



HAL
open science

Développement de modèles numériques 3D du système endo-canalaires

Virginie Martins

► **To cite this version:**

Virginie Martins. Développement de modèles numériques 3D du système endo-canalaires. Chirurgie. 2021. dumas-03640437

HAL Id: dumas-03640437

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03640437v1>

Submitted on 13 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

THÈSE

***POUR OBTENIR LE DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

Ecole de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

***Développement de modèles numériques 3D
du système endo-canalair***

Présentée par

Martins Virginie

Née le 09/07/1996
À Marseille

Thèse soutenue le **Vendredi 9 juillet 2021**

Devant le jury composé de

Président : Professeur BUKIET Frédéric

Assesseurs : Docteur BALLESTER Benoît

Docteur GUIVARC'H Maud

Docteur MAILLE Gérald

Invitée : Docteur PILLIOL Virginie

THÈSE

***POUR OBTENIR LE DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

Ecole de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

***Développement de modèles numériques 3D
du système endo-canalair***

Présentée par

Martins Virginie

Née le 09/07/1996
À Marseille

Thèse soutenue le **Vendredi 9 juillet 2021**

Devant le jury composé de

Président : Professeur BUKIET Frédéric

Assesseurs : Docteur BALLESTER Benoît

Docteur GUIVARC'H Maud

Docteur MAILLE Gérald

Invitée : Docteur PILLIOL Virginie

ADMINISTRATION

Mise à jour : sept. 2020

Doyens Honoraires

Professeur	Raymond SANGIUOLO†
Professeur	Henry ZATTARA
Professeur	André SALVADORI
Professeur	Jacques DEJOU

Doyen Assesseurs

Professeur	Bruno FOTI
Professeur	Michel RUQUET
Professeur	Anne RASKIN

Directeurs de Départements

Formation Initiale	Professeur	Michel RUQUET
Recherche	Professeur	Anne RASKIN
Formation Continue	Professeur	Frédéric BUKIET

Charges de missions

Relations Internationales	Professeur	Hervé TASSERY
Internat et Diplômes d'études spécialisées	Professeur	Virginie MONNET-CORTI
Affaires générales	Docteur	Patrick TAVITIAN

Responsable des Services Administratifs et Techniques

Madame	Katia LEONI
--------	-------------

LISTE DES ENSEIGNANTS

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

BUKIET Frédéric (58-01)
FOTI Bruno (56-02)
LE GALL Michel (56-01)
MONNET-CORTI Virginie (57-01)
ORTHLIEB Jean-Daniel (58-01)
RASKIN Anne (58-01)
RUQUET Michel (58-01)
TARDIEU Corinne (56-01)
TARDIVO Delphine (56-02)
TASSERY Hervé (58-01)

PROFESSEUR DES UNIVERSITES

ABOUT Imad (65)

PROFESSEURS EMERITES

DEJOU Jacques
HUE Olivier

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

ABOUDHARAM Gérard (58-01)	LAN Romain (56-02)
BANDON Daniel (56-01)	LAURENT Michel (58-01)
BELLONI Didier (57-01)	LAURENT Patrick (57-01)
BOHAR Jacques (56-01)	MAILLE Gérald (58-01)
CAMOIN Ariane (56-01)	PHILIP-ALLIEZ Camille (56-01)
CAMPANA Fabrice (57-01)	POMMEL Ludovic (58-01)
CATHERINE Jean-Hugues (57-01)	PRECKEL Bernard-Éric (58-01)
GAUBERT Jacques (56-01)	RÉ Jean-Philippe (58-01)
GIRAUD Thomas (58-01)	ROCHE-POGGI Philippe (57-01)
GIRAudeau Anne (58-01)	STEPHAN Grégory (58-01)
GUIVARC'H Maud (58-01)	TAVITIAN Patrick (58-01)
JACQUOT Bruno (58-01)	TERRER Elodie (58-01)
LABORDE Gilles (58-01)	TOSELLO Alain (58-01)

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES ASSOCIES

BALLESTER Benoît (58-01)
BLANCHET Isabelle (56-01)
MENSE Chloé (58-01)
SILVESTRI Frédéric (58-01)

ASSISTANTS HOSPITALIERS ET UNIVERSITAIRES

AL AZAWI Hala (56-01)	HAHN-GOLETTI Larissa (58-01)
ANTEZACK Angeline (57-01)	LAURENT Camille (58-01)
ARNIER Canelle (56-01)	LIOTARD Alicia (58-01)
BAUDINET Thomas (58-01)	MADENIAN Pauline (58-01)
BRINCAT Arthur (57-01)	MANSUY Charlotte (58-01)
BROS Agnès (56-01)	MARTIN William (56-01)
CASAZZA Estelle (56-01)	MATERRA Rémi (58-01)
CASTRO Romain (57-01)	PARFU Anne (58-01)
CHIARINI Thomas (58-01)	PASCHEL Laura (58-01)
DAVID Laura (56-01)	PILLIOL Virginie (58-01)
DRAUSSIN Thierry (57-01)	ROUSCOFF Eva (56-01)
DUMAS Cathy (57-01)	SANTUNIONE Charlotte (58-01)
FAURE-BRAC Mathias (57-01)	VINAÏ Michael (56-01)
FERRE Enzo (58-01)	
HADJ-SAID Mehdi	

ASSISTANTS DES UNIVERSITES ASSOCIES

GRINE Ghilès (57-01)
HOUVENAEGHEL Brice (57-01)

Intitulés des sections CNU :

- 56^{ème} section : Développement, croissance et prévention
- 56-01 Odontologie pédiatrique et orthopédie dento-faciale
- 56-02 : Prévention – Epidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale
- 57^{ème} section : Chirurgie orale ; Parodontologie ; Biologie Orale
- 57-01 : Chirurgie orale – Parodontologie – Biologie orale
- 58^{ème} section : Réhabilitation orale
- 58-01 : Dentisterie restauratrice – Endodontie – Prothèses – Fonction-Dysfonction – Imagerie – Biomatériaux

L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation auprès du ou des titulaires des droits. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers.

Remerciements aux Professeurs uniquement

*À mon Président de thèse,
Monsieur le Professeur Frédéric BUKIET,*

*C'est un immense honneur que vous me faites d'avoir accepté de
présider mon jury de thèse.*

*Je vous exprime mon entière reconnaissance pour m'avoir
transmis vos savoirs en Endodontie et ce dès la première année
au sein de l'École de Médecine Dentaire jusqu'à aujourd'hui.*

*Vous êtes un exemple de rigueur en Endodontie et j'aimerais
m'en inspirer tout au long de ma pratique future.*

*Veillez trouver ici le témoignage de mon respect et de ma
profonde estime à votre égard.*

***À mon Directeur de thèse,
Monsieur le Docteur Benoît BALLESTER,***

C'est un immense honneur pour moi de vous avoir en tant que directeur de thèse.

Votre implication au sein de l'École est admirable. Votre soutien, votre compréhension ainsi que votre écoute apportée aux étudiants sont reconnus par tous.

Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous car vous avez su être disponible et impliqué lors des expériences pratiques menées ainsi que dans les échanges que l'on a pu avoir.

Vous êtes un exemple d'excellence dans tous les domaines de la dentisterie mais aussi concernant les liens humains.

Je vous suis très reconnaissante du fait que vous soyez présent en ce jour solennel et vous fait part de ma profonde gratitude et considération à votre égard.

À Madame le Docteur GUIVARC'H Maud,

Je tiens sincèrement à vous remercier de faire partie de ce jury de thèse.

Je n'oublierai jamais votre aide et vos précieux conseils apportés lors des travaux pratiques d'Endodontie tout au long de mon cursus universitaire.

Je suis très reconnaissante envers l'aide que vous m'avez apportée pour la réalisation de ce travail concernant les aspects techniques des dents utilisées actuellement lors des travaux pratiques d'Endodontie.

Ce fut un honneur pour moi de vous avoir ce jour en présentiel.

Veillez trouver ici le témoignage de mon respect et de ma profonde estime à votre égard.

À Monsieur le Docteur MAILLE Gérard,

Je tiens sincèrement à vous remercier de faire partie de ce jury de thèse.

Vos cours de « Conceptions assistés par ordinateur » représentent l'avenir de la Dentisterie en termes de technologies et c'est pourquoi c'est un honneur pour moi de vous avoir dans ce jury de thèse.

Veillez trouver ici le témoignage de mon respect et de ma profonde estime à votre égard.

À Madame le Docteur PILLIOL Virginie,

Je tiens sincèrement à vous remercier d'avoir accepté d'être l'invitée au sein de ce jury de thèse.

Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous en stage clinique. Votre sympathie, votre bonne humeur ainsi que vos compétences sont une chance pour les étudiants.

Je vous remercie pour m'avoir retranscrit le ressenti des étudiants lors des travaux pratiques actuels ce qui a pu faire avancer ce travail.

Je vous suis très reconnaissante du fait que vous soyez présent en ce jour solennel et vous fait part de ma profonde gratitude et considération à votre égard.

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
1. LES MODELES DENTAIRES EN ENDODONTIE A L'ÉCOLE DE MEDECINE DENTAIRE DE MARSEILLE	2
1.1 ÉTAT ACTUEL : ANALYSE DE L'EXISTANT	2
1.2 INTERETS PEDAGOGIQUES DE MODELES DENTAIRES ANATOMIQUES	3
1.3 ANALYSE DES BESOINS.....	7
1.3.1 QUANTITATIFS	7
1.3.2 QUALITATIFS.....	8
2. CHAINE TECHNIQUE ET TECHNOLOGIQUE DE L'IMPRESSION 3D	13
3. MATERIELS ET METHODES	18
3.1 OBTENTION DU MODELE NUMERIQUE	18
3.1.1 SELECTION DE LA DENT NATURELLE	19
3.1.2 ACQUISITION TOMOGRAPHIQUE DE LA DENT NATURELLE	20
3.1.3 SEGMENTATION DU FICHIER DICOM	21
3.2 IMPRESSION 3D DU MODELE NUMERIQUE	29
3.2.1 PREPARATION ET LANCEMENT DE L'IMPRESSION 3D	30
3.2.2 RECUPERATION DES MODELES IMPRIMES	32
3.3 POST-TRAITEMENT DES MODELES IMPRIMES	33
4. RESULTATS.....	35
5. DISCUSSION	37
CONCLUSION	41
BIBLIOGRAPHIE	A
LISTE DES TABLEAUX	C
LISTE DES ILLUSTRATIONS	D

Introduction

En janvier 2012, la Haute Autorité de Santé publie un rapport de mission concernant les pratiques de simulation dans le domaine de la santé.

Le terme « Simulation en Santé » est défini comme l'utilisation d'un matériel, de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels.(1)

En France, la simulation dans le monde de la santé est une activité émergente qui se répartit sur tout le territoire mais qui demeure assez artisanale.

En conclusion de ce rapport sur la simulation en santé, dix actions sont proposées. La première proposition instaure que la formation par les méthodes de simulation en santé doit être intégrée dans tous les programmes d'enseignement des professionnels de santé à toutes les étapes de leur cursus (initial et continu). Un objectif éthique devrait être prioritaire « jamais la première fois sur le patient ». (1)

L'Endodontie est une discipline complexe sur le plan théorique mais également sur le plan pratique. En effet, une série de gestes est à acquérir comme par exemple la préparation de la cavité d'accès ou bien l'identification des différents canaux. (2)

Nous verrons que la pratique de l'Endodontie lors du stage clinique est source de stress chez l'étudiant c'est pourquoi la simulation dans cette discipline est primordiale.

Le développement numérique de modèles en trois dimensions (3D) permettrait de reproduire une dent naturelle ainsi que son système endo-canalair avec un matériau compatible avec la simulation de l'acte.

Après avoir présenté les modèles actuellement utilisés en simulation au sein de l'École de Médecine Dentaire de Marseille nous verrons les impératifs quantitatifs et qualitatifs des modèles pédagogiques en Endodontie. Nous allons ensuite présenter l'ensemble de la chaîne technique et technologie nécessaire à la réalisation de modèle dentaire imprimé en 3D. En termes de réalisation pratique, nous allons nous intéresser à la molaire maxillaire et créer un modèle compatible avec la simulation en Endodontie.

1. Les modèles dentaires en Endodontie à l'École de Médecine Dentaire de Marseille

1.1 État actuel : analyse de l'existant

De la deuxième année à la quatrième année, les étudiants participent à des travaux pratiques à l'École de Médecine Dentaire sur des patients fantômes ou bien sur paillasse. Plusieurs disciplines ont recours à l'utilisation de dents artificielles comme l'odontologie restauratrice, la prothèse partielle amovible, la prothèse fixe, la prothèse totale, l'odontologie pédiatrique ainsi que l'Endodontie.

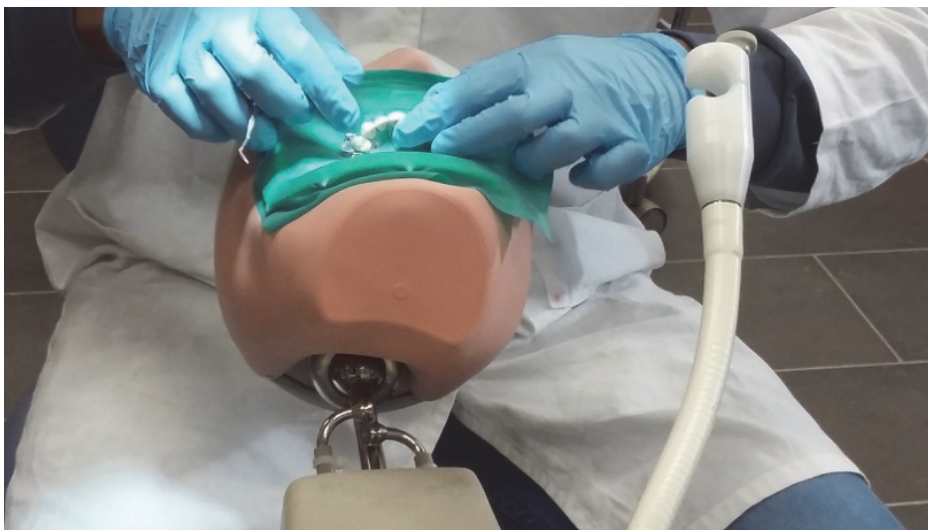


Figure 1 : Photographie illustrant le travail sur fantôme à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.

Année d'étude	Programme des travaux pratiques d'Endodontie
Deuxième année (DFGS02)	Dents mono-radiculées <ul style="list-style-type: none"> - Cavité d'accès - Mise en forme canalaire - Ajustage du maître cône
Troisième année (DFGS03)	Dents pluri-radiculées <ul style="list-style-type: none"> - Cavité d'accès - Mise en forme canalaire - Ajustage du maître cône
Quatrième année (DFAS01)	Familiarisation du moteur à réciprocité

Tableau 1 : Tableau illustrant les programmes des différents travaux pratiques d'Endodontie selon l'année d'étude à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.

En Endodontie, les étudiants s'exercent sur des dents artificielles en résine simulant l'anatomie canalaire. Ces dents en résine *NAODENT®évolution* proviennent d'un fabricant externe qui les imprime en 3 dimensions. Les étudiants peuvent ainsi appréhender les conditions cliniques sur des modèles standardisés, ce qui facilite leur évaluation en travaux pratiques. En Endodontie, les étapes de fraisage, de préparation coronaire et de cavité d'accès, de mise en forme canalaire, de radiographie ainsi que d'obturation à chaud peuvent être et sont effectuées sur ces dents en résine.

1.2 Intérêts pédagogiques de modèles dentaires anatomiques

La simulation en santé est primordiale afin de mettre en confiance l'étudiant avant son premier acte clinique. Elle consiste, après une phase préparatoire théorique, à découvrir la pratique, atteindre des objectifs ainsi que des réflexes cliniques, techniques et comportementaux.

La stimulation en santé comprend un environnement reproduisant la réalité clinique : du matériel au protocole de soin ainsi qu'à la mise en situation simulée d'un professionnel de santé ou d'une équipe. (1)

Elle doit permettre de simuler des situations cliniques de manière reproductible, standardisée et représentative de la réalité. Des niveaux de difficulté variés permettent aux étudiants en formation initiale comme en formation continue de faire, de détecter ou bien de corriger des erreurs dans un cadre serein sans risque pour le patient et le praticien. Du fait de leur nature standardisée, les simulations peuvent être répétées, ce qui permet d'acquérir progressivement les gestes techniques.

Le débriefing en fin de simulation est également essentiel, il permet aux étudiants d'appréhender si les objectifs ont été atteints et de pouvoir réaliser une autocritique.

Les modèles pédagogiques issus de l'impression 3D ont un grand potentiel dans le domaine de la simulation dans la formation des futurs professionnels de santé. En effet, alors qu'une dentisterie moderne minimalement invasive voit le jour, les étudiants futurs praticiens, vont devoir maîtriser des procédures de plus en plus complexes. Pratiquer sur des modèles pédagogiques réalistes pourrait augmenter le confort d'apprentissage, mais aussi l'enthousiasme dans un cadre serein avec "un patient zéro risque" (3).

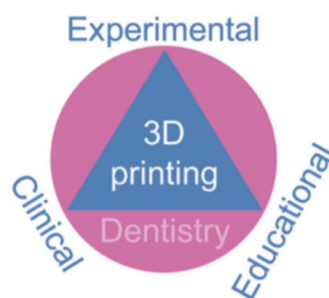


Figure 2 : Les applications de l'impression en trois dimensions (3D) en dentisterie incluant l'expérimentation, l'éducation et la pratique clinique.

Auparavant, les étudiants réalisaient leurs travaux pratiques à l'aide de dents humaines naturelles qu'ils devaient eux-mêmes se procurer auprès de praticiens. Cette méthode était adoptée et reconnue comme la meilleure (2).

Ensuite, des blocs en résine transparente ainsi que des modèles de dents artificielles furent utilisés, notamment vis-à-vis d'évolutions réglementaires. Ces modèles standardisés permettent, de plus, une reproductibilité de l'anatomie dentaire et de l'évaluation entre tous les étudiants.

	Avantages	Inconvénients
Dents naturelles humaines	<ul style="list-style-type: none"> - Anatomie naturelle : conditions de travaux pratiques similaires aux conditions cliniques - Examen radiologique satisfaisant - Coût allégé pour l'École de Médecine Dentaire : uniquement les frais de stérilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Anatomie différente d'une dent à l'autre : non équité de l'examen pour les étudiants - Considérations éthiques - Disponibilités : les étudiants doivent s'en procurer (favoritisme si parents Chirurgiens-Dentistes) - Fragilité : si dents extraites pour cause de délabrement avancé elles sont difficilement exploitables. La stérilisation les rend cassantes - Préhension non ergonomique et non réaliste - Hygiène : organe dentaire à stériliser par le personnel de l'École De Médecine Dentaire, pas de cadre d'hygiène défini pour le recueil des dents avec risque de contamination lors des travaux pratiques

Tableau 2 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de dents naturelles humaines lors de travaux pratiques d'Endodontie.

	Avantages	Inconvénients
Blocs en résine translucide	<ul style="list-style-type: none"> - Hygiénique - Anatomie identique entre chaque étudiant : équité de l'examen - Disponibilité : l'École de Médecine Dentaire les met à disposition - Examen radiologique satisfaisant - Visibilité du système endo-canalair par transparence : pédagogie 	<ul style="list-style-type: none"> - Préhension non ergonomique et non réaliste - Anatomie relativement proche de d'une dent naturelle - Disponibilité : l'École de Médecine Dentaire doit prévoir des stocks suffisants - Coût d'achat pour l'École de Médecine Dentaire - Visibilité du système endo-canalair par transparence : non représentatif de la réalité clinique - Pas de différence de couleurs en fonction des tissus représentés - Rigidité faible : non représentatif de la réalité

Tableau 3 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de blocs en résine translucide lors de travaux pratiques d'Endodontie.

	Avantages	Inconvénients
Dents en résine achetées par la faculté chez un fabricant externe	<ul style="list-style-type: none"> - Hygiénique - Anatomie identique entre chaque étudiant : équité de l'examen - Différents types de canaux avec plusieurs niveaux de difficultés - Examen radiologique possible - Disponibilité : l'École de Médecine Dentaire les met à disposition - Obturation possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Préhension non ergonomique et non réaliste - Coût d'achat pour l'École de Médecine Dentaire - Faible radio-opacité - Pas de différences de couleurs en fonction des tissus représentés - Disponibilité : l'École de Médecine Dentaire doit prévoir des stocks suffisants - Rigidité faible : création de copeaux de résine lors des préparations - La résine ne supporterait pas la chaleur de la condensation au Gutta Condensor

Tableau 4 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de dents en résine lors de travaux pratiques d'Endodontie.

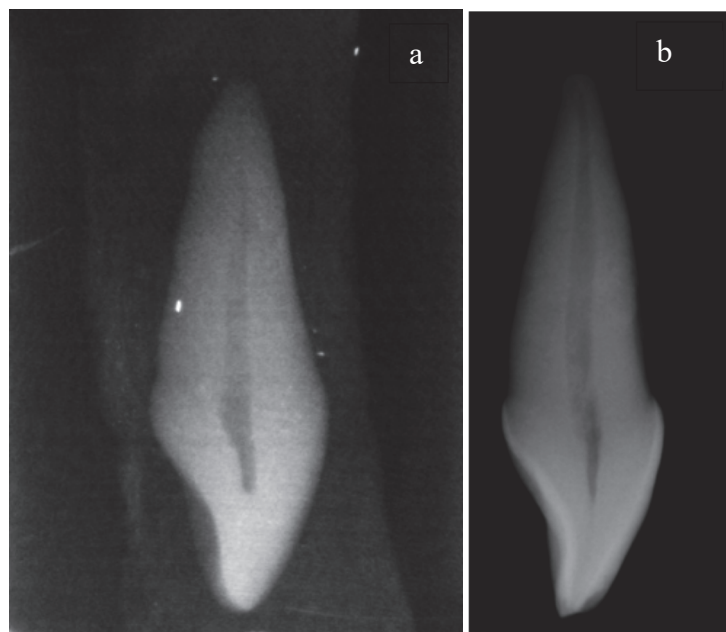


Figure 3 : Illustrations de deux radiographies comparant une incisive en résine NAODENT®évolution (a) et une incisive naturelle (b).

1.3 Analyse des besoins

1.3.1 Quantitatifs

Année d'étude	Nombre de dents en résine nécessaires en Endodontie par étudiant
Deuxième année (DFGS02)	6 dents
Troisième année (DFGS03)	8 dents
Quatrième année (DFAS01)	1 dent

Tableau 5 : Tableau illustrant les besoins quantitatifs des différents travaux pratiques d'Endodontie selon l'année d'étude à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.

Au total, si on considère que les promotions comptent en moyenne 80 étudiants, nous avons $(80 \times (6+8+1))$ et de ce fait l'École de Médecine Dentaire doit commander chaque année au moins 1200 dents en résine destinées aux travaux pratiques d'Endodontie.

Au niveau économique, toujours pour des promotions de 80 étudiants, les coûts sont considérablement élevés pour l'École de Médecine Dentaire, comme le précise ce tableau ci-dessous.

	Odontologie Restauratrice	Endodontie	Pédodontie	Odontologie Prothétique	Total
Par étudiant	153,60 €	174,00 €	266,80 €	38,40 €	632,80 €
Par année	12 288,00 €	13 920,00 €	21 344,00 €	3 072,00 €	50 624,00 €

Tableau 6 : Tableau représentant les coûts d'achat des dents en résine NAODENT® évolution par discipline par année et par étudiants.

1.3.2 Qualitatifs

Pour les étudiants, l'Endodontie fait partie des matières les plus difficiles à appréhender pendant leur cursus universitaire. En effet, l'étude transversale descriptive rapportée dans un travail de thèse réalisé en 2019 consiste à interroger 81 étudiants en quatrième année d'étude de chirurgie-dentaire au sein du Centre Hospitalier Universitaire de Bordeaux. Les trois étapes les plus compliquées ou stressantes à réaliser en stage clinique selon les étudiants sont : l'obturation endodontique (48 étudiants), la détermination de la longueur de travail (25 étudiants) et le repérage des canaux (23 étudiants) (4).

Aussi, le niveau d'appréhension des étudiants augmente considérablement lors du passage en stage clinique à partir de la quatrième année par rapport à la période pré-clinique. Il est donc primordial de rassurer au mieux les étudiants lors du cursus pré-clinique. Pour cela, les modèles de simulation doivent être représentatifs de la réalité afin que les étudiants puissent comprendre la complexité anatomique de l'endodonte.

L'endodonte correspond au réseau canalaire présent à l'intérieur de la dent, on parle aussi de système canalaire ou encore de système endodontique. Il comprend la chambre pulpaire délimitée coronairement par le plafond pulpaire. Ce plafond jaunâtre comprend lui-même des cornes pulpaires qui sont situées en général à l'aplomb des cuspidés dentaires. Le plancher pulpaire sépare la chambre des canaux pulpaires. C'est à partir de ce plancher nacré gris bleuté et convexe que l'on trouve les orifices canaux puis le réseau endodontique.

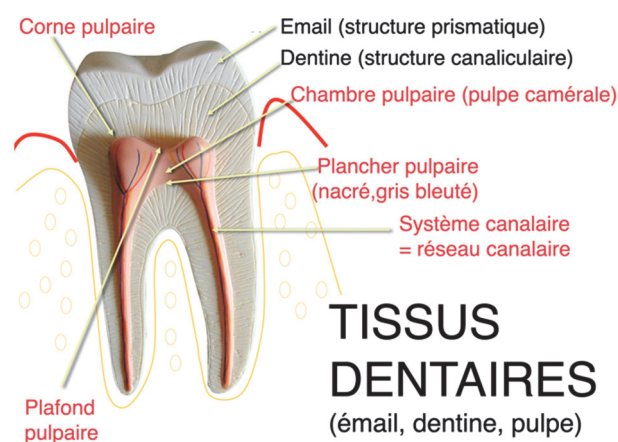


Figure 4 : Schéma de l'endodonte avec les différents éléments de l'anatomie pulpaire. (Courtoisie Pr Bukiet).

La complexité de l'anatomie canalaire tient au fait qu'il existe plusieurs configurations canalaire ainsi que de multiples ramifications au sein du réseau pulpaire.

Les études les plus anciennes émanant du travail de Hess & Zurcher en 1925, comme les plus récentes, montrent la nécessité d'un système de classification pour définir clairement les différentes configurations du système endo-canaire (5). À partir d'étude de coupes canalaire ainsi que de radiographies, Weine *et al.* en 1969 furent les premiers à classer les différentes configurations canalaire d'une même racine en trois types de configurations en décrivant les différentes divisions possibles d'un canal, de la chambre pulpaire jusqu'à l'apex (5).

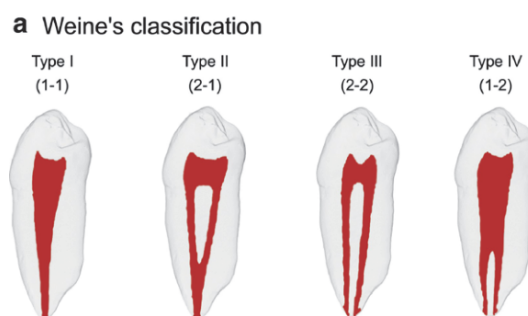


Figure 5 : Première classification des configurations canalaire selon Weine (1969)(5)

Plus tard en 1974, Vertucci *et al.* développent également une classification et décrivent un système endo-canaire plus complexe que celui décrit par Weine en 1969. Ils identifient alors un total de huit configurations (5).

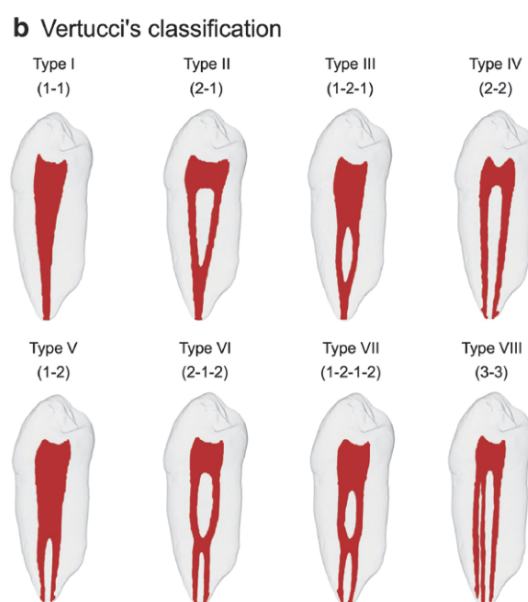


Figure 6 : Classification des configurations canalaire selon Vertucci (1974)(5)

En 1975, De Deus définit les notions de canal latéral, canal secondaire et canal accessoire. Le canal latéral est défini comme une bifurcation du canal principal au niveau du tiers moyen de la racine, le canal secondaire au niveau du tiers apical de la racine et le canal accessoire provient du canal secondaire (6)

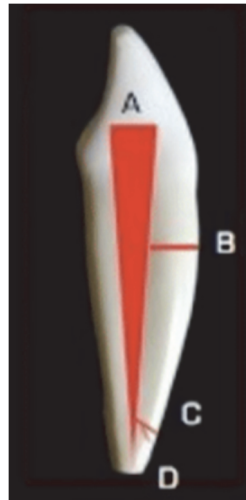


Figure 7 : Schéma illustrant la classification de De Deus.

A : Le canal principal

B : Le ou les canaux latéraux qui sont situés en général dans la portion du tiers coronaire ou moyen avec une orientation globalement perpendiculaire au canal principal

C : Le ou les canaux secondaires situés dans le tiers apical avec une orientation oblique en général par rapport au canal principal

D : Le ou les canaux accessoires qui sont des ramifications issues du canal secondaire.

Récemment en 2017, un nouveau système de classification voit le jour avec les travaux d'Ahmed. Cette méthode de classification inédite permet véritablement de coder le nombre de racines, les types et les nombres de canaux ainsi que les anomalies canalaire, et tout ceci en fonction du type de dent (5).

Cette classification a été proposée afin d'apporter plus d'informations, plus de détails et afin d'être utile pour les praticiens, mais également pour les étudiants lors des simulations.

La classification suit un code précis : (« localisation »A) nN Localisation de la racine n'(An')

Légende :

N = le numéro de la dent

n = le nombre de racines

Localisation de la racine : vestibulaire (V ou buccal en anglais : B), palatine (P, palatal en anglais), mésiale (M, mesial en anglais) ou bien distale (D, distal en anglais)

A = le type et sous type d'anomalie, accompagné de la localisation qui peut être vestibulaire (V ou buccal en anglais : B), palatine (P, palatal en anglais), mésiale (M, mesial en anglais) ou bien distale (D, distal en anglais)

n' = le nombre de canaux, accompagné du nombre et du type d'anomalies éventuellement rencontrées sur ce canal

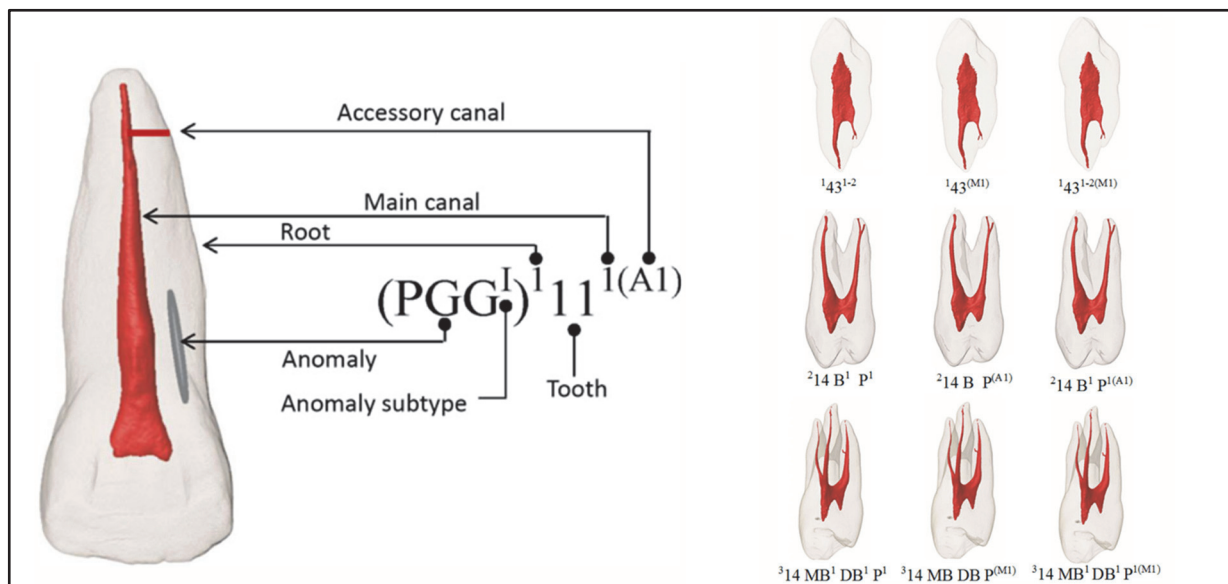


Figure 8 : Classification d'Ahmed et al.

À gauche : Exemple de « codage » pour une incisive centrale maxillaire droite.

Nous trouvons le numéro de la dent au centre : 11, en exposant à gauche le nombre de racine : 1, entre parenthèses les types et sous type d'anomalies ainsi que leur nombre et leur localisation : PGG^I, en exposant à droite le nombre de canaux ainsi que la présence d'un canal accessoire issu de ce canal principal : 1^(A1)(5)

À droite : Exemples de codage pour plusieurs types de dents : monoradiculée et pluriradiculées.

1^{ère} colonne : classification des racines

2^{ème} colonne : classification des morphologies du canal accessoire

3^{ème} colonne : codes combinés (5)

Les différents types d'anomalies sont :

- C : concrescence (fusion cémentaire de deux racines)
- DI : dent invaginée (dens in dente)
- DE : dent évaginée (tubercule de Carabelli par exemple)

- EP : perle d'émail
- G : gémination
- CsC : C-shaped Canal (« canal en C »)
- PGG : Palato-Gingival Groove (rainure palatine, le plus souvent sur les incisives maxillaires)
- RD : Root Dilaceration (dilacération radiculaire)
- RE : Radix Entomolaris (racine accessoire surnuméraire disto-linguale sur les molaires mandibulaires)
- RP : Radix Paramolaris (racine accessoire surnuméraire mésio-vestibulaire sur les molaires mandibulaires)
- T : taraudontisme
- TF : Tooth Fusion (fusion dentaire)

Les modèles pédagogiques dédiés à l'Endodontie doivent tenir compte de la complexité du système endo-canalair. Afin de préparer au mieux les étudiants pouvoir disposer de modèle présentant les différentes configurations décrite est indispensable.

Concernant l'aspect qualitatif des modèles, outre les considérations anatomiques de l'endodonte, il faut également tenir compte des impératifs en termes de propriétés mécaniques, de résistance à l'échauffement, de radio-opacité.

Dans ce travail de thèse nous allons essayer d'acquérir la maîtrise de l'ensemble de la chaîne technique et technologie nécessaire à la réalisation de modèle dentaire imprimé en 3D. En termes de réalisation pratique, nous allons nous intéresser à la molaire maxillaire, son niveau de difficulté étant assez élevé.

2. Chaîne technique et technologique de l'impression 3D



Figure 9 : Illustration de différents objets imprimables dans différents domaines (7)

L'impression 3D se démocratise, devient de plus en plus abordable et nous permet d'envisager la réalisation de modèles pédagogiques sur mesure. Ainsi, maîtriser la chaîne technique et technologique pour la réalisation de modèles dentaires en Endodontie permettrait de proposer différents types d'anatomies canales spécifiquement adaptées aux différentes séances de travaux pratiques. Cela permettrait également d'alléger considérablement les coûts pour l'École de chirurgie dentaire.

La fabrication de dents en résine permettrait aux établissements d'enseignement d'être indépendants en produisant et gérant le stock nécessaire pour leurs travaux pratiques. Maîtriser la chaîne technologique leur permettrait également d'avoir la liberté de fabriquer différentes configurations canales de plus en plus complexes et donc avec des niveaux de difficulté croissants.

Plusieurs imprimantes 3D sont disponibles sur le marché. Leurs coûts, qualités et rapidité d'impression varient ainsi que leurs possibilités en termes de taille, texture et couleur de l'objet imprimé. Les imprimantes 3D sont généralement classées selon la technique d'impression qu'elles utilisent. La stéréolithographie (SLA) est considérée comme le procédé à l'origine de l'impression 3D, avec le premier équipement breveté en 1984 par Charles Hull et la première imprimante commerciale développée par « 3D Systems » en 1988. (8) Les imprimantes SLA utilisent un laser pour photo-polymériser couche après couche l'objet désiré sur un plateau d'impression immergé dans le bac de résine liquide. Dès qu'une couche est réalisée, le plateau remonte selon l'épaisseur de la couche et l'opération est renouvelée (figure 10). Les imprimantes SLA ne doivent pas être confondues avec les imprimantes DLP, moins précises, qui utilisent un projecteur (figure 11).

La SLA ne requiert pas de compétences spécifiques en fabrication et est adaptée à l'utilisation dans de petites structures (2). La complexité réside principalement dans l'élaboration des modèles numériques 3D des fichiers à imprimer.

	Précision	Technique	Utilisation	Vitesse d'impression	Coût
SLA (Stéréolithographie)	25 µm(8)	Photo-polymérisation par rayons Ultraviolets (UVs) point par point grâce à un laser	Accessible	14 mm/h	À partir de 4 000 €
DLP (« Digital Light Processing » Traitement numérique de la lumière)	40 µm(7)	Photo-polymérisation d'une zone entière grâce à un projecteur(3)	Accessible	200mm/h	À partir de 4000 €
SLS (« Selective Laser Sinterings » Frittage sélectif par laser)	50 µm(7)	Impression couche par couche par laser CO2	Accessible	48 mm/h	À partir de 6 000 €
MultiJet / PolyJet (Technologie par jet de matière)	16 µm(7)	Projection de gouttelettes de résine photopolymérisée par des rayons UVs Multi- matériaux et polychrome	Technique	Rapide 350 millions de gouttes par seconde(9)	À partir de 10 000 €

Tableau 7 : Tableau décrivant les principaux procédés de fabrication additive ainsi que leur précision, leur technique, leur utilisation, leur vitesse d'impression ainsi que leur coût.

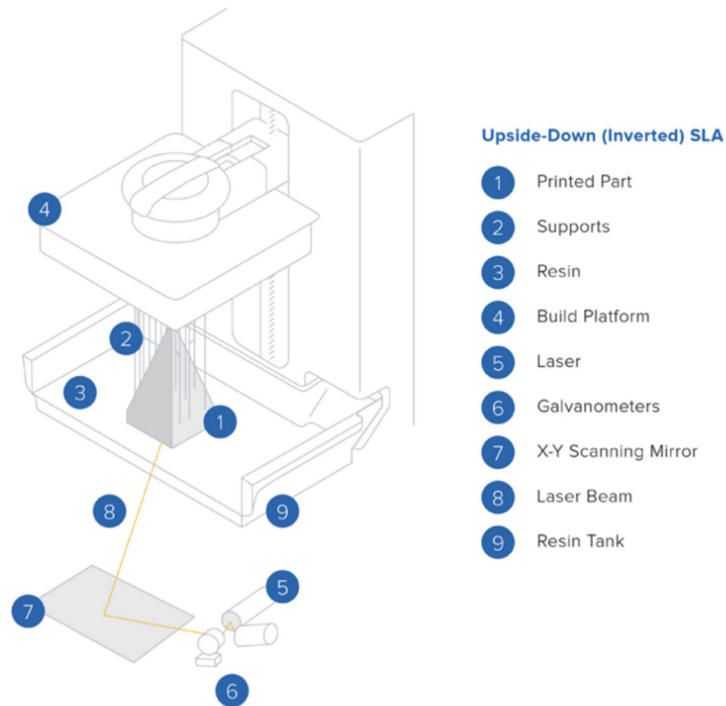


Figure 10 : Schéma détaillé du processus d'impression par stéréolithographie (SLA)(9).

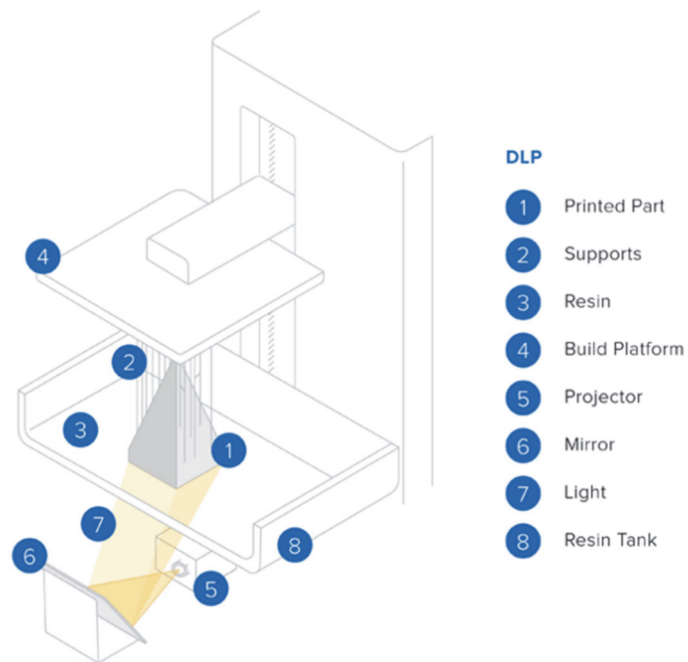


Figure 11 : Schéma détaillé du processus d'impression par traitement numérique de la lumière (DLP)(9).

Le modèle numérique 3D peut être créé entièrement grâce à un logiciel de modélisation, c'est ce que l'on appelle la conception assistée par ordinateur (CAO). Cette technique permet de créer un modèle numérique librement mais cela nécessite des compétences en

informatique ainsi que du temps. On peut également utiliser un scanner optique pour reproduire la surface d'un modèle existant, cependant dans le cas de modèle dédié à l'Endodontie cette technique ne nous permet pas d'acquérir l'endodonte.

La dernière solution consiste à utiliser un scanner utilisant des rayons X. Cela permet d'acquérir en un temps les surfaces externe et interne du modèle désiré.

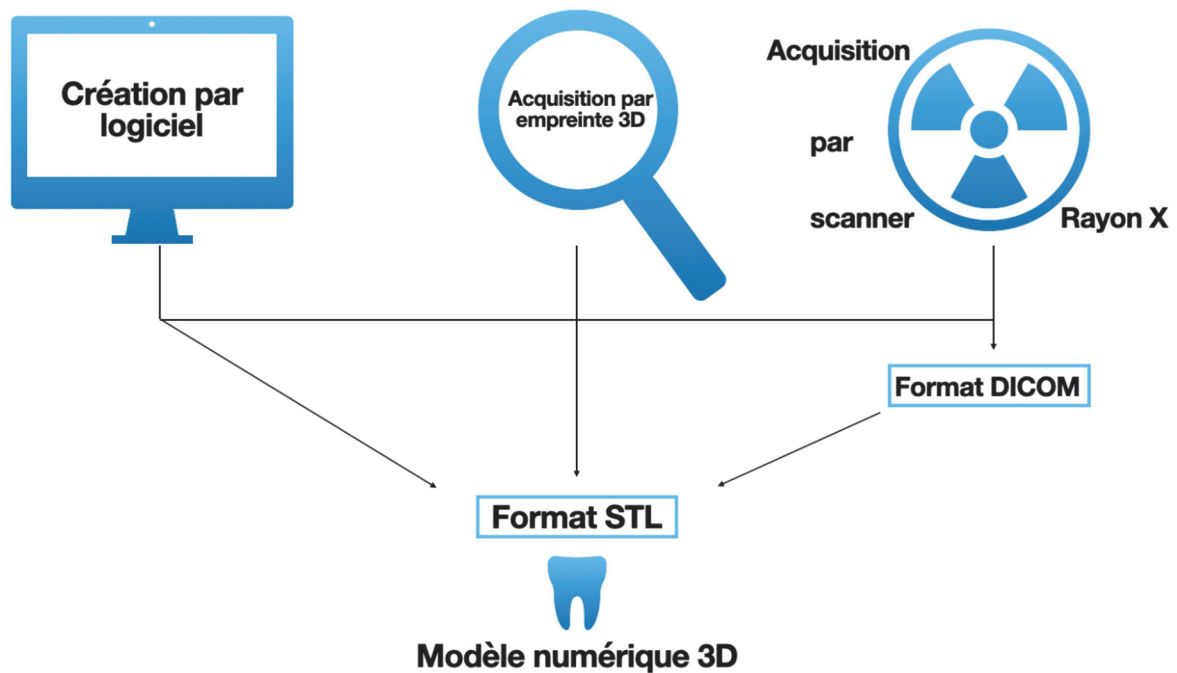


Figure 12 : Chaîne de modélisation et d'acquisition d'un modèle numérique 3D à partir d'un logiciel, d'une empreinte numérique endo-buccale ou d'un examen radiographique.

3. Matériels et méthodes

Les dents issues de l'impression 3D en résine doivent remplir un cahier des charges précis. Elles doivent être adaptées aux travaux pratiques et doivent permettre de réaliser une cavité d'accès afin de réaliser la préparation des canaux, un examen radiographique ainsi qu'une obturation à chaud. Le but est de créer des dents artificielles proches de l'anatomie réelle, qui seraient une alternative à l'utilisation de dents naturelles extraites ou de dents issues d'un fabricant externe.

Pour rappel, l'objectif de cette thèse est d'évaluer et de valider le protocole de fabrication par impression 3D d'une première molaire maxillaire choisie pour son anatomie canalaire riche et complexe.

3.1 Obtention du modèle numérique

Concernant l'obtention du modèle numérique, nous avons retenu une approche mixte s'appuyant sur la numérisation d'une dent naturelle (dent numéro 26) puis sur l'édition et le raffinement des fichiers ainsi obtenus.

Concernant la numérisation, nous utiliserons la tomographie volumique à faisceau conique (ou CBCT pour Cone Beam Computed Tomography) afin d'obtenir à la fois la surface du modèle mais également son endodonte.

Le fichier DICOM (Digital Imaging and COmmunication in Medecine) obtenu sera segmenté via le logiciel 3D Slicer V4.11. Le processus de segmentation nous donnera deux fichiers STL (STereo-Lithography) qui pourront être édités via le logiciel MeshMixer V3.3.15.

3.1.1 Sélection de la dent naturelle

La première étape a consisté en la sélection de notre dent naturelle modèle. Des critères d'exclusion ont été définis et concernent en priorité les racines. Sont donc exclues les molaires maxillaires ayant des racines immatures, des canaux pulpaire non visibles aux rayons X, des oblitérations canalaires ou encore des courbures extrêmes. Les molaires avec un important délabrement ou avec des restaurations coronaires ou coronoradiculaires sont également exclues (figures 13 et 14).

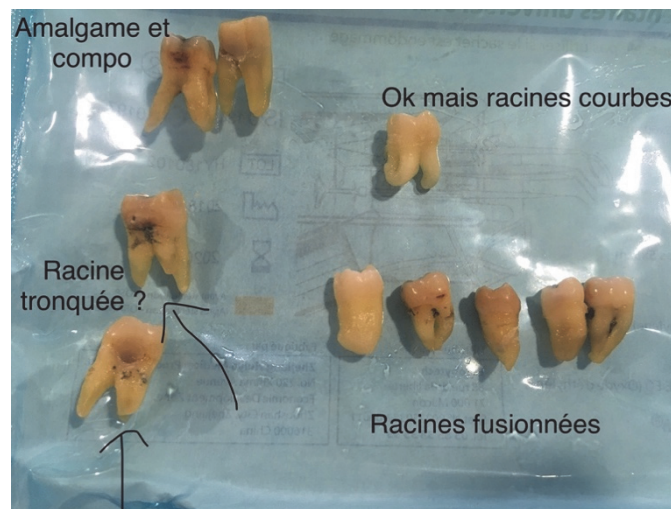


Figure 13 : Sélection des molaires modèles selon les critères d'inclusion et d'exclusion.

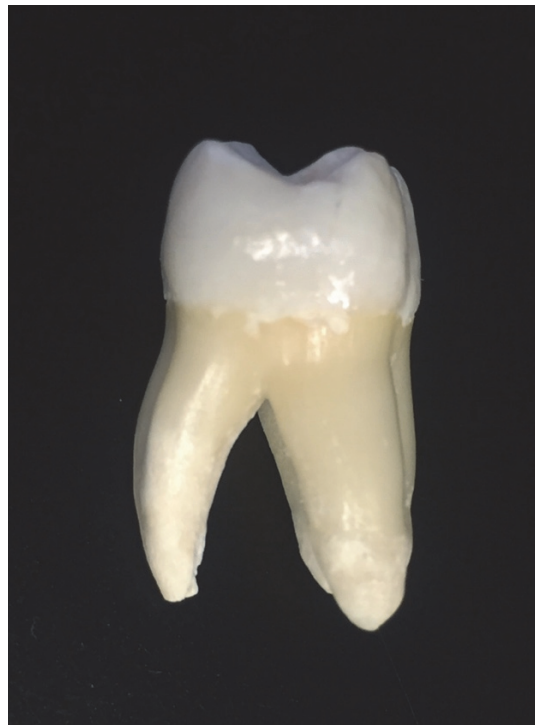


Figure 14 : Photo de la molaire naturelle modèle retenue qui est une première molaire maxillaire gauche numéro 26.

3.1.2 Acquisition tomographique de la dent naturelle

L'acquisition tomographique a été réalisée via un CBCT « ProMax 3D » de la marque PLANMECA® (figure 15). Le système est constitué d'un générateur de rayons X qui émet un faisceau de forme conique traversant l'objet à explorer. Ce faisceau réalise autour du sujet une rotation qui peut être complète (180° à 360°) et qui permet d'acquérir des données numériques dans les différents plans de l'espace. Ces données sont ensuite transmises à un ordinateur pour reconstruction volumique (10).



Figure 15 : Photographie du CBCT de la marque PLANMECA®, pavillon d'Odontologie de la Timone, AP-HM, Marseille.

La dent naturelle a été positionnée sur un socle constitué de matériau radio-clair pour faciliter des étapes de traitement de fichier DICOM obtenu (figure 16). L'acquisition a été réalisée en haute résolution (150 μm).



Figure 16 : Dent n°26 sur le support dédié avant son examen radiographique, pavillon d'Odontologie de la Timone, AP-HM, Marseille.

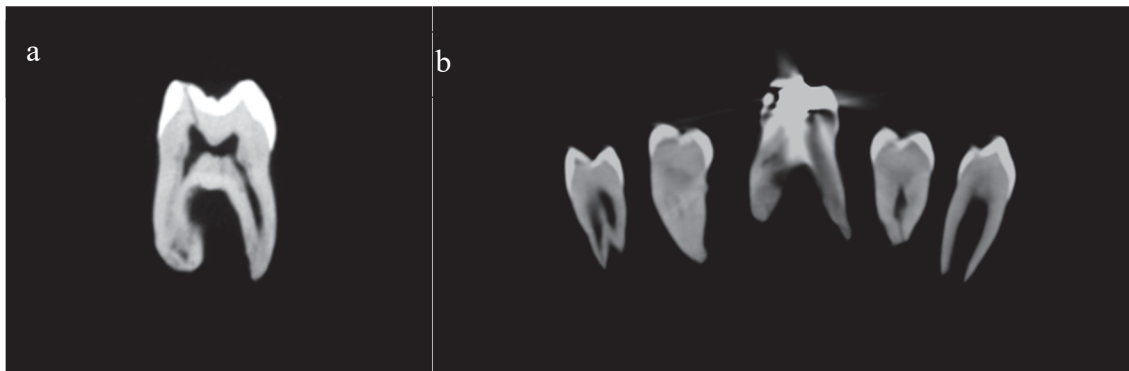


Figure 17 : a) Image de la dent naturelle modèle issue d'un fichier DICOM. b) Image d'autres dents testées préalablement issue d'un fichier DICOM.

3.1.3 Segmentation du fichier DICOM

Le fichier DICOM obtenu a ensuite été segmenté. Cette étape consiste à isoler les régions d'intérêt pour en obtenir un fichier STL.

Nous avons eu recours à deux segmentations réalisées via le logiciel 3D Slicer V4.11.

La première segmentation consiste en la sélection rapide des tissus durs dentaires à l'aide des différents niveaux de radiodensité. En effet, selon l'échelle des Unités Hounsfield (UH), il est possible grâce à la reconnaissance du logiciel, de différencier les tissus durs dentaires des tissus mous comme la pulpe dentaire.

Ensuite, nous avons réalisé une deuxième segmentation plus précise mais plus longue car manuelle. Cette deuxième segmentation nous a permis d'isoler la pulpe dentaire uniquement.

Enfin, nous avons pu combiner les deux fichiers issus des segmentations, c'est-à-dire soustraire au fichier issue de la première segmentation le volume pulpaire issue de la deuxième segmentation afin d'obtenir le modèle final. Cette dernière étape a été réalisée grâce au logiciel Meshmixer v3.3.15.

Tout ceci est fastidieux mais nécessaire pour réussir à imprimer un objet tridimensionnel avec un « endodonte » le plus réaliste possible.



Figure 18 : Logos des logiciels gratuits utilisés pour ce travail : 3D Slicer V4.11 et Autodesk Meshmixer V3.3.15.

Nous avons effectué une série de captures d'écran afin de détailler les étapes à suivre pour obtenir le fichier STL définitif depuis le fichier DICOM. Dans un premier temps il est nécessaire d'importer le fichier DICOM sur 3D Slicer (figure 19), de sélectionner le module « Segmentation Editor » (figure 20) et d'utiliser la fonction « Threshold » (figure 21) pour obtenir fichier STL Molaire (figures 22, 23 et 24).

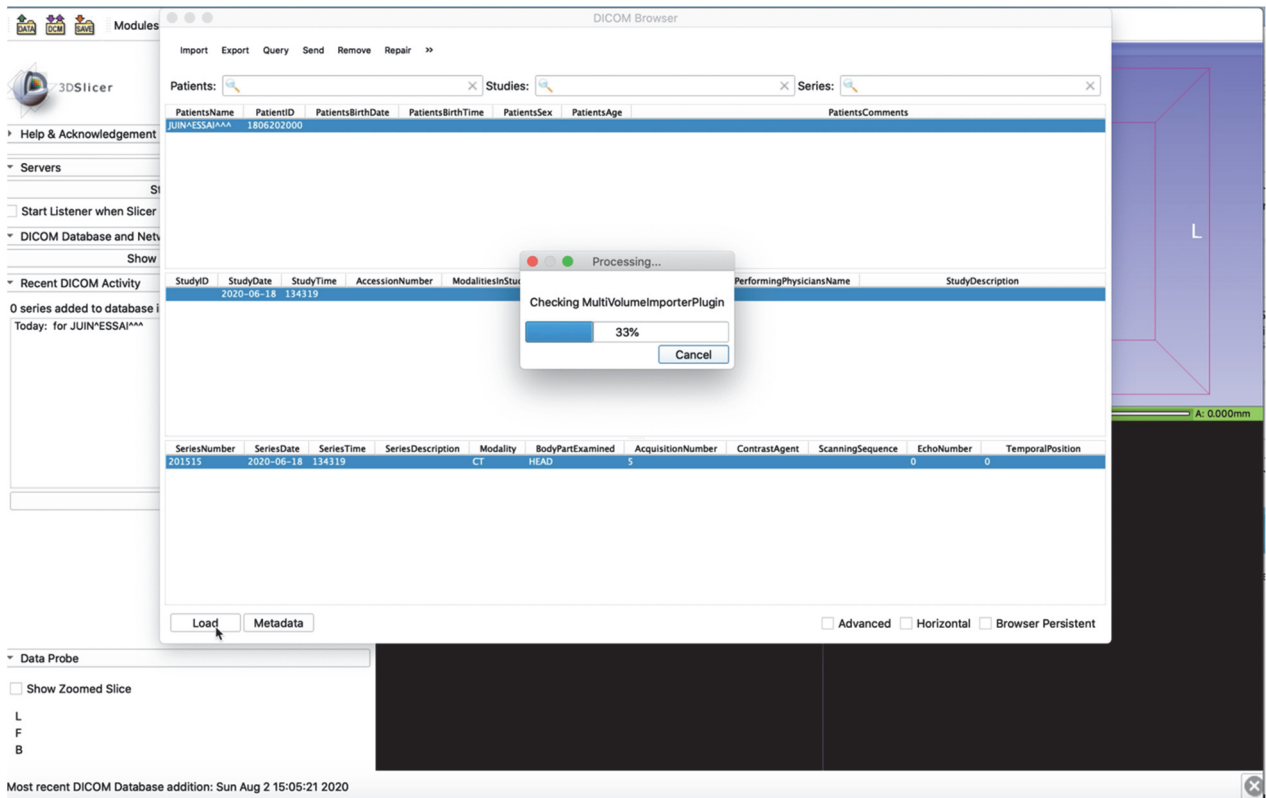


Figure 19 : ÉTAPE 1 : Importation du fichier DICOM dans le logiciel 3D Slicer.

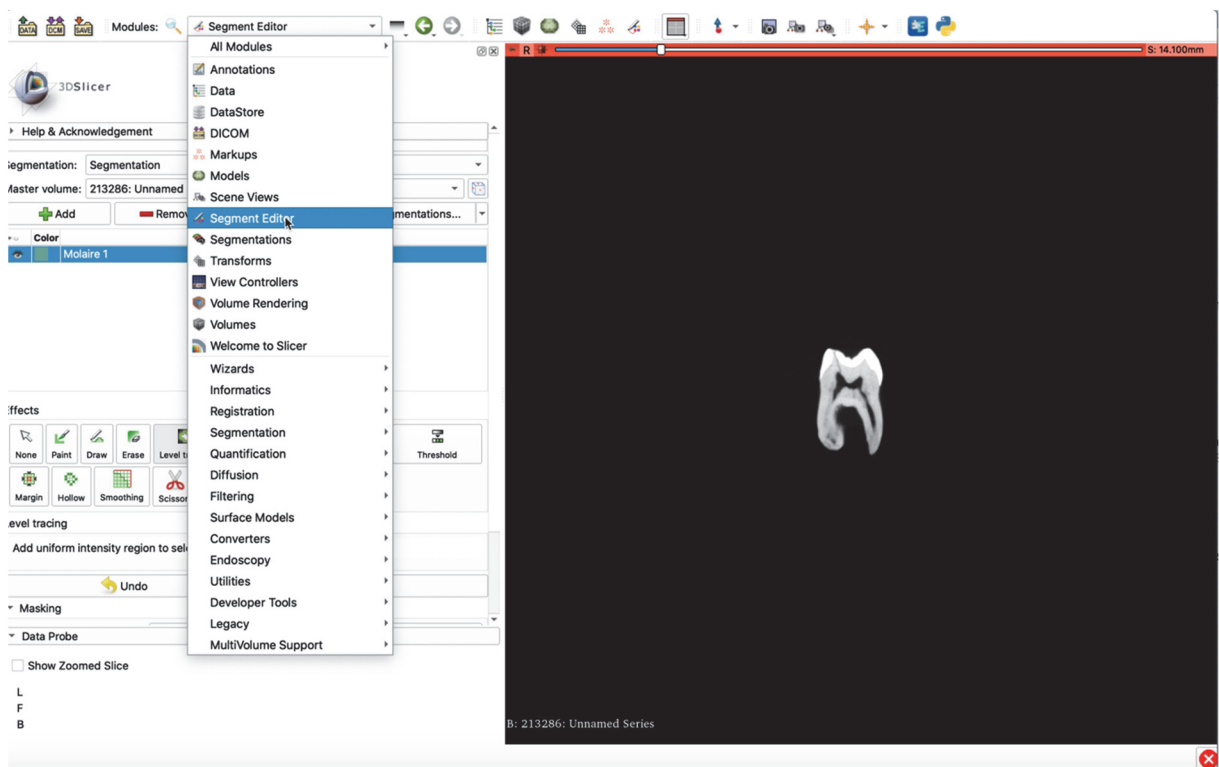


Figure 20 : ÉTAPE 2 : Choisir l'onglet « Segment Editor » afin de segmenter le fichier DICOM. Ajouter une nouvelle segmentation, choisir sa couleur et la renommer (renommée ici « Molaire 1 »).

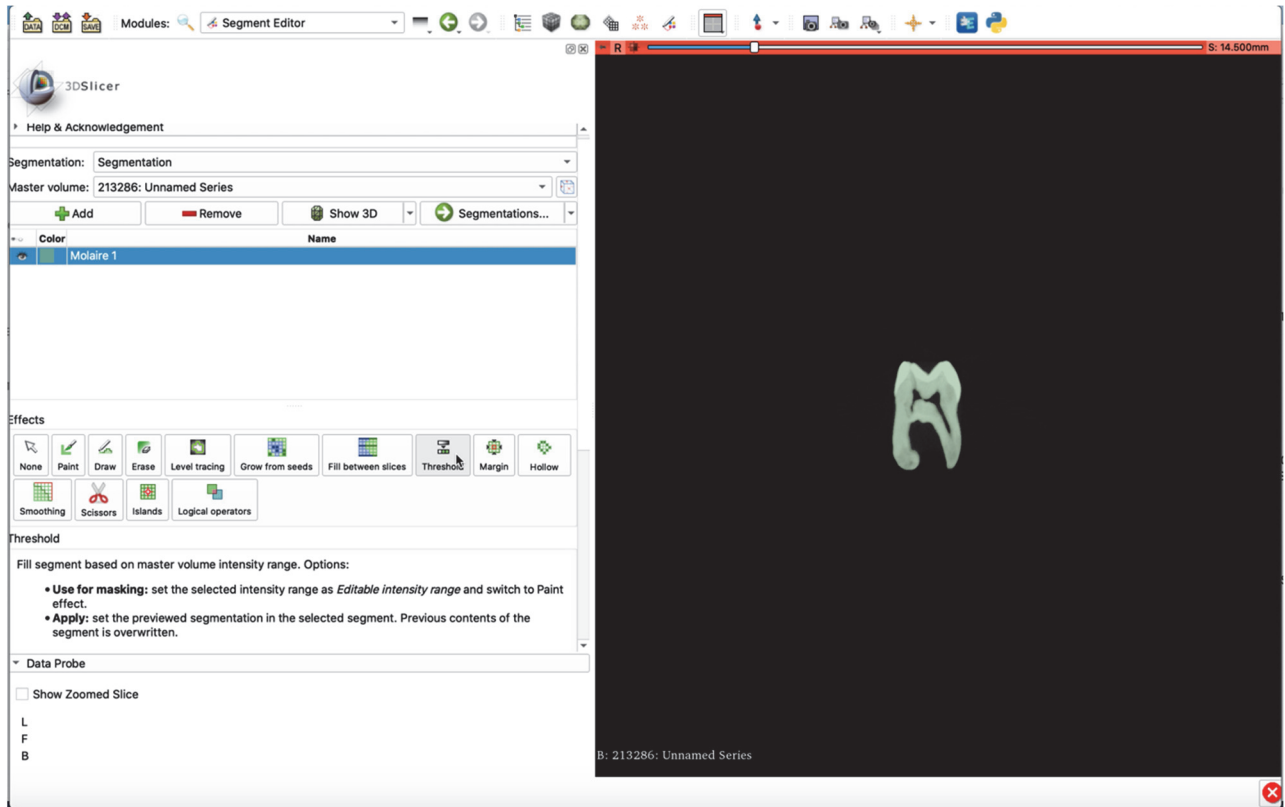


Figure 21 : **ÉTAPE 3** : Utiliser la fonction « Threshold ». Cette fonction permet de facilement sélectionner l'ensemble des zones minéralisées en se basant sur une échelle de radiodensité.

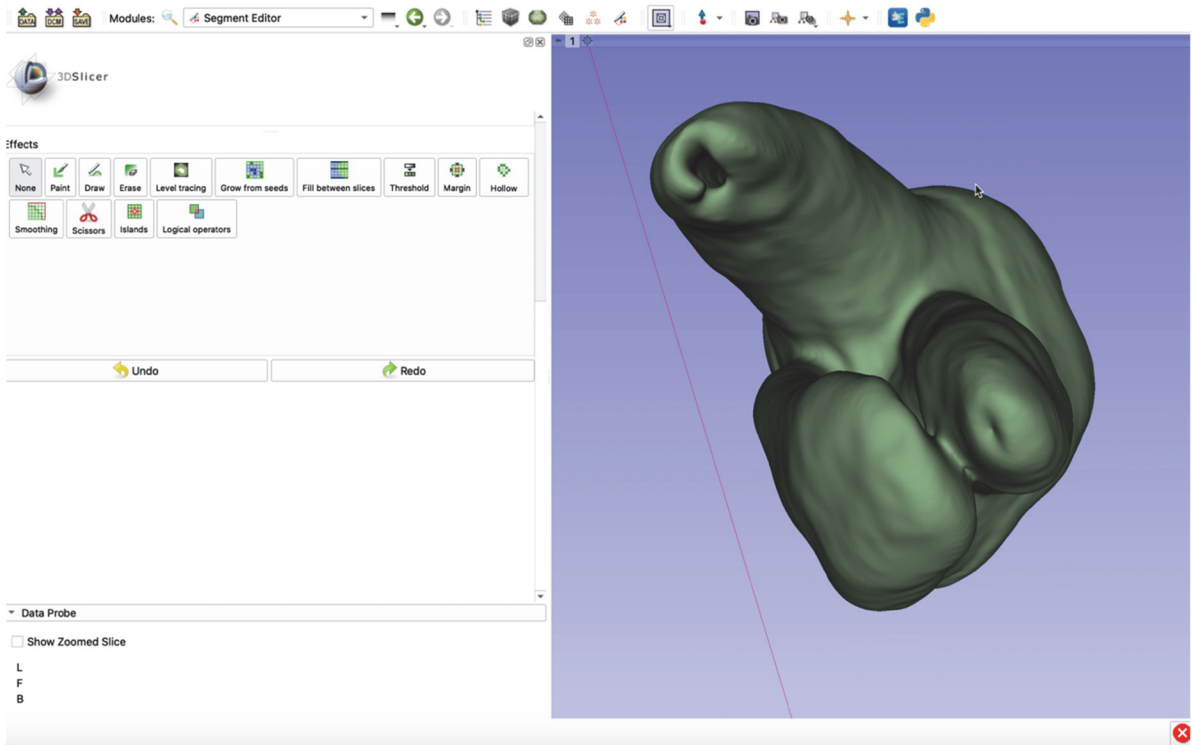


Figure 22 : La visualisation en temps réel de la sélection est disponible sur les images en coupes. Pour cela « appliquer » les changements effectués et sélectionner « Show 3D » pour visualiser le résultat obtenu en trois dimensions.

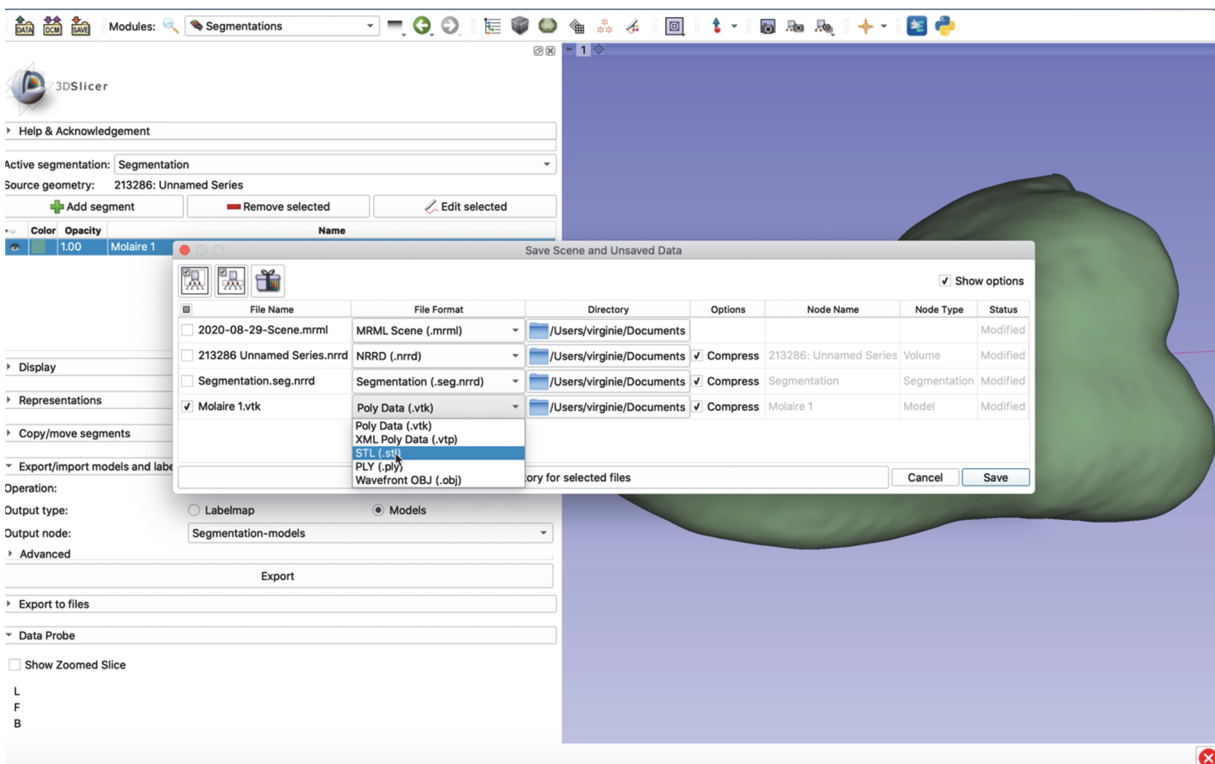


Figure 23 : ÉTAPE 4 : Enregistrer le modèle 3D au format STL. Nous l'appellerons « fichier STL Molaire ».

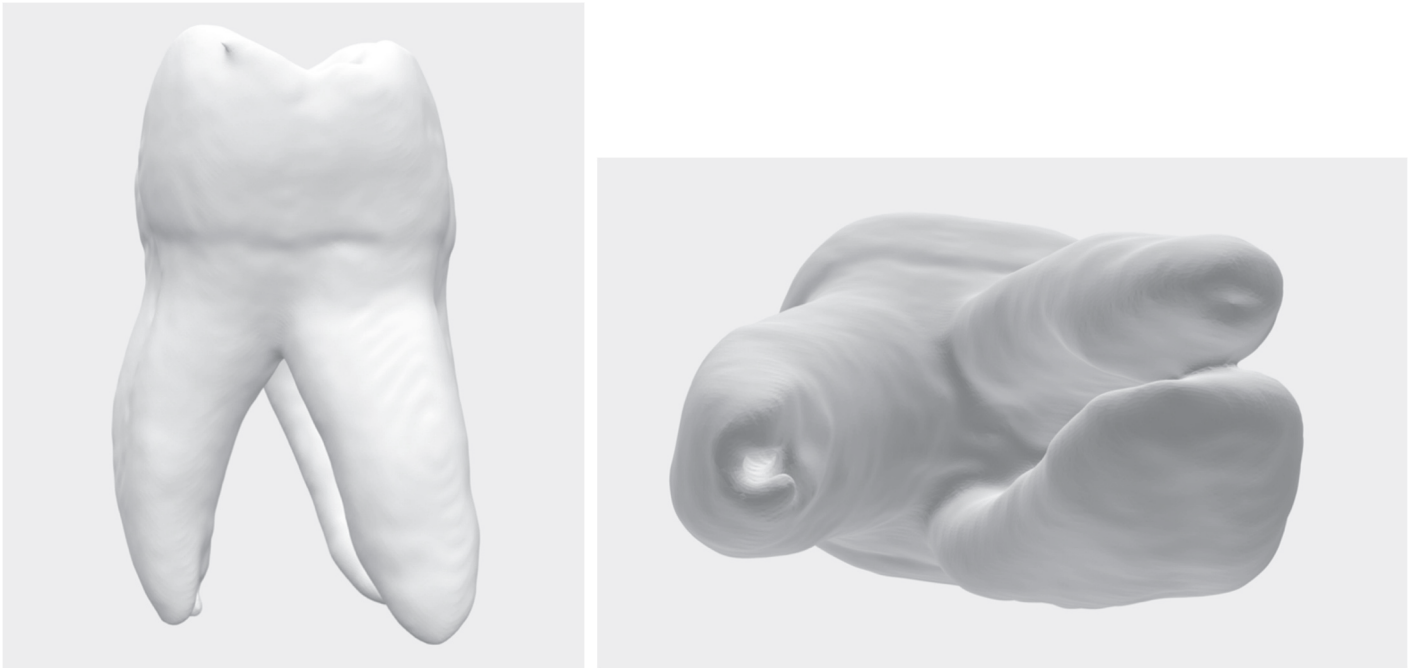


Figure 24 : Images du fichier STL Molaire obtenu avec le logiciel Slicer (Vue proximale à gauche. Vue depuis l'apex radiculaire à droite avec mise en évidence de la racine palatine avec le foramen apical dénué de la pulpe.

Une fois le fichier STL Molaire obtenu, nous passons à la segmentation précise du volume pulpaire via l'outil « Level Tracing » (figure 25).

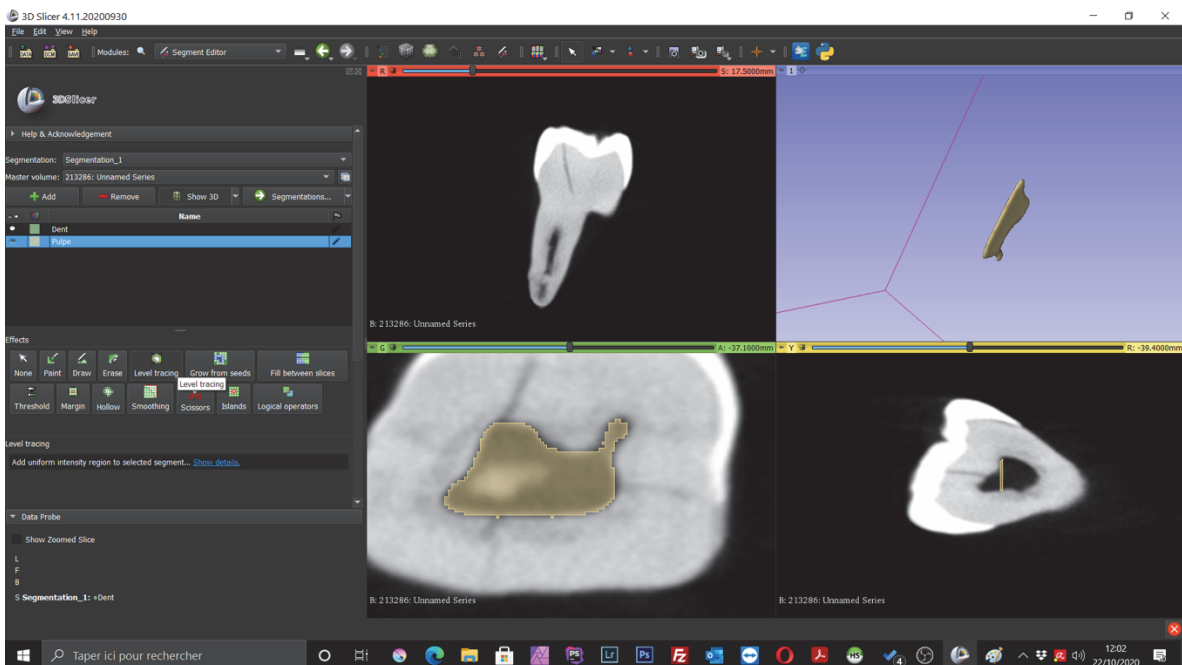


Figure 25 : ÉTAPE 5 : L'objectif est d'obtenir un fichier STL avec un véritable système endodontique. Pour cela, nous allons sélectionner cette fois-ci uniquement la pulpe avec la fonction « Level Tracing » en progressant couche par couche de la couronne vers l'apex de la dent.

Nous obtenons alors la pulpe seule visualisable (après application de la segmentation) en cliquant sur le bouton « SHOW 3D ». Nous appelons alors ce fichier obtenu « fichier STL SegmentationPulpe » (figure 26).



Figure 26 : Image du fichier STL obtenu appelé fichier STL SegmentationPulpe.

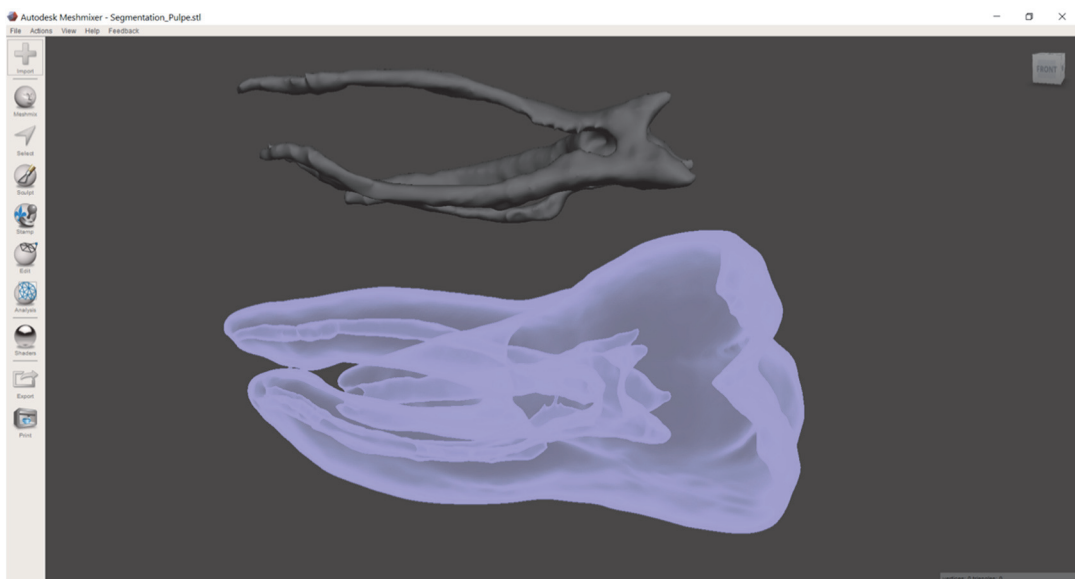


Figure 27 : ÉTAPE 6 : Le fichier STL représentant le volume pulpaire est ensuite retouché (lissé) sur le logiciel MeshMixer.

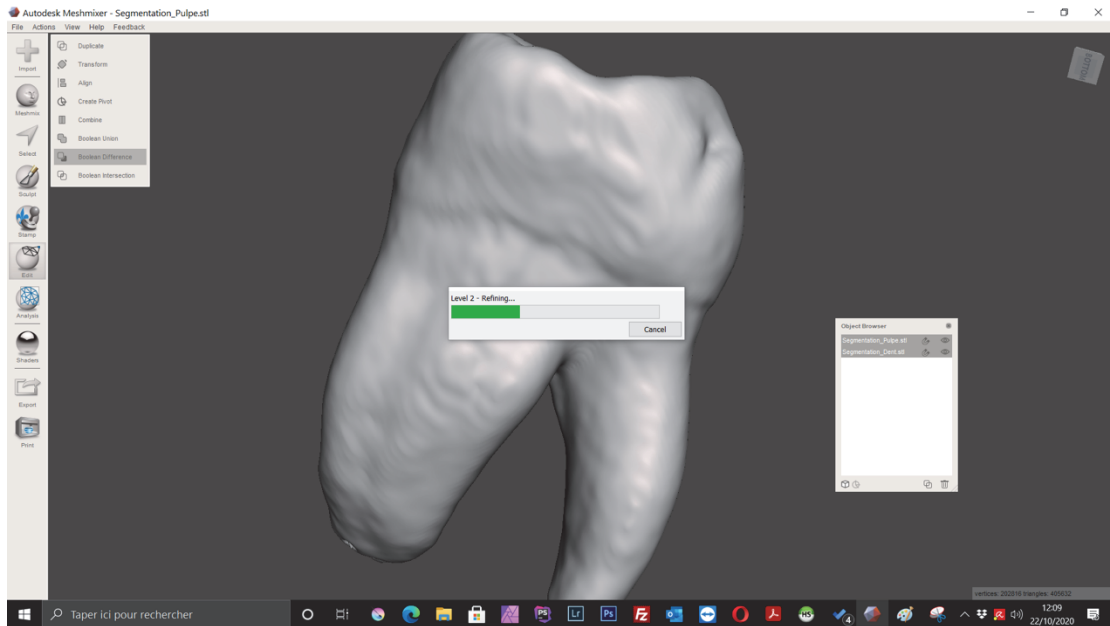


Figure 28 : Il est ensuite fusionné avec le fichier STL Molaire pour obtenir le fichier STL final à partir duquel nous allons pouvoir réaliser notre impression 3D. Nous utilisons la fonction « Edition Transformation », nous transférons la pulpe à l'intérieur de la dent puis nous demandons la « différence ».

STL SegmentationPulpe est soustrait au volume du fichier STL Molaire sous Meshmixer (figures 27 et 28) afin d'obtenir le fichier final.

3.2 Impression 3D du modèle numérique

L'impression du modèle a été réalisée sur une imprimante FORM3 (Formlabs) acquise par l'école de chirurgie dentaire en 2020 (figure 32). Cette imprimante est basée sur une technologie stéréolithographique propriétaire (la Low Force Stereolithography (LFS™)) qui utilise un bac à résine flexible pour réduire les forces de décollement au niveau du bac pendant l'impression.

Cette résine photosensible va être polymérisée par un laser guidé par des miroirs pendant que le plateau d'impression remonte au fur et à mesure de la construction. La puissance du laser est de 250 mW et la taille du faisceau de 85 μm . Cette imprimante nous permet d'imprimer nos modèles pédagogiques avec une précision verticale de 50 μm . Cette précision est variable selon la résine utilisée, et peut être augmentée jusqu'à 25 μm .



Figure 29 : Image de la Form3 (7)

3.2.1 Préparation et lancement de l'impression 3D

L'impression des modèles se fait via le logiciel Pre-Form. Il est gratuit et téléchargeable sur le site Formlabs.

Une fois le fichier STL chargé sur Pre-Form, le logiciel permet de paramétrer et de prévisualiser précisément notre modèle avant impression. Nous pouvons définir le nombre de modèles à imprimer, éventuellement modifier leur taille (inutile dans notre cas) ainsi qu'agencer les modèles sur le socle afin d'en imprimer au maximum sans réduire leur qualité d'impression. Le logiciel permet également de générer les supports d'impression qui correspondent à de fines tiges qui évitent que les modèles soient imprimés directement contre la plaque d'impression. À tout moment, le logiciel permet de vérifier l'imprimabilité du modèle. En effet, si notre modèle est mal orienté ou ne présente pas assez de supports par exemple, le logiciel nous indiquera que l'imprimabilité est mauvaise et nous conseillera pour l'améliorer.

Concernant l'orientation des modèles, il est intéressant de préciser que si le modèle est horizontal, alors il y aura plus de supports et l'impression sera plus rapide par rapport à une orientation verticale de la dent car le laser aura moins de couche à polymériser. Aussi, une orientation verticale de la dent lui donnera plus de poids et elle risquerait de se détacher du socle d'impression.

Concernant la génération des supports d'impression, il est important de vérifier que les supports ne soient pas centrés sur les foramens apicaux des dents à imprimer puisque cette zone est très importante pour l'évacuation de la résine. Si c'est le cas, nous devons déplacer manuellement ces supports (figure 30).

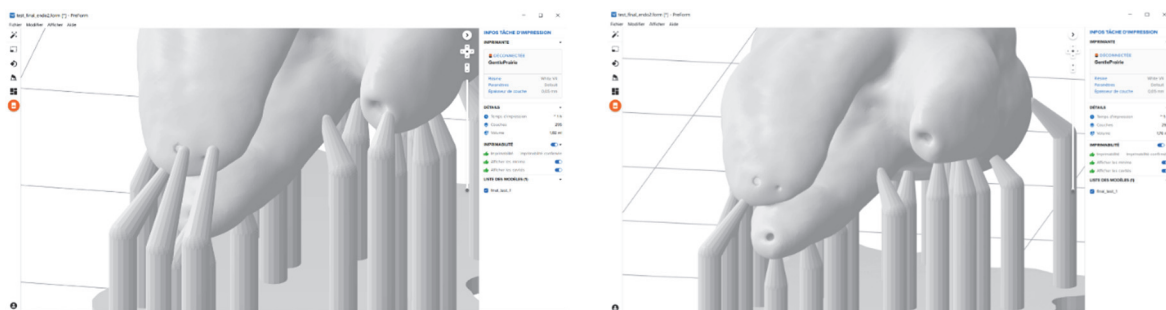


Figure 30 : Captures d'écran du logiciel Pre-Form lors de l'étape de génération de supports. Attention, les supports ne doivent pas être en contact avec les foramens apicaux (comme sur l'image de gauche) car c'est une zone d'évacuation de la résine qui est fragile et qui doit être précise. Les supports doivent être à distance de ceux-ci (comme sur l'image de droite).

Avant de lancer l'impression, il faut vérifier le type de résine et la précision d'impression sélectionnée. Dans notre cas, nous avons utilisé la résine FLGPWH02 de Formlabs avec une finesse d'impression de 50µm.

Avant de lancer l'impression, on peut noter la quantité de résine qui sera utilisée et le temps estimé d'impression. Dans notre cas, pour 12 molaires imprimées en 50µm, le temps d'impression estimé a été de 4h30 et le volume de résine utilisée a été estimé à moins de 20ml (figure 31).

L'impression est directement lancée depuis le logiciel Pre-Form. Une fois les informations récupérées par l'imprimante via le WIFI, l'impression est totalement autonome.

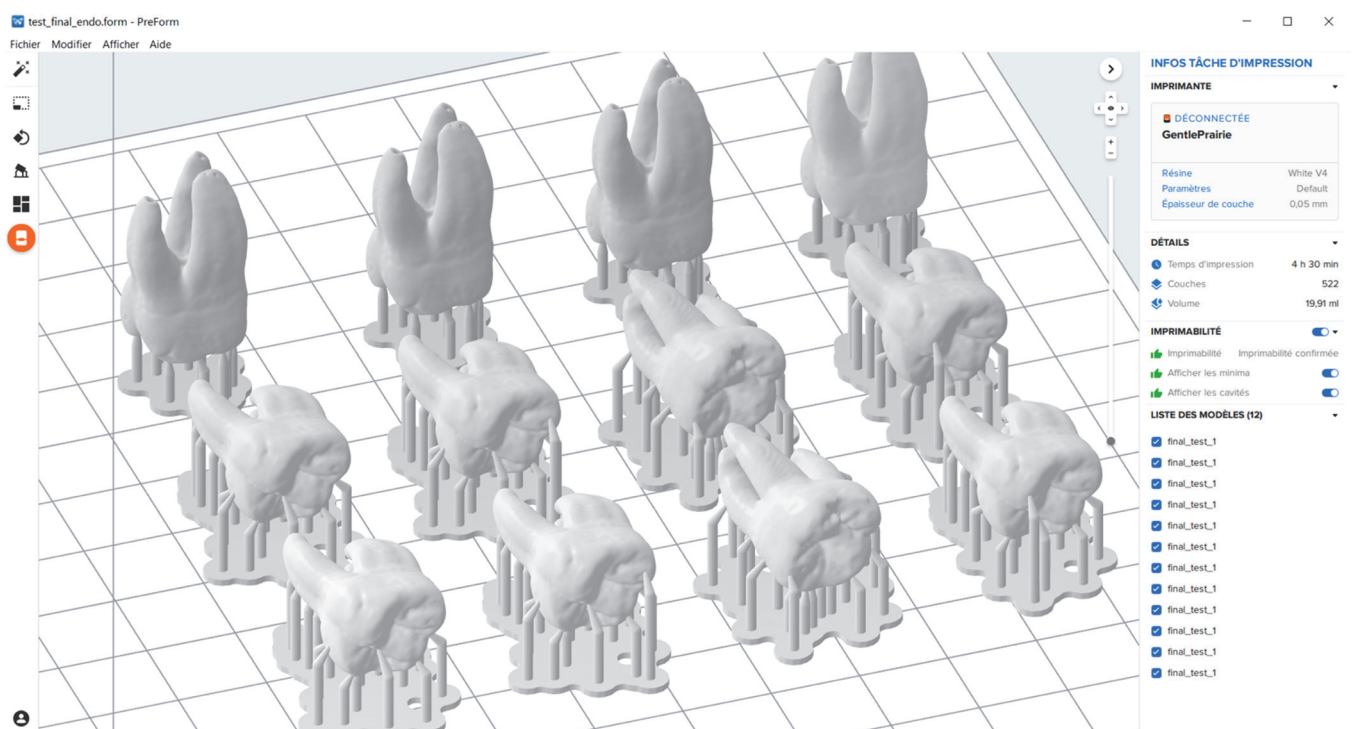


Figure 31 : Capture d'écran du logiciel Pre-Form lors de l'étape de vérification avant impression.

3.2.2 Récupération des modèles imprimés

Après avoir terminé l'impression de 12 modèles pédagogiques en 5 heures (seuls les 8 imprimés horizontalement ont été exploitables), il faut alors les détacher du plateau d'impression (figures 32 et 33) puis passer aux étapes de post-traitement.

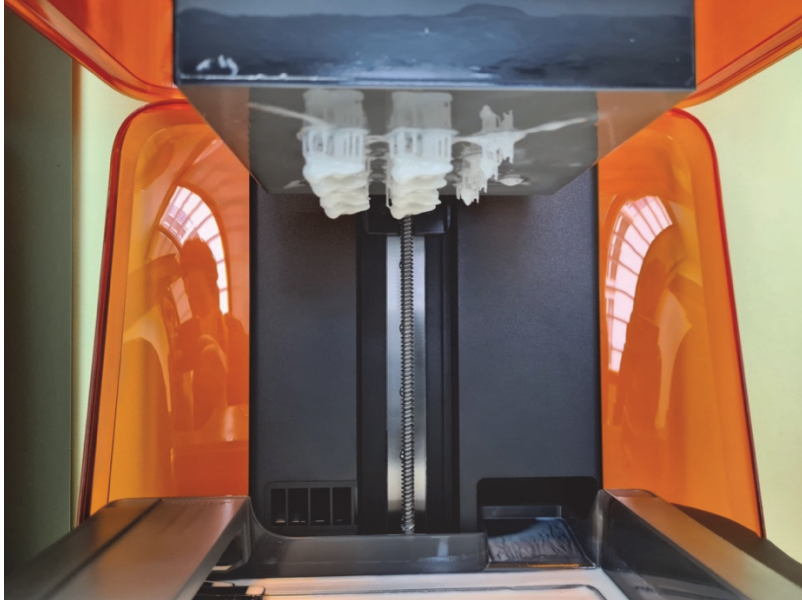


Figure 32 : Photographie du plateau d'impression dans l'imprimante 3D à la fin de l'impression. Nous pouvons remarquer les dents qui apparaissent sur le plateau avec leurs supports (tiges d'impression attenantes à la dent qu'il conviendra de détacher de chaque dent).

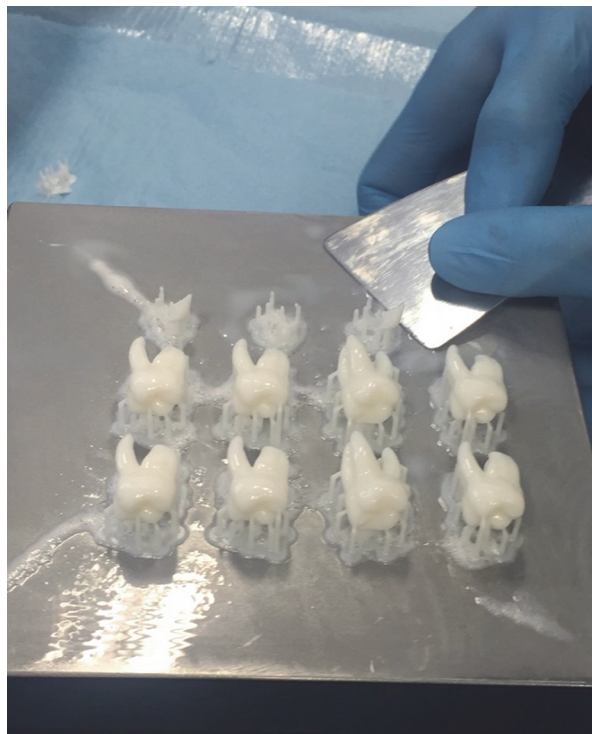


Figure 33 : Photographie du plateau d'impression hors de l'imprimante sur lequel nous pouvons voir les modèles imprimés. Étape de décollement des modèles.

3.3 Post-traitement des modèles imprimés

Une fois les modèles imprimés, des excès de résine non polymérisée résident dans l'espace canalaire. Ce dernier étant quasiment clos et ne communiquant avec l'extérieur de la dent qu'au travers de foramens apicaux très réduits, l'échappement d'une résine relativement visqueuse fut un véritable défi. En effet, les travaux pratiques d'Endodontie impliquant la préparation canalaire, nous nous devons dans ce projet de produire des modèles avec un réseau canalaire sans résidu de résine, sans quoi la perméabilité canalaire ne pourrait être assurée.

Nous avons pour cela recueilli plusieurs méthodes issues d'études pour parvenir à créer une dent avec un système canalaire vide. Dans l'étude de M. Reymus *et al.* un bac à ultrasons combiné à une centrifugeuse ont été utilisés. (2)

Par ailleurs, nous avons pu constater, de façon plus empirique, que l'utilisation d'un spray d'air au niveau d'un des deux foramens permettait une évacuation de la résine à la sortie du deuxième foramen. Cette méthode ne peut être retenue car effectuée individuellement pour chaque dent, elle s'avère chronophage mais également d'une faible efficacité.

Lors de ce travail, nous avons adopté la méthode combinant ultrasons et centrifugation. Nous avons donc plongé les modèles imprimés dans un bac à ultrasons contenant de l'alcool isopropyl pendant 2*2 minutes puis nous les avons placées dans une centrifugeuse 10 minutes à 3 500 tours par minute (figures 37, 38 et 39).



Figure 34 : Photographie des dents en résine lors du traitement aux ultrasons.



Figure 35 ci-dessus : Photographie de l'étape de centrifugation 10 minutes à 3 500 tours par minute après passage dans un bac à ultrasons.



Figure 36 ci-dessus : Photographie illustrant la fuite de la résine non polymérisée par les forams se trouvant au fond du tube Falcon de 50mL suite à la centrifugation.

Nous avons pu constater que la résine a bien été éjectée par les forams apicaux suite à la centrifugation.

Une fois le système canalaire dépourvu de résine, les pièces sont placées dans un « FormCure® » et subissent ainsi une photo-polymérisation sous une longueur d'onde de 405 nanomètres pendant 30 minutes à 60 degrés Celsius afin de renforcer les propriétés mécaniques des modèles (figure 40).



Figure 37 : Image du « FormCure® » de chez FormLabs (7)

4. Résultats

Ce travail a permis d'obtenir, lors des derniers tests d'impression, 8 modèles de dent en résine compatibles avec une utilisation pendant les travaux pratiques d'Endodontie au sein de l'école de chirurgie dentaire. L'aspect visible des dents imprimées est fidèle à la réalité, en effet nous retrouvons les sillons occlusaux de manière précise en les comparant à la dent naturelle modèle (figures 42, 43 et 44).



Figure 39 ci-dessus : Photographie de la dent naturelle modèle à côté de la dent imprimée illustrant la similitude de la face occlusale.

Figure 38 : ci-dessus : Photographie de la dent naturelle modèle à côté de la dent imprimée illustrant leur similitude radiculaire



Figure 40 ci-dessus : Photographie de la dent imprimée en vue de dessous illustrant la précision des foramens apicaux. Notons les pics de résine près des foramens que sont les restes de supports détachés.

Ces dents en résine ont pu être testées dans les conditions de travail similaires de celles des étudiants lors des travaux pratiques. En effet, nous avons pu réaliser le traitement endodontique complet avec le même matériel utilisé pendant les travaux pratiques. L'obturation canalaire a pu être réalisée à l'aide d'un « Gutta Condensor » sans signe de faiblesse de la résine d'impression. La radiographie post-traitement endodontique permet d'évaluer l'étudiant de façon claire et précise (figures 41 et 42).

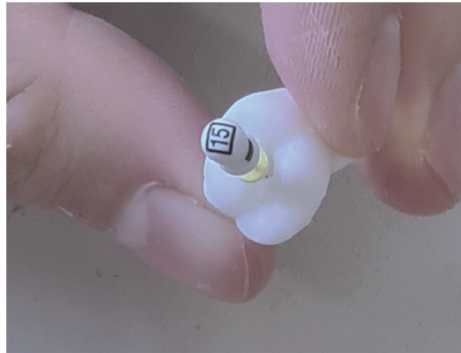


Figure 41 : Photographie illustrant la dent en résine lors de l'étape de la préparation canalaire.



Figure 42 : Image issue du logiciel de radiographie de l'École de Chirurgie Dentaire illustrant l'obturation de la dent en résine.

5. Discussion

Au cours de ce travail de thèse, nous avons effectué plusieurs essais d'impression 3D. Les derniers résultats obtenus et présentés dans la section précédente sont prometteurs pour une utilisation en séance de travaux pratiques d'Endodontie.

Lors de la préparation de la cavité d'accès à la fraise boule diamantée, nous avons été surpris par la dureté et la texture de la dent qui n'était pas si faible compte tenu de la résine utilisée pour l'impression. Nous avons pu vivre la sensation d'effraction pulpaire lorsque la fraise franchit le plafond pulpaire. Cette sensation est très importante pour l'étudiant car elle représente l'étape d'effraction pulpaire qui est un signal à ne pas rater. En effet il permet de signaler à l'opérateur le niveau de progression afin d'éviter toute perforation du plancher radiculaire.

Puis nous avons atteint la chambre pulpaire qui est alors vide, ce qui valide le travail réalisé lors des étapes de post-traitement des modèles imprimés et qui prouve que l'objectif de ce travail est alors atteint.

Lors de la préparation canalaire, les instruments utilisés, tant manuels que motorisés, simulaient avec fidélité la sensation de travail contre les parois et l'espace canalaire. La dimension modélisée de l'espace pulpaire semble donc satisfaisante en particulier concernant les racines vestibulaires.

Pour arriver à ce résultat, il a bien sûr fallu, dans un premier temps, nous renseigner sur les logiciels disponibles pour segmenter des fichiers DICOM et pour éditer des fichiers STL. Dans le cadre de cette thèse nous avons opté pour les logiciels 3D Slicer V4.11 et Autodesk Meshmixer V3.3.15 pour leur gratuité, leur large communauté d'utilisateurs et leurs fonctionnalités.

Concernant la segmentation du volume pulpaire, nous avons tout d'abord testé la fonction « Threshold » (basée sur la radiodensité). Ce mode d'action est rapide mais nous n'avons pas pu obtenir de résultat satisfaisant (figure 43). C'est pour cela que nous avons opté pour la fonction « Level Tracing ».

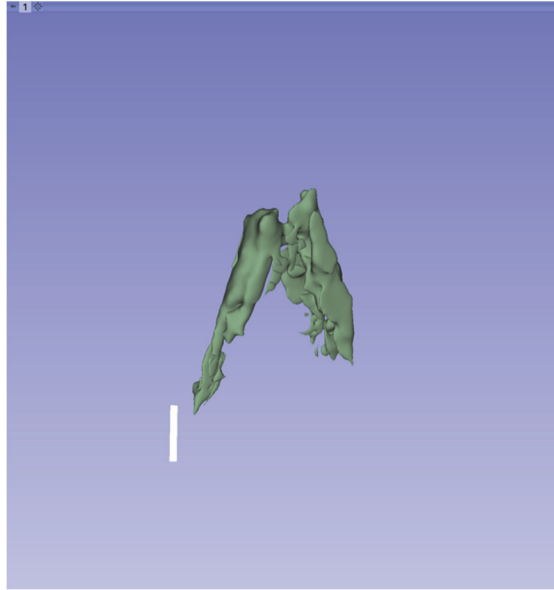


Figure 43 ci-dessus : Image de la vue 3D de la pulpe de la molaire modèle issue du logiciel Slicer suite à l'utilisation de l'outil « Threshold ».

Lors des tests préliminaires, nous avons utilisé le logiciel Slicer sur des fichiers DICOM de différentes dents. Comme nous pouvons le voir sur la figure ci-dessous, les dents avec des restaurations (comme de l'amalgame) provoquent des artefacts qui sont reproduits lors du passage du fichier DICOM en fichier STL (figure 44). C'est pour cette raison que nous n'avons pas retenu les dents présentant des restaurations lors de l'étape de sélection de la dent naturelle.

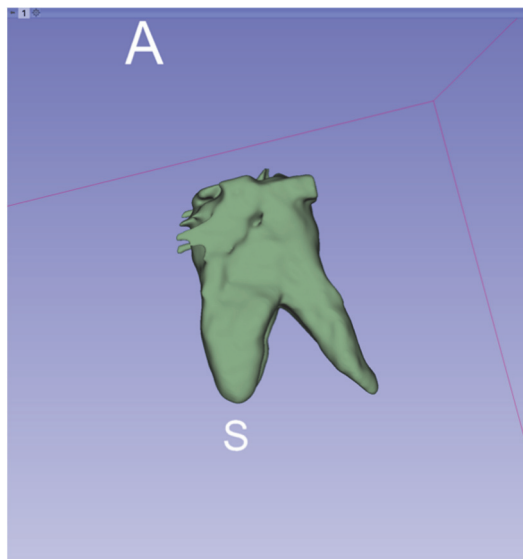


Figure 44 ci-dessus : Image de la vue 3D de la molaire avec restauration coronaire à l'amalgame issue du logiciel Slicer. On note la présence d'artefacts.

Les principales difficultés rencontrées dans ce travail sont liées à la complexité technique des étapes de segmentation nécessaires à l'obtention du modèle numérique. En effet, maîtriser le logiciel n'est pas facile et demande du temps. Néanmoins, lorsque le fichier segmenté est créé, il suffit de l'enregistrer puis de le réimprimer et cela devient assez rapide. Nous pourrions donc avoir toute une banque de fichiers avec différents types de dents avec plusieurs niveaux de complexité, prêts à être imprimés.

Dans la continuité de ce travail nous pouvons donc imaginer sur un court terme segmenter davantage de modèles numériques avec d'autres types de dents comme par exemple des prémolaires, des dents antérieures ou bien également des dents temporaires. Nous pourrions tenter d'améliorer les propriétés mécaniques des dents imprimées en utilisant d'autres types de résine afin d'essayer d'améliorer les caractéristiques mécaniques ou de radio opacité des dents imprimées. Enfin, nous pourrions également tenter d'imprimer avec différentes couleurs de résine, avec différentes textures également selon le tissu représenté. En effet, il existe des imprimantes qui impriment en plusieurs couleurs pour une même objet, ce qui permettrait d'avoir du rouge pour la pulpe par exemple afin de plonger au mieux l'étudiant dans une réalité clinique (11).

Aussi, l'impression 3D peut considérablement sécuriser notre pratique comme le montre cette expérience où un guide de cavité d'accès a été imprimé. Cela rend notre geste plus prédictif et plus serein. (12)

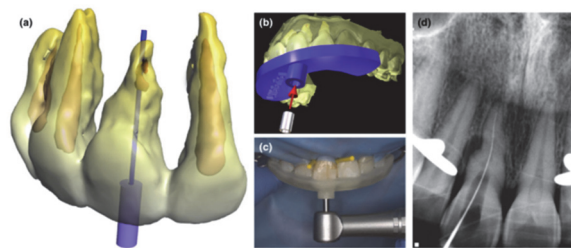


Figure 45 : Images illustrant la possibilité d'imprimer des guides pour localiser précisément le canal endodontique.

Le monde de la dentisterie évolue à grande vitesse vers une pratique de plus en plus numérique. Dans ce contexte, l'utilisation d'un localisateur d'apex lors des traitements endodontiques est indispensable afin de proposer à nos patients le meilleur traitement en lien avec les améliorations techniques de notre temps. Dans l'article de J. TCHORZ *et al.* il a été démontré que l'utilisation d'un localisateur d'apex est possible sur une dent

imprimée en résine. La longueur de travail a pu être alors estimée. Cela permet aux étudiants d'apprendre une pratique précise en la liant à une utilisation technique qui deviendra alors une habitude de tous les jours en pratique clinique. (13)

Concernant la simulation pratique des étudiants, nous pourrions modéliser une arcade dentaire afin de pouvoir l'imprimer en résine également. Les dents imprimées se clipseraient sur le modèle. De ce fait les étudiants pourraient réaliser leurs travaux pratiques, non plus en tenant leur dent dans la main mais en exerçant sur les fantômes ce qui permettrait d'adopter une bonne position de travail. Nous pourrions alors insister sur l'ergonomie et les difficultés de l'Endodontie liées à la position de la dent (12). De plus, il a été démontré qu'une arcade dentaire peut être imprimée afin de simuler une hémorragie pulpaire avec un liquide rouge logé dans un réservoir sous le modèle d'arcade. Il est également possible d'imprimer des guides pour traitement endodontiques afin de localiser au mieux le canal par exemple. (12)

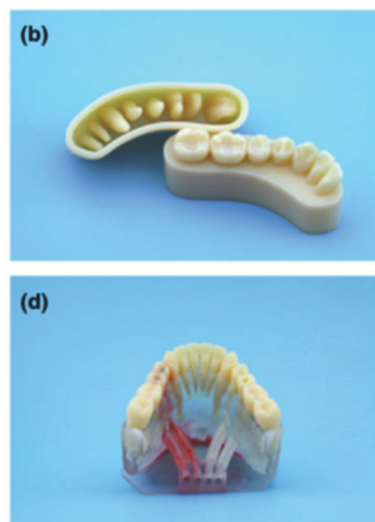


Figure 46 : Images de socles en forme d'arcades dentaires(b), avec des hémorragies pulpaires(d)(12)

Aussi, afin de reproduire au mieux la réalité anatomique, les dents pourraient être imprimées avec des calcifications pulpaires, des pulpolithes ou bien encore avec des lésions carieuses comme ce fut le cas lors du travail de thèse d'exercice du Dr Gattoni en 2020. (14)

Enfin, il est évident que l'impression 3D est un outil de création infini qui peut être au service de plusieurs disciplines comme la chirurgie orale, l'implantologie ou bien la traumatologie. En effet, dans cet article des modèles d'arcades ont été imprimés afin de simuler des fractures dentaires ainsi que des expulsions. (15)

Conclusion

En conclusion nous pouvons dire que les modèles de simulations sont primordiaux puisqu'ils permettent à l'étudiant d'apprendre un geste technique dans des conditions quasiment similaires aux conditions cliniques auxquelles il sera bientôt confronté.

Les modèles numériques 3D imprimés au cours de ce travail sont conformes à une utilisation lors de travaux pratiques d'Endodontie. Ils représentent le début d'une indépendance de l'École de Médecine Dentaire en termes de production de dents en résine.

L'obtention future de différents modèles de dents ne sera que bénéfique pour les étudiants concernant leur apprentissage et leur dextérité. Elle le sera aussi pour nos patients qui recevront alors le meilleur geste technique en accord avec les données actuelles.

Bibliographie

1. HAS. État de l'art (national et international) en matière de pratiques de simulation dans le domaine de la santé [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2012-01/simulation_en_sante_-_rapport.pdf
2. Reymus M, Fotiadou C, Kessler A, Heck K, Hickel R, Diegritz C. 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J.* 2019;52(1):123-30.
3. Schwam ZG, Chang MT, Barnes MA, Paskhover B. Applications of 3-Dimensional Printing in Facial Plastic Surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2016;74(3):427-8.
4. Camille Lemaitre. Évaluation des besoins d'enseignements pré-cliniques théoriques et pratiques des externes en endodontie [Internet]. Bordeaux; 2019. Disponible sur: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02418731>
5. Ahmed HMA, Versiani MA, De-Deus G, Dummer PMH. A new system for classifying root and root canal morphology. *Int Endod J.* 2017;50(8):761-70.
6. Gulabivala K, Ng Y-L. *Endodontics*. Edinburgh [u.a.: Mosby Elsevier; 2014.
7. Formlab [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://dental.formlabs.com/fr/form-3b/>
8. Susana Sanchez Restrepo. Le média de l'impression 3D [Internet]. 3dnatives. 2019. Disponible sur: <https://www.3dnatives.com/limpression-3d-par-stereolithographie-on-vous-explique-tout/>
9. SLA ou DLP : Comparaison des techniques d'impression 3D en résine (Guide 2020) [Internet]. <https://formlabs.com>. 2020 [cité 2021]. Disponible sur: <https://formlabs.com/fr/blog/sla-dlp-impression-3D-comparee/>
10. HAS. Tomographie volumique a faisceau conique de la face (cone beam computerized tomography) [en ligne]. 2012. Disponible à l'adresse : https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2009-12/rapport_cone_beam_version_finale_2009-12-28_17-27-28_610.pdf
11. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ.* 2019;83(9):1100-6.
12. Anderson J, Wealleans J, Ray J. Endodontic applications of 3D printing. *Int Endod J.* 2018;51(9):1005-18.

13. Tchorz JP, Hellwig E, Altenburger MJ. Teaching model for artificial teeth and endodontic apex locators. *J Dent Educ.*2013;77(5):626-9.
14. Clément Gattoni. Développement de modèles dentaires anatomiques numériques pour l'impression 3D en Odontologie Conservatrice. Faculté d'Odontologie d'Aix-Marseille; 2020.
15. Reymus M, Fotiadou C, Hickel R, Diegritz C. 3D-printed model for hands-on training in dental traumatology. *Int Endod J.*2018;51(11):1313-9.

Liste des tableaux

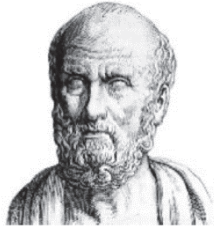
<i>Tableau 1 : Tableau illustrant les programmes des différents travaux pratiques d'Endodontie selon l'année d'étude à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.</i>	<i>3</i>
<i>Tableau 2 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de dents naturelles humaines lors de travaux pratiques d'Endodontie.</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 3 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de blocs en résine translucide lors de travaux pratiques d'Endodontie.</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 4 : Tableau résumant les avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de dents en résine lors de travaux pratiques d'Endodontie.</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 5 : Tableau illustrant les besoins quantitatifs des différents travaux pratiques d'Endodontie selon l'année d'étude à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 6 : Tableau représentant les coûts d'achat des dents en résine NAODENT® évolution par discipline par année et par étudiants.</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 7 : Tableau décrivant les principaux procédés de fabrication additive ainsi que leur précision, leur technique, leur utilisation, leur vitesse d'impression ainsi que leur coût.</i>	<i>15</i>

Liste des illustrations

<i>Figure 1 : Photographie illustrant le travail sur fantôme à l'École de Médecine Dentaire de Marseille.....</i>	<i>2</i>
<i>Figure 2 : Les applications de l'impression en trois dimensions (3D) en dentisterie incluant l'expérimentation, l'éducation et la pratique clinique.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 3 : Illustrations de deux radiographies comparant une incisive en résine NAODENT®évolution (a) et une incisive naturelle (b).....</i>	<i>6</i>
<i>Figure 4 : Schéma de l'endodonte avec les différents éléments de l'anatomie pulpaire.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 5 : Première classification des configurations canalaires selon Weine (1969)(5).....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 6 : Classification des configurations canalaires selon Vertucci (1974)(5).....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 7 : Schéma illustrant la classification de De Deus.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 8 : Classification d'Ahmed et al.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 9 : Illustration de différents objets imprimables dans différents domaines (9).....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 10 : Schéma détaillé du processus d'impression par stéréolithographie(SLA)(11).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 11 : Schéma détaillé du processus d'impression par traitement numérique de la lumière (DLP)(11).....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 12 : Chaîne de modélisation et d'acquisition d'un modèle numérique 3D à partir d'un logiciel, d'une empreinte numérique endo-buccale ou d'un examen radiographique.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 13 : Sélection des molaires modèles selon les critères d'inclusion et d'exclusion.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 14 : Photo de la molaire naturelle modèle retenue qui est une première molaire maxillaire gauche numéro 26.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure 15 : Photographie du CBCT de la marque PLANMECA®, pavillon d'Odontologie de la Timone, AP-HM, Marseille.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure 16 : Dent n°26 sur le support dédié avant son examen radiographique, pavillon d'Odontologie de la Timone, AP-HM, Marseille.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 17 : a) Image de la dent naturelle modèle issue d'un fichier DICOM. b) Image d'autres dents testées préalablement issue d'un fichier DICOM.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 18 : Logos des logiciels gratuits utilisés pour ce travail : 3D Slicer V4.11 et Autodesk Meshmixer V3.3.15.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 19 : ÉTAPE 1 : Importation du fichier DICOM dans le logiciel 3D Slicer.....</i>	<i>23</i>

<i>Figure 20 : ÉTAPE 2 : Choisir l'onglet « Segment Editor » afin de segmenter le fichier DICOM. Ajouter une nouvelle segmentation, choisir sa couleur et la renommer (renommée ici « Molaire 1 »).</i>	23
<i>Figure 21 : ÉTAPE 3 : Utiliser la fonction « Threshold ». Cette fonction permet de facilement sélectionner l'ensemble des zones minéralisées en se basant sur une échelle de radiodensité.</i>	24
<i>Figure 22 : La visualisation en temps réel de la sélection est disponible sur les images en coupes. Pour cela « appliquer » les changements effectués et sélectionner « Show 3D » pour visualiser le résultat obtenu en trois dimensions.</i>	25
<i>Figure 23 : ÉTAPE 4 : Enregistrer le modèle 3D au format STL. Nous l'appellerons « fichier STL Molaire ».</i>	25
<i>Figure 24 : Images du fichier STL Molaire obtenu avec le logiciel Slicer (Vue proximale à gauche. Vue depuis l'apex radiculaire à droite avec mise en évidence de la racine palatine avec le foramen apical dénué de la pulpe.</i>	26
<i>Figure 25 : ÉTAPE 5 : L'objectif est d'obtenir un fichier STL avec un véritable système endodontique. Pour cela, nous allons sélectionner cette fois-ci uniquement la pulpe avec la fonction « Level Tracing » en progressant couche par couche de la couronne vers l'apex de la dent.</i>	26
<i>Figure 26 : Image du fichier STL obtenu appelé fichier STL SegmentationPulpe.</i>	27
<i>Figure 27 : ÉTAPE 6 : Le fichier STL représentant le volume pulpaire est ensuite retouché (lissé) sur le logiciel MeshMixer.</i>	27
<i>Figure 28 : Il est ensuite fusionné avec le fichier STL Molaire pour obtenir le fichier STL final à partir duquel nous allons pouvoir réaliser notre impression 3D. Nous utilisons la fonction « Edition Transformation », nous transférons la pulpe à l'intérieur de la dent puis nous demandons la « différence ».</i>	28
<i>Figure 29 : Image de la Form3 (9)</i>	29
<i>Figure 30 : Captures d'écran du logiciel Pre-Form lors de l'étape de génération de supports. Attention, les supports ne doivent pas être en contact avec les foramens apicaux (comme sur l'image de gauche) car c'est une zone d'évacuation de la résine qui est fragile et qui doit être précise. Les supports doivent être à distance de ceux-ci (comme sur l'image de droite).</i>	30
<i>Figure 31 : Capture d'écran du logiciel Pre-Form lors de l'étape de vérification avant impression.</i>	31
<i>Figure 32 : Photographie du plateau d'impression dans l'imprimante 3D à la fin de l'impression. Nous pouvons remarquer les dents qui apparaissent sur le plateau avec leurs</i>	

<i>supports (tiges d'impression attenantes à la dent qu'il conviendra de détacher de chaque dent).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 33 : Photographie du plateau d'impression hors de l'imprimante sur lequel nous pouvons voir les modèles imprimés. Étape de décollement des modèles.</i>	<i>32</i>
<i>Figure 34 : Photographie des dents en résine lors du traitement aux ultrasons.</i>	<i>33</i>
<i>Figure 35 ci-dessus : Photographie de l'étape de centrifugation 10 minutes à 3 500 tours par minute après passage dans un bac à ultrasons.</i>	<i>34</i>
<i>Figure 36 ci-dessus : Photographie illustrant la fuite de la résine non polymérisée par les foramens se trouvant au fond du tube Falcon de 50mL suite à la centrifugation.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 37 : Image du « FormCure® » de chez FormLabs (9).....</i>	<i>34</i>
<i>Figure 38 ci-dessus : Photographie de la dent naturelle modèle à côté de la dent imprimée illustrant leur similitude radriculaire</i>	<i>35</i>
<i>Figure 39 ci-dessus : Photographie de la dent naturelle modèle à côté de la dent imprimée illustrant la similitude de la face occlusale.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 40 ci-dessus : Photographie de la dent imprimée en vue de dessous illustrant la précision des foramens apicaux. Notons les pics de résine près des foramens que sont les restes de supports détachés.</i>	<i>35</i>
<i>Figure 41 : Photographie illustrant la dent en résine lors de l'étape de la préparation canalair.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 42 : Image issue du logiciel de radiographie de l'École de Chirurgie Dentaire illustrant l'obturation de la dent en résine.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 43 ci-dessus : Image de la vue 3D de la pulpe de la molaire modèle issue du logiciel Slicer suite à l'utilisation de l'outil « Threshold ».....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 44 ci- dessus : Image de la vue 3D de la molaire avec restauration coronaire à l'amalgame issue du logiciel Slicer. On note la présence d'artefacts.</i>	<i>38</i>
<i>Figure 45 : Images illustrant la possibilité d'imprimer des guides pour localiser précisément le canal endodontique.</i>	<i>39</i>
<i>Figure 46 : Images de socles en forme d'arcades dentaires(b), avec des hémorragies pulpaire(d)(14)</i>	<i>40</i>



SERMENT MEDICAL

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'HIPPOCRATE.

Je promets et je jure, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine Dentaire.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admise dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

J'informerai mes patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des connaissances pour forcer les consciences.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leur père.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois déshonorée et méprisée de mes confrères si j'y manque.

MARTINS Virginie – Développement de modèles numériques 3D du système endo-canalair

Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix-Marseille Université : 2021

Rubrique de classement : Endodontie

Résumé :

L'Endodontie est une discipline complexe sur le plan théorique mais également sur le plan pratique. En effet, une série de gestes est à acquérir comme par exemple la préparation de la cavité d'accès ou bien l'identification des différents canaux.

Nous verrons que la pratique de l'Endodontie lors du stage clinique est source de stress chez l'étudiant c'est pourquoi la simulation dans cette discipline est primordiale.

Le développement numérique de modèles en trois dimensions (3D) permettrait de reproduire une dent naturelle ainsi que son système endo-canalair avec un matériau compatible avec la simulation de l'acte.

Après avoir présenté les modèles actuellement utilisés en simulation au sein de l'École de Médecine Dentaire de Marseille nous verrons les impératifs quantitatifs et qualitatifs des modèles pédagogiques en Endodontie. Nous allons ensuite présenter l'ensemble de la chaîne technique et technologie nécessaire à la réalisation de modèle dentaire imprimé en 3D. En termes de réalisation pratique, nous allons nous intéresser à la molaire maxillaire et créer un modèle compatible avec la simulation en Endodontie.

Mots clés : Modèles Pédagogiques, Endodontie, Impression 3D, Travaux Pratiques, Stéréolithographie, Simulation en santé

MARTINS Virginie – DEVELOPMENT OF 3D DIGITAL MODELS OF THE ENDODONTIC SYSTEM

Abstract :

Endodontics branch is complex to learn and to practice. Indeed, there are numerous skills to do like the preparation of the access cavity or the identification of the endodontic system.

We will see that Endodontic in clinic is stressful for students that is why simulation in this branch is necessary.

Development of 3D digital models allow to reproduce a natural tooth with the endodontic system. Moreover, the material chosen should be compliant with practical works.

First, we will show the current models use for simulation in Endodontic in the Medical Dentistry School, with their technical imperatives. Then, we will see the whole of the technical chain required for impress 3D digital models. On the practical side, we will focus on the maxillary molar and create 3D digital models compatible with an endodontic practice.

Keywords : 3D digital models, Endodontic, 3D Impression, Practical works, Stereolithography, Simulation for health education