dextérité à manipuler les matériaux. Il a la possibilité de mettre en pratique ses nouvelles compétences de manière quasi « illimitée » sur un modèle standardisé. Cette notion de standardisation est d'autant plus appréciable pour les évaluations en plaçant tous les participants sur un pied d'égalité.

### Conception et fabrication du modèle pédagogique

Les modèles pédagogiques ont été conçus à partir de dents humaines afin d'obtenir un biomimétisme optimal. Le choix s'est orienté vers des dents postérieures pour offrir un champ opératoire plus large que sur une dent monoradiculée. La compréhension et la gestion de la perforation dans les 3 plans de l'espace sont ainsi facilitées pour une première approche pédagogique. Cependant, le procédé utilisé ici permettra dans un futur proche de reproduire tout type de dent.

Une cavité d'accès type a été réalisée sur les 2 dents. Un contrôle de la perméabilité canalaire a ensuite été réalisé afin de s'assurer de la continuité du canal sur le modèle virtuel et ainsi de la perméabilité du modèle pédagogique. Le choix des perforations au niveau du plancher pulpaire et du 1/3 coronaire radulaire s'explique par leur haute incidence associée à un potentiel de guérison élevé [8,40]. De plus, il apparaît plus facile de débiter l'apprentissage sur ces 2 types de perforation, visibles et accessibles depuis la cavité d'accès. Les perforations latéro-radulaires au 1/3 moyen ou apical seront préférentiellement réservées aux praticiens plus expérimentés. De plus, les perforations ont été réalisées sur les dents humaines avec du matériel

conventionnel utilisé au quotidien par le chirurgien-dentiste. Ceci a permis d'obtenir des axes et des positionnements de perforation les plus proches possible d'une situation clinique.

Dans ce travail, la micro-tomographie a été sélectionnée pour effectuer l'acquisition radiographique des dents humaines. En effet, elle constitue la méthode de choix de par sa haute précision, son caractère tridimensionnel et non-destructif permettant d'effectuer les acquisitions avant et après perforation sur les mêmes dents [46,47]. Par ailleurs, la stéréolithographie comme méthode additive de fabrication a été sélectionnée en raison de son importante précision, la rendant particulièrement adaptée pour ce type d'application [48].

Afin de produire la copie d'un objet en réduisant au strict minimum les variations de forme, la résolution du scan d'acquisition doit être inférieure à celle de la fabrication. C'est pourquoi, dans ce travail, une résolution d'acquisition de 20  $\mu\text{m}$  et une résolution de fabrication de 25  $\mu\text{m}$  ont été sélectionnées. Seule la résine Dental Model était adaptée pour obtenir un tel niveau de précision, et elle présentait l'avantage d'avoir une bonne qualité de surface lisse, mate et opaque. Il aurait été possible d'augmenter encore la précision de l'acquisition jusqu'à 1  $\mu\text{m}$  avec le plateau technique disponible, mais le prototype est destiné à des fins pédagogiques et non pas de recherche, et le temps d'acquisition aurait été excessivement long. Une des perspectives de ce travail consiste à optimiser la durée de fabrication des modèles pédagogiques en trouvant la meilleure balance résolution/temps de fabrication pour fournir un modèle de qualité acceptable. De plus, le temps de fabrication pourra être réduit en produisant des plateaux dédiés sur lesquels l'espace est optimisé (fig. 29).

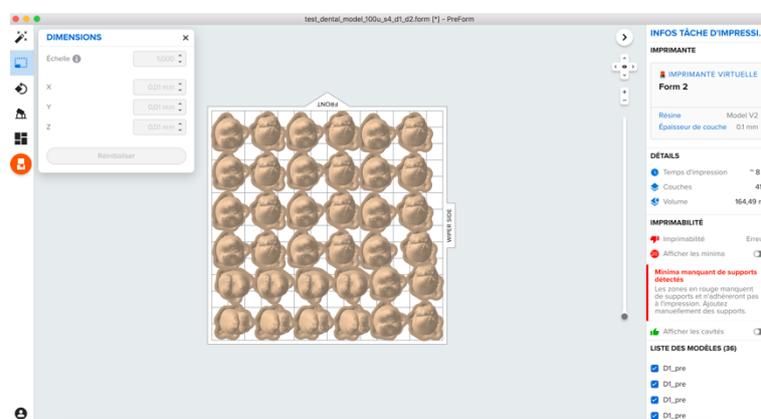


Figure 29 : Plateau optimisé pour accélérer la fabrication des modèles

Lors de l'étape de conception, il a été nécessaire de réduire le diamètre et le nombre de supports maintenant les pièces en cours de fabrication afin de faciliter leur élimination lors de l'étape du nettoyage et éviter que ceux-ci n'interfèrent avec la cavité d'accès ou les perforations. Ce réglage a été efficace pour la fabrication des modèles pédagogiques en taille réelle mais a provoqué des décollements du plateau des pièces surdimensionnées qui se sont révélées trop lourdes. Une correction de ces défaillances s'avèrera nécessaire dans un travail ultérieur. Les pièces surdimensionnées ont donc été reproduites *a posteriori* en augmentant le diamètre des supports.

### Utilisation du modèle pédagogique

Afin de prouver que les modèles pédagogiques sont fonctionnels, les perforations ont été obturées dans le cadre d'une séance de travaux pratiques (fig. 30).

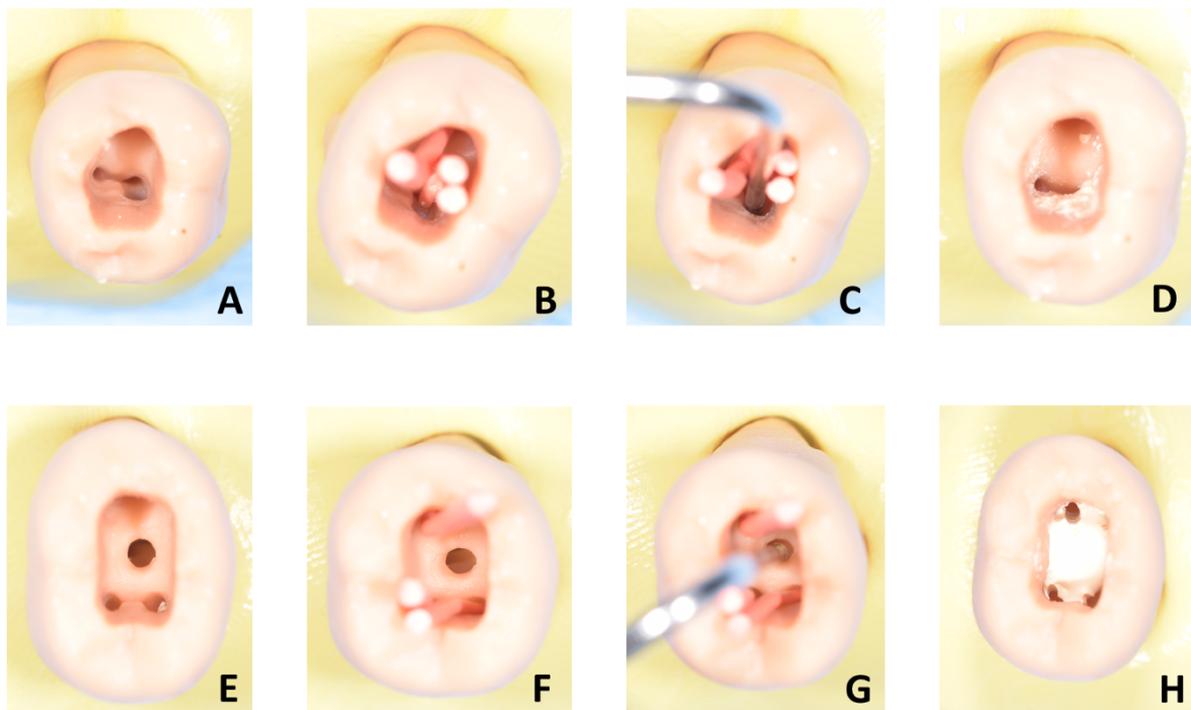


Figure 30 : Gestion des perforations iatrogènes sur modèles pédagogiques par mise en place de Biodentine™ : visualisation des perforations (A,E) ; protection des entrées canalaires à l'aide des cônes de gutta-percha (B,F) ; essayage des fouloirs (C,G) ; Biodentine™ mise en place (D,H)

L'ensemble des étapes nécessaires à l'obturation des perforations ont pu être effectuées dans de bonnes conditions et le modèle pédagogique a montré de nombreux avantages :

- Protection des entrées canalaires par mise en place de cônes de gutta-percha, rendue possible par la perméabilité des canaux.
- Distinction de la perforation des entrées canalaires.
- Bonne adhérence du matériau d'obturation à la résine.
- Contraste entre la couleur beige de la résine et la couleur blanche du matériau d'obturation permettant un contrôle de sa mise en place.
- Dureté de la résine acceptable renvoyant à une perception sensorielle tactile proche de celle d'une dent naturelle pour l'exercice.
- Possibilité pour l'utilisateur d'évaluer *a posteriori* son travail avec la « dent dans la main ».

### Modèles pédagogiques surdimensionnés

L'objectif secondaire de ce travail qui était de produire les mêmes modèles que décrits précédemment mais surdimensionnés a été atteint (fig. 31). Ces modèles permettent d'associer un objet agrandi qu'il est possible de manipuler pour faciliter la compréhension des volumes perforés dans les 3 plans de l'espace. L'apprentissage théorique pré-opératoire est ainsi complété par un apprentissage multi-sensoriel. Cette exploration visuelle et tactile complète très largement la formation des apprenants pour qui les représentations uniquement visuelles et les explications verbales ne suffisent pas [49,50].



Figure 31 : Modèles pédagogiques surdimensionnés (X3) et en taille réelle

### Estimation du coût

Le coût total pour le développement des modèles pédagogiques dans le cadre de ce travail a été estimé à 284 euros. Il comprend la conception (1 heure de microtomographie et 1 heure de temps opérateur) et la fabrication (résine et 1 heure de temps opérateur). Le coût de production des modèles une fois le développement terminé est bien moindre et est estimé à 1,30 euros par dent (plateau optimisé de 36 dents, résine et 1 heure de temps opérateur), ce qui le rend inférieur à la plupart des modèles présents sur le marché.

## 4 Conclusion

Ce travail a permis de concevoir et de fabriquer un simulateur endodontique perforé afin de faciliter l'apprentissage de la gestion des perforations iatrogènes en travaux pratiques.

Deux types de simulateurs ont été modélisés et fabriqués par stéréolithographie à partir de dents humaines scannées : perforation du plancher pulpaire et perforation du 1/3 coronaire radiculaire. Ces modèles à l'échelle ont ensuite été utilisés dans le cadre d'une séance de travaux pratiques test par la mise en place d'un ciment silicate de calcium dans les perforations. Les modèles élaborés dans le cadre de ce travail sont reproductibles à l'infini et permettront la standardisation du contenu d'un exercice à visée pédagogique ou d'évaluation. Des modèles surdimensionnés (X3) ont également été produits afin d'améliorer la compréhension spatiale des perforations par les étudiants.

Des perspectives d'évolution et d'utilisation des modèles apparaissent envisageables. La durée de fabrication des modèles pédagogiques peut être optimisée en recherchant la meilleure balance résolution/temps de fabrication tout en produisant un modèle de qualité acceptable. Par ailleurs, une évaluation des modèles par un groupe d'enseignants et d'étudiants se révèle désormais indispensable. À l'avenir, il serait intéressant de produire d'autres anatomies et d'autres types de perforation. Le modèle pourra également être perfectionné en y ajoutant un support parodontal ou encore la possibilité d'utiliser un localisateur d'apex.

## Références bibliographiques

1. Kröger E, Dekiff M, Dirksen D. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. *Eur J Dent Educ* 2017;21:e119-25.
2. Pitts NB, Chow TW, Renson CE, Kirkwood J, Walker RT. Mounted human skulls as an aid to preclinical endodontic teaching. *Int Endod J* 1984;17:73-5.
3. Siew K, Lee AHC, Cheung GSP. Treatment Outcome of Repaired Root Perforation: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Endodontics* 2015;41:1795-804.
4. Ave NS. Glossary of Endodontic Terms. American Association of Endodontists :50.
5. Regan JD, Witherspoon DE, Foyle Deborahm. Surgical repair of root and tooth perforations. *Endodontic Topics* 2005;11:152-78.
6. Simon S, Machtou P, Pertot W-J. *Endodontie*. Rueil-Malmaison: Éditions CdP; 2012.
7. Estrela C, Decurcio D de A, Rossi-Fedele G, Silva JA, Guedes OA, Borges ÁH. Root perforations: a review of diagnosis, prognosis and materials. *Braz Oral Res* 2018;32:e73.
8. Tsesis I, Fuss Z. Diagnosis and treatment of accidental root perforations. *Endodontic Topics* 2006;13:95-107.
9. Simon S, Ctorza-Perez C. *Cavité d'accès en endodontie*. EMC Elsevier Masson SAS, Paris 2010;11.
10. Clauder T, Shin S-J. Repair of perforations with MTA: clinical applications and mechanisms of action. *Endodontic Topics* 2006;15:32-55.
11. Guivarc'h M, Soler T, Pérez F, Bukiet F. *Mise en forme canalaire et irrigation*. 2015;13.
12. Carrotte P. Endodontics: Part 6 Rubber dam and access cavities. *Br Dent J* 2004;197:527-34; quiz 577.

13. Fuss Z, Trope M. Root perforations: classification and treatment choices based on prognostic factors. *Dent Traumatol* 1996;12:255-64.
14. Tsai Y-L, Ian W-H, Jeng J-H. Treatment of Pulp Floor and Stripping Perforation by Mineral Trioxide Aggregate. *Journal of the Formosan Medical Association* 2006;105:522-6.
15. Abou-Rass M, Jann JM, Jobe D, Tsutsui F. Preparation of Space for Posting: Effect on Thickness of Canal Walls and Incidence of Perforation in Molars. *The Journal of the American Dental Association* 1982;104:834-7.
16. Estrela C, Pécora JD, Estrela CRA, Guedes OA, Silva BSF, Soares CJ, et al. Common Operative Procedural Errors and Clinical Factors Associated with Root Canal Treatment. *Braz. Dent. J.* 2017;28:179-90.
17. Asadi O. Endodontic root perforation. 2017;3.
18. Ferris D, Baumgartner J. Perforation Repair Comparing Two Types of Mineral Trioxide Aggregate. *Journal of Endodontics* 2004;30:422-4.
19. Mente J, Leo M, Panagidis D, Saure D, Pfefferle T. Treatment Outcome of Mineral Trioxide Aggregate: Repair of Root Perforations—Long-term Results. *Journal of Endodontics* 2014;40:790-6.
20. ElDeeb ME, ElDeeb M, Tabibi A, Jensen JR. An evaluation of the use of amalgam, Cavit, and calcium hydroxide in the repair of furcation perforations. *Journal of Endodontics* 1982;8:459-66.
21. Aguirre R, Eldeeb ME, ElDeeb ME. Evaluation of the repair of mechanical furcation perforations using amalgam, gutta-percha, or indium foil. *Journal of Endodontics* 1986;12:249-56.
22. Alhadainy HA, Himel VT. An in vitro evaluation of plaster of paris barriers used under amalgam and glass ionomer to repair furcation perforations. *Journal of Endodontics* 1994;20:449-52.
23. Pitt Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong C-U, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1995;79:756-63.
24. Bodrumlu E. Biocompatibility of retrograde root filling materials: A review. *Aust Endodontic J* 2008;34:30-5.
25. Orstavik D. Materials used for root canal obturation: technical, biological and

- clinical testing. *Endodontic Topics* 2005;12:25-38.
26. Camilleri J. Investigation of Biodentine as dentine replacement material. *Journal of Dentistry* 2013;41:600-10.
  27. Attal J-P. Les ciments verres ionomères (CVI). In: *Biomatériaux dentaires*. 2016.
  28. Duarte MAH, Marciano MA, Vivian RR, Tanomaru Filho M, Tanomaru JMG, Camilleri J. Tricalcium silicate-based cements: properties and modifications. *Braz. oral res.* 2018;32.
  29. Kaur M. MTA versus Biodentine: Review of Literature with a Comparative Analysis. *JCDR* 2017.
  30. Association Dentaire Française. *Obturation Canalaire*. 2014.
  31. Grech L, Mallia B, Camilleri J. Investigation of the physical properties of tricalcium silicate cement-based root-end filling materials. *Dental Materials* 2013;29:e20-8.
  32. Al-Daafas A, Al-Nazhan S. Histological evaluation of contaminated furcal perforation in dogs' teeth repaired by MTA with or without internal matrix. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 2007;103:e92-9.
  33. Pertot W-J. Perforations possibilités actuelles de traitement. *L'information Dentaire* 2010.
  34. Sinai IH. Endodontic perforations: their prognosis and treatment. *The Journal of the American Dental Association* 1977;95:90-5.
  35. Seltzer S, Sinai I, August D. Periodontal Effects of Root Perforations Before and During Endodontic Procedures. *J Dent Res* 1970;49:332-9.
  36. Torabinejad M, Walton RE. *Endodontics: principles and practice*. St. Louis, Mo.: Saunders/Elsevier; 2009.
  37. Unal GC, Maden M, Isidan T. Repair of Furcal Iatrogenic Perforation with Mineral Trioxide Aggregate: Two Years Follow-up of Two Cases. *Eur J Dent* 2010;04:475-81.
  38. Kennethweldonjr J, Pashley D, Loushine R, Normanweller R, Frankkimbrough W. Sealing Ability of Mineral Trioxide Aggregate and Super-EBA When Used as Furcation Repair Materials: A Longitudinal Study. *Journal of Endodontics* 2002;28:467-70.

39. Lantz B, Persson PA. Periodontal tissue reactions after root perforations in dog's teeth. A histologic study. *Odontol Tidskr* 1967;75:209-37.
40. Monteiro JC do C, Tonetto MR, Bandeca MC, Borges AH, Segalla JCM, Jordão-Basso KCF. Repair of Iatrogenic Furcal Perforation with Mineral Trioxide Aggregate: A Seven-Year Follow-up. *Iranian Endodontic Journal* 2017;12.
41. Robberecht L, Chai F, Dehurtevent M, Marchandise P, Bécavin T, Hornez J-C, et al. A novel anatomical ceramic root canal simulator for endodontic training. *Eur J Dent Educ* 2017;21:e1-6.
42. European Society of Endodontology. Accreditation of postgraduate speciality training programmes in Endodontology. Minimum criteria for training Specialists in Endodontology within Europe: Speciality training. *International Endodontic Journal* 2010;43:725-37.
43. Nassri MRG, Carlik J, Silva CRN da, Okagawa RE, Lin S. Critical analysis of artificial teeth for endodontic teaching. *J. Appl. Oral Sci.* 2008;16:43-9.
44. Shah P, Chong BS. 3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. *Clin Oral Invest* 2018;22:641-54.
45. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *JDE* 2019;s1-7.
46. Stauber M, Müller R. Micro-Computed Tomography: A Method for the Non-Destructive Evaluation of the Three-Dimensional Structure of Biological Specimens. In: Westendorf JJ, éditeur. *Osteoporosis*. Totowa, NJ: Humana Press; 2008. page 273-92.
47. Irie MS, Rabelo GD, Spin-Neto R, Dechichi P, Borges JS, Soares PBF. Use of Micro-Computed Tomography for Bone Evaluation in Dentistry. *Braz. Dent. J.* 2018;29:227-38.
48. Dehurtevent M, Robberecht L, Hornez J-C, Thuault A, Deveaux E, Béhin P. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing. *Dental Materials* 2017;33:477-85.
49. Ministère de l'éducation nationale. *Guide de l'impression 3D*. 2018.
50. de Boer IR, Wesselink PR, Vervoorn JM. Student performance and appreciation using 3D vs. 2D vision in a virtual learning environment. *Eur J Dent Educ* 2016;20:142-7.

## Table des figures

Figure 1 : Classification des perforations dentaires iatrogènes (source : UFSBD) ...	13
Figure 2 : Dessin de la cavité d'accès idéale selon le positionnement des cornes pulpaire sur incisive maxillaire et 1 <sup>ère</sup> molaire mandibulaire [9] .....	14
Figure 3 : Élimination du plafond pulpaire et du contenu caméral, élimination des triangles dentinaires à l'aide de limes manuelles ou de forets de Gates [9].....	14
Figure 4 : Perforation coronaire vestibulaire d'une incisive due à une erreur d'axe [9] .....	15
Figure 5 : Radiographie d'une perforation coronaire mésiale sur une molaire mandibulaire lors de la recherche des entrées canalaire [10] .....	15
Figure 6 : Préparation canalaire : action mécanique et chimique [9].....	16
Figure 7 : Schéma illustrant l'insuffisance d'ouverture de la cavité d'accès sur une canine, entraînant des contraintes instrumentales coronaires, augmentant ainsi le risque de perforation apicale [12] .....	16
Figure 8 : Schéma et radiographie d'une perforation latéro-radicaire au 1/3 moyen sur molaire mandibulaire causée par un défaut de courbure instrumentale [10,13]..	17
Figure 9 : Radiographie d'une perforation de la constriction apicale d'une molaire mandibulaire causée par une sur-préparation, elle-même liée à l'absence d'utilisation de localisateur d'apex (le matériau d'obturation est à proximité du canal mandibulaire) [10].....	17
Figure 10 : Coupe axiale d'une racine présentant un stripping (à gauche), pouvant aboutir à une perforation (à droite) [15] .....	17
Figure 11 : Radiographie d'une perforation liée à une erreur d'axe de forage sur une prémolaire mandibulaire [5] .....	18
Figure 12 : Traitement non chirurgical des perforations latéro-radicales du 1/3 coronaire au 1/3 moyen (protocole 1).....	26
Figure 13 : Protocole de mise en œuvre de la Biodentine™, Biodentine Scientific File Septodont, courtoisie de la société Septodont (protocole 2) .....	27
Figure 14 : Traitement non chirurgical des perforations latéro-radicales apicales ou de la constriction apicale (protocole 3).....	29

Figure 15 : Traitement non chirurgical des perforations du plancher pulpaire (protocole 4) .....	30
Figure 16 : Molaire mandibulaire présentant une perforation du plancher (A,B) Radiographie post-opératoire après obturation de la perforation de la furcation avec un silicate de calcium (C). Radiographie de suivi à 6 mois, on visualise une cicatrisation de l'os inter-radicaire (D) [40] .....	32
Figure 17 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires avant perforation .....	35
Figure 18 : Photographie du porte échantillon contenant les 2 dents naturelles, permettant l'acquisition dans le micro-tomographe .....	36
Figure 19 : Dents en position de scan, avant reconstruction.....	36
Figure 20 : Sélection de la région d'intérêt sur CTan.....	37
Figure 21 : Modèle virtuel segmenté et modélisé au format .STL sur Avizo avant lissage (Jaune) et après lissage (Vert) de l'état de surface .....	37
Figure 22 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires avant perforation au format .STL.....	38
Figure 23 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires après perforation .....	39
Figure 24 : Visualisation de la cavité d'accès sur 2 molaires mandibulaires après perforation au format .STL.....	39
Figure 25 : Visualisation des modèles virtuels sur plateau sur le logiciel PreForm, FormLabs et paramètres d'impression .....	40
Figure 26 : Modèles pédagogiques en taille réelle et surdimensionnés sur socle (points de contacts 0,4 mm) .....	41
Figure 27 : Outils de fabrication : Imprimante FormLabs2 par stéréolithographie (A) ; FormWash (B) ; FormCure (C) .....	41
Figure 28 : Fabrication de modèles pédagogiques à partir de dents naturelles : dents naturelles avec cavité d'accès (A,E) ; dents naturelles perforées (B,F) ; modèles pédagogiques non perforés (C,G) ; modèles pédagogiques perforés (D,H) .....	42
Figure 29 : Plateau optimisé pour accélérer la fabrication des modèles .....	44
Figure 30 : Gestion des perforations iatrogènes sur modèles pédagogiques par mise en place de Biodentine™ : visualisation des perforations (A,E) ; protection des entrées	

canalaires à l'aide des cônes de gutta-percha (B,F) ; essayage des fouloirs (C,G ; Biodentine™ mise en place (D,H).....	45
Figure 31 : Modèles pédagogiques surdimensionnés (X3) et en taille réelle .....	46

## Table des tableaux

Tableau 1 : Facteurs de risque de perforation liés à la réalisation de la cavité d'accès .....	15
Tableau 2 : Facteurs de risque de perforation liés à la préparation canalaire .....	16
Tableau 3 : Facteurs de risque de perforation liés à la préparation du logement d'un tenon radiculaire .....	18
Tableau 4 : Outils d'aide au diagnostic des perforations et leur interprétation .....	19
Tableau 5 : Synthèse des propriétés des matériaux disponibles pour l'obturation des perforations [24–26,26–30].....	22
Tableau 6 : Prise en charge à adopter face chaque type de perforation .....	24

## Annexe 1 : Plateau technique de mise en place de la Biodentine™ sur modèle pédagogique



### Liste du matériel :

- Seringue d'irrigation remplie d'hypochlorite de sodium 2,5%
- Compresses stériles
- Sonde, miroir, précelles
- Spatule à bouche
- Spatule à ciment
- Porte-amalgame
- Fouloirs de Machtou
- Cônes de Gutta-percha
- Pointes de papier stériles
- Capsule de Biodentine™ poudre + liquide



Développement d'un simulateur pour l'apprentissage pratique pré-clinique du traitement des perforations iatrogènes / **AUDINEAU Margot** - p. (60) : ill. (37) ; réf. (50).

**Domaines** : Dentisterie restauratrice et endodontie

**Mots clés Rameau:** Endodontie ; Pédagogie ; Simulateurs ; Silicates ; Impression 3D

**Mots clés FMeSH:** Endodontie ; Silicates ; Impression tridimensionnelle

**Mots clés libres** : Perforation iatrogène

**Résumé de la thèse :**

Aucun modèle n'est aujourd'hui disponible pour l'apprentissage de la gestion des perforations dentaires iatrogènes.

L'objectif de ce travail est de concevoir, de fabriquer et d'utiliser un modèle endodontique pédagogique présentant une perforation.

Deux dents humaines postérieures ont été sélectionnées et une cavité d'accès a été réalisée. Les dents ont été scannées par micro-tomographie et modélisées pour fournir un premier modèle non perforé. Les dents naturelles ont ensuite été perforées (plancher pulpaire et 1/3 coronaire radiculaire), puis scannées et modélisées à nouveau. Les modèles pédagogiques non perforés et perforés ont été fabriqués par stéréolithographie. La possibilité d'utilisation des modèles a été vérifiée en réparant les perforations avec un ciment silicate de calcium.

Les simulateurs perforés produits à l'échelle pour ce travail sont biomimétiques, reproductibles, aseptiques et utilisables lors des travaux pratiques. Les simulateurs surdimensionnés facilitent la visualisation et la compréhension spatiale des perforations.

Il est désormais nécessaire d'optimiser le procédé de fabrication. Les simulateurs doivent également être validés dans le cadre d'un retour d'expérience par un groupe d'enseignants et d'étudiants. Enfin, il sera possible de les faire évoluer en intégrant d'autres anatomies ou encore la possibilité d'utiliser un localisateur d'apex.

**JURY :**

**Président :** **Professeur Colard Thomas**

**Assesseurs :** **Docteur Gambiez Alain**

**Docteur Robberecht Lieven**

**Docteur Oleksiak Pascal**

**Adresse de l'auteur :** 40 bis rue de la grande chapelle, 62490 Vitry-en-Artois