

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année de soutenance : 2022

N° : 4571

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

Présentée et soutenue publiquement le 26/01/2022

Par Hanna TAZDAIT

Née le 23 Mars 1995 à Créteil - France

**Modélisation et fabrication de supports
pédagogiques imprimés en 3D pour les TP
d'odontologie pédiatrique**

JURY

Président : Madame le Professeur Caroline DELFOSSE
Assesseurs : Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME
Monsieur le Docteur Thomas MARQUILLIER
Monsieur le Docteur Salim HAMOUCH
Membre invité : Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Présentation de la Faculté Dentaire et de l'Université de Lille

Président de l'Université	:	Pr. J-C. CAMART
Directrice Générale des Services de l'Université	:	M-D. SAVINA
Doyen UFR3S	:	Pr. D. LACROIX
Directrice des Services d'Appui UFR3S	:	G. PIERSON
Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S	:	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services	:	M. DROPSIT
Responsable de la Scolarité	:	G. DUPONT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE.

PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S
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
F. BOSCHIN	Responsable du Département de Parodontologie
E. BOCQUET	Responsable du Département d'Orthopédie Dento-Faciale
C. CATTEAU	Responsable du Département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
X. COUDEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. DEHURTEVENT	Prothèses
T. DELCAMBRE	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Responsable du Département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
W. PACQUET	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
L. ROBBERECHT	Dentisterie Restauratrice Endodontie
M. SAVIGNAT	Responsable du Département des Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Responsable du Département de Prothèses

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

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

Remerciements

Aux membres du jury...

Madame la Professeure Caroline DELFOSSE

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Développement, Croissance et Prévention

Département Odontologie Pédiatrique

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Habilitation à Diriger des Recherches (Université Clermont Auvergne)

Diplôme d'Université « Sédation consciente pour les soins bucco-dentaires »

Diplôme d'Université « Gestion du stress et de l'anxiété »

Diplôme d'Université « Compétences cliniques en sédation pour les soins dentaires »

Diplôme Inter Universitaire « Pédagogie en sciences de la santé »

Formation Certifiante en Education Thérapeutique du Patient

Doyen de la faculté d'Odontologie – UFR3S

Je vous suis très reconnaissante de l'honneur que vous me faites de présider le jury de cette thèse.

Veillez trouver à travers ce travail, l'expression de toute ma gratitude et de mon profond respect.

Monsieur le Docteur Jérôme VANDOMME

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Biologie Cellulaire de l'Université de Lille2

Master II Biologie Santé

Master I des Sciences Biologiques et Médicales

Responsable du Département de Prothèses

Assesseur aux Nouvelles Technologies

Vous me faites l'honneur de siéger dans mon jury et j'en suis ravie.

Je vous suis très reconnaissante pour votre disponibilité et votre aide dans le cadre de ma thèse qui sans vous, n'aurait pas pu aboutir.

Je vous remercie pour ces années études, pour votre enseignement, votre pédagogie exemplaire. Le dévouement que vous portez à votre travail est une source d'admiration.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon admiration et de mon plus grand respect.

Monsieur le Docteur Thomas MARQUILLIER

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur en Santé Publique

Spécialiste Qualifié en Médecine Bucco-Dentaire

Certificat d'Études Supérieures Odontologie Pédiatrique et Prévention

Attestation Universitaire soins dentaires sous sédation consciente au MEOPA

Master 1 Biologie Santé – mention Ethique et Droit de la Santé

Master 2 Santé Publique – spécialité Education thérapeutique et éducations en santé

Formation Certifiante en Education Thérapeutique du Patient

Diplôme du Centre d'Enseignement des Thérapeutiques Orthodontiques,
orthopédiques et fonctionnelles

Lauréat du Prix Elmex® de la Société Française d'Odontologie Pédiatrique.

Responsable de l'Unité Fonctionnelle d'Odontologie pédiatrique – CHU de Lille

Vous avez spontanément accepté de diriger ma thèse et de m'accompagner dans cette dernière étape et je vous en suis très reconnaissante.

Je vous remercie sincèrement pour votre gentillesse et vos conseils.

Veillez trouver dans ces pages et ce travail l'expression de ma reconnaissance et de mon profond respect.

Monsieur le Docteur Salim HAMOUCH

Assistant Hospitalo-Universitaire des CSERD

Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

Département Biologie Orale

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master I « Sciences du médicaments » - Parcours « Dispositifs Médicaux – Biomatériaux » - Université Lille2

Tu me fais l'immense honneur de siéger au sein de mon jury de thèse et je t'en suis très reconnaissante.

Ces mots ne représentent qu'une partie infinitésimale de tout le respect et l'admiration que j'ai à ton égard.

Ta disponibilité, ta rigueur et tes conseils avisés m'ont autant aidée pour la rédaction de ma thèse que pour tout mon cursus universitaire.

Apprendre à tes côtés a été une chance inestimable et j'espère que tu trouveras à travers ce travail un témoignage de ma gratitude et ma reconnaissance.

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Maître de Conférences des Universités (Associé) – Praticien Hospitalier des CSERD

Section Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master II « Sciences du médicaments » - Parcours « Dispositifs Médicaux –
Biomatériaux » - Université Lille2

Certificat d'Etudes Supérieures en Prothèses Fixées – Université d'Aix-Marseille

Vous avez spontanément accepté de siéger au sein de ce jury de thèse et je vous en remercie vivement. Votre enseignement durant ces années d'études a toujours été enrichissant pour moi et je vous en suis reconnaissante.

Veillez recevoir l'expression de mes sentiments les plus respectueux.

A ma famille et mes amis...

Table des Abréviations

ART : Atraumatic Restorative Treatment

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CBCT : Cone Beam Computed Tomography

CLIP : Continuous Liquid Interface Production

CPP : Couronne pédiatrique préformée

CVI : Composite Verre Ionomère

DFASO 1 : Diplôme de formation approfondie en sciences odontologiques

DICOM : Digital Imaging and Communications in Medicine

IPA : Alcool isopropylique

IRT : Intérim Restorative Treatment

Micro-CT scan : Micro-tomographie aux rayons X

TP : Travaux pratiques

RCI : Risque Carieux Individuel

SLA : StereoLithographie Apparatus

STL : STéréoLithographie

UV : Ultra-violets

Table des matières

Introduction.....	16
1 Déroulement des travaux pratiques d'odontologie pédiatrique en DFASO 1 à de l'université de Lille	18
1.1 Le programme.....	18
1.2 Les supports utilisés	19
1.2.1 Les dents naturelles	19
1.2.2 Les modèles proposés par l'industrie	20
1.2.3 Les modèles pour l'anesthésie	21
1.3 La simulation pré-clinique en odontologie pédiatrique	24
1.4 Les objectifs des modèles imprimés en 3D.....	25
2 Innovation dans la conception d'un prototype.....	27
2.1 Cahier des charges.....	27
2.1.1 Les situations cliniques en odontologie pédiatrique en théorie.....	27
2.1.1.1 Le champ opératoire.....	27
2.1.1.2 L'anesthésie.....	28
2.1.1.3 La prévention bucco-dentaire	29
2.1.1.4 Les soins conservateurs	29
2.1.1.5 Les soins endodontiques	31
2.1.1.6 Les soins prothétiques.....	32
2.1.1.7 La traumatologie	33
2.2 La maquette idéale	35
2.2.1 Les critères du modèle idéal.....	35
2.2.1.1 La taille du modèle.....	35
2.2.1.2 Le socle	35
2.2.1.3 La composition dentaire.....	36
2.2.1.4 Objectifs thérapeutiques en fonction des situations cliniques :.....	38
3 Fabrication du prototype en pratique.....	39
3.1 La conception du modèle assistée par ordinateur.....	39
3.1.1 Acquisition des données au Cone Beam	39
3.1.1.1 Le cone beam.....	39
3.1.1.2 Méthode de numérisation	40
3.1.2 Exportation des données	40
3.1.2.1 Traitement des données	41
Les logiciels utilisés :	41
3.1.2.2 Traitement numérique du fichier STL.....	42
Isoler les dents :	42
3.1.2.3 Modifier les volumes et les formes :	44
3.1.2.4 Mise en place d'une chambre pulpaire sur molaires maxillaires permanentes	52
3.2 Fabrication du prototype par Impression 3D	54
3.2.1 Conversion du format STL au format Preform	54
3.2.2 Impression 3D	55
3.2.2.1 Les techniques d'impression 3D	55
3.2.2.2 L'imprimante	56
3.2.2.3 Les matériaux d'impression	58
3.2.3 La fabrication par stéréolithographie	58
3.2.4 Traitement post impression	59
3.2.5 Résultat de l'impression	60

4	Discussion	62
4.1	Problèmes rencontrés	62
4.2	Solutions éventuelles	64
4.3	Limites des modèles pédagogiques.....	66
4.4	Avantages et inconvénients de la fabrication des modèles pédagogiques ...	67
4.4.1	Avantages	67
4.4.2	Inconvénients	67
4.5	Perspectives	68
4.5.1	Evolution du modèle.....	68
4.5.2	Evaluation du modèle.....	69
4.5.3	Production à grande échelle.....	69
5	Conclusion	71
	Bibliographie	72
	Table des figures	75
	Table des tableaux	77

Introduction

L'enseignement en odontologie pédiatrique est assuré par des cours théoriques, des enseignements dirigés et des travaux pratiques. Ces trois types d'enseignements sont indissociables et particulièrement en odontologie pédiatrique car ils permettent à l'étudiant d'acquérir les connaissances fondamentales ainsi que dextérité manuelle nécessaire à la réalisation des différents soins qu'il sera amené à prodiguer à des patients lors de sa pratique future.

Au sein de l'UFR3S-Odontologie de Lille, au cours de la quatrième année, les étudiants bénéficient de travaux pratiques réalisés sur des supports pédagogiques. Ces supports servent à simuler différentes situations cliniques en odontologie pédiatrique permettant de visualiser et d'apprendre les gestes techniques nécessaires à la prise en charge de l'enfant.

La mise en place de ces travaux pratiques a un coût. En effet, une partie est réalisée sur dents en résine et une autre partie se fait sur dents issues de l'impression en 3 dimensions. Le prix d'achat, d'entretien et de réassort de modèles non entièrement personnalisés demande des ressources financières et un temps de gestion assez important.

Grâce aux technologies des systèmes informatiques de conception et de fabrication assisté par ordinateur (CFAO) associés à l'impression 3D, il est aujourd'hui envisageable de créer des modèles pédagogiques standardisés, faits sur mesure, permettant aux étudiants une formation plus équitable.

Au-delà des simples dents en résine, il sera possible d'imprimer des modèles de dents temporaires et permanentes avec une anatomie interne et de recréer des situations pathologiques dans le but de mettre les étudiants en phase préclinique, face à des situations personnalisées qu'ils seront amenés à gérer ultérieurement.

Cette thèse est un projet d'innovation pédagogique qui a pour objectif de créer des supports personnalisés et standardisés en odontologie pédiatrique et ce, en mettant en application les moyens que nous offrent les logiciels de CFAO, l'impression 3D et les divers matériaux aujourd'hui disponibles afin de donner aux étudiants l'opportunité d'une formation optimale.

1 Déroulement des travaux pratiques d'odontologie pédiatrique en DFASO 1 à de l'université de Lille

1.1 Le programme

Les thèmes abordés au cours des travaux pratiques ont pour but de mettre en application les enseignements théoriques dispensés au préalable et permettent d'aborder les nombreuses situations cliniques qui existent chez l'enfant. Cet ensemble de travaux pratiques qui est organisé comme l'indique le tableau ci-dessous (Tableau 1) va axer le geste pratique.

Tableau 1: Emploi du temps des travaux pratiques d'odontologie pédiatrique en DFASO 1 (exemple de l'année universitaire 2020/2021).

Département d'Odontologie pédiatrique : TP ou ED semestre 2 année 2020-2021								
Semestre	Intitulé du cours	TP/ED/CM	Enseignants	Date	Heure de début	Heure de fin	Salle	Groupe/Promo complète
Semestre 1	Introduction/distribution des modèles	ED		16/09/2020	14h00	16h00	Petit ou grand amphi	A-B
					16h30	18h30		C-D
	Cavités simples/cavités composées + digue + points d'appui	TP		23/09/2020	14h00	16h00	Simulation	C
					16h00	18h00		A
				30/09/3030	14h00	16h00	Simulation	D
					16h00	18h00		B
	Anesthésie	TP		07/10/2020	14h00	15h30	Salle Polyvalente	A
					15h30	17h00		C
					17h00	18h30		D
					18h30	20h00		B
	Cas Cliniques 1 et 2	ED		Semaine du 12/10/2020	Mise en ligne sur Moodle			
	Abord de l'enfant	ED		21/10/2020	14h00	15h30	Petit ou grand amphi	A
15h30					17h00	C		
17h00					18h30	D		
18h30					20h00	B		
Perfectionnement	TP		25/10/2020	14h00	16h00	Simulation	A-B	
				16h00	18h00		C-D	
Cas cliniques 1 et 2	ED		01/12/2020	14h00	16h00	Forum sur Moodle A-B-C-D		
Semestre 2	Cas cliniques 3 et traumatologie	ED		Semaine du 04/01/2020	Mise en ligne sur Moodle			
	Pulpotomie/coiffe préformée	TP		06/01/2021	14h00	16h00	Simulation	C
					16h00	18h00		A
				13/01/2021	14h00	16h00	Simulation	D
	Biopulpectomie	TP		20/01/2021	16h00	18h00	Simulation	B
					15h00	16h30		C
				27/01/2021	18h30	20h00		A
					15h00	16h30		D
	18h30	20h00	B					
	Prothèse pédodontique	TP		Semaine du 01/02/2021	Mise en ligne sur Moodle et distribution du matériel			
	Dentisterie à minima	TP		03/02/2021	14h00	16h00	Simulation	C
					16h00	18h00		A
10/02/2021				14h00	16h00	D		
				16h00	18h00	B		
Cas cliniques 3 et traumatologie	ED		17/02/2021	14h00	16h00	Forum A-B-C-D		
Perfectionnement	TP		17/03/2021	14h00	16h00	Petit ou grand amphi	A-B	
				16h00	18h00		C-D	
Thème ouvert	ED		24/03/2021	14h00	16h00		A-B	
				16h00	18h00		C-D	

1.2 Les supports utilisés

1.2.1 Les dents naturelles

Les supports pédagogiques étaient initialement des dents naturelles. Ces dernières ont peu à peu été remplacées par les modèles en résine de l'industrie, à l'exception des travaux pratiques endodontiques.

L'intérêt des dents naturelles est la différence de dureté des tissus dentaires, les différences anatomiques ainsi que des mises en situation assez fidèles à la réalité clinique [1].

Ces dents sont difficiles à se procurer et posent un problème d'équité. En effet, l'exercice de l'odontologie pédiatrique se veut de plus en plus conservateur, respectant un gradient thérapeutique, l'avulsion survient souvent à un stade de résorption fortement avancé ou dans un état de délabrement trop important pour réaliser des soins pérennes.



Figure 1 : Modèles de dents temporaires naturelles [source personnelle]

1.2.2 Les modèles proposés par l'industrie

Les modèles de travail actuellement utilisés sont les modèles de la marque Frasaco®. Ils sont composés d'un modèle maxillaire et d'un modèle mandibulaire qui peuvent être mis en occlusion.

Chaque modèle comprend :

- Un support pour fixer les dents en résines par le biais de vis.
- Un tournevis.
- Une plaque en résine qui referme le support et permet de le visser à une mâchoire métallique dans le but de fixer le modèle sur un fantôme.
- Un revêtement en caoutchouc coloré simulant la gencive.
- 24 dents en résine vissées au support du modèle. Chaque cadran comprend :
 - Une première incisive temporaire.
 - Une deuxième incisive temporaire.
 - Une canine temporaire.
 - Une première molaire temporaire.
 - Une deuxième molaire temporaire.
 - Une première molaire permanente.

Ces modèles simulent une cavité buccale à denture mixte par la présence des premières molaires permanentes. Toutes les dents présentes sont saines et permettent la réalisation de différentes cavités, simples ou composées et de couronnes pédiatriques préformées. Certaines dents peuvent être personnalisées, par exemple sur le modèle, la dent 85 présente une cavité interne simulant une chambre pulpaire.



Figure 2: Modèles d'odontologie pédiatriques Frasaco® actuellement utilisés pour les travaux pratiques en DFASO 1. Modèle maxillaire et mandibulaire, en vue occlusale et antéro-vestibulaire [source personnelle]

1.2.3 Les modèles pour l'anesthésie

Ces modèles pédagogiques appelés « Bob » sont fabriqués et commercialisés par Dental Hi Tec® et sont proposés avec le Quicksleeper®. Composés d'un modèle maxillaire et d'un modèle mandibulaire, ils sont réalisés grâce à l'impression 3D et sont destinés à réaliser toutes les manipulations afin de s'approprier la technique d'anesthésie intra-osseuse.

Les modèles maxillaires et mandibulaires sont composés de tubes de différentes formes. Chaque forme permettant un type d'anesthésie différent avec l'abord adéquat.



Figure 3 : Photographie en vue supérieure du modèle pédagogique mandibulaire « Bob » [source personnelle]

L'entraînement à l'aide de ces modèles « Bob » consiste à insérer l'aiguille du Quicksleeper® dans les tubes afin de maîtriser les nombreuses techniques d'anesthésies :

- Tubes en forme d'obus pour l'anesthésie muqueuse : avec une angulation de l'aiguille quasiment parallèle à la muqueuse.
- Tubes de section ronde pour l'anesthésie ostéocentrale : disposés dans des sites qui présentent suffisamment d'os pour une anesthésie en toute sécurité.
- Tube de section carré pour les anesthésies transcorticales : disposés de part et d'autre du trigone rétro-molaires et sur les zones édentées où ce type d'anesthésie est indiqué.

Les modèles ont été réalisés par impression 3D avec des guides pour apprendre à l'étudiant la façon dont il faut diriger l'aiguille de la seringue d'anesthésie. De plus, cela permet d'acquérir une position de travail confortable.

1.2.4 La dent imprimée en 3D

Pour pallier les limites des dents naturelles et pour la réalisation de traitements endodontiques, une molaire temporaire non rhizalisée a été créée par modélisation et impression 3D (travail réalisée par le Professeur DELFOSSE et collaborateurs au laboratoire CROC UPR 4847).

Il y a eu deux générations de dents imprimées, la première a été un prototype imprimé en résine blanche, avec et sans cavité d'accès (Figure 4).

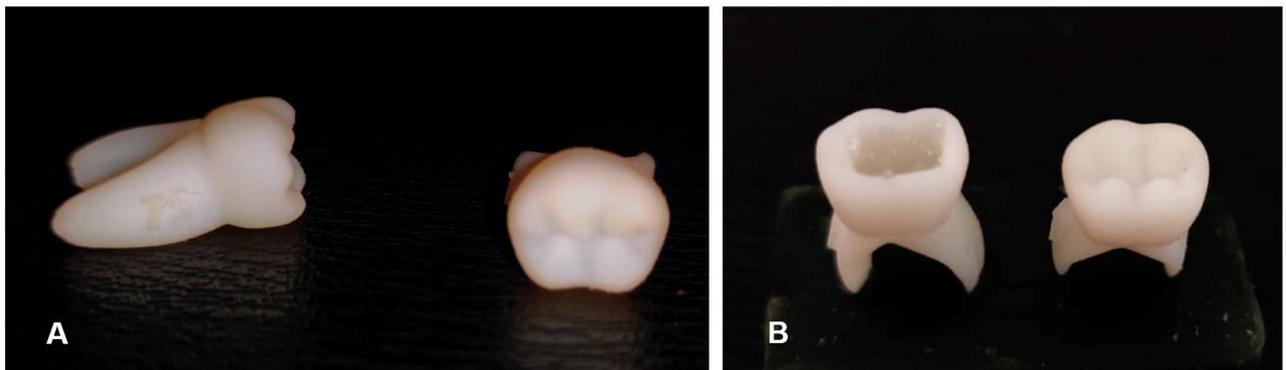


Figure 4: 2 dents temporaires imprimés en 3D en résine blanche. A. Vue occlusale et proximale. B. Vue linguo occlusal d'une dent saine et une dent avec cavité d'accès occlusale[source personnelle]

La seconde génération a été imprimée avec une résine brune (Figure 5) aux propriétés mécaniques plus adaptées aux besoins pédagogiques. La dent est caractérisée par une face occlusale simulant une lésion carieuse importante et dont la prise en charge nécessite un traitement endodontique.



Figure 5: Dent imprimée en résine brune pour entraînement au traitement endodontique sur dent temporaire [source personnelle]

Ce type de dent ayant intégré les travaux pratiques, l'impression est réalisée au sein de la faculté de chirurgie dentaire en fonction du nombre d'étudiants par promotion de DFASO 1. Le résultat imprimé se présente sous la forme d'un plateau et les dents sont récupérées en les désolidarisant des tiges de supports (Figure 6).



Figure 6: Impression groupée de plusieurs molaires temporaires pour entraînement au traitement endodontique [source personnelle]

1.3 La simulation pré-clinique en odontologie pédiatrique

Le processus éducatif a été conceptualisé comme un continuum d'expériences qui commence dès la formation de premier cycle et se construit tout au long de la vie professionnelle d'un chirurgien-dentiste, impliquant un ensemble de connaissances, d'aptitudes, compétences et attitudes à l'égard de l'odontologie pédiatrique couvrant le premier, second et troisième cycle, ou au cours du développement professionnel continu [2].

Dans le cadre de la formation en odontologie, et particulièrement en odontologie pédiatrique, la simulation dans un contexte pré-clinique est primordial. Une formation pratique réaliste, approfondie et répétitive est essentielle afin de préparer les étudiants à effectuer des soins sur leurs premiers patients [3]. Ces compétences manuelles spécifiques sont développées par une formation sur des dents artificielles en plastique placées dans un « simulateur de tête fantôme » [4].

Les modèles pédagogiques permettent à l'étudiant d'observer et de visualiser le soin « idéal » d'une part, et de manipuler et de s'exercer d'autre part, mécanisme jouant un rôle important dans le processus de mémorisation. Plus il y a de sens mis en jeu, plus la composante émotionnelle engendrée par la manipulation sera importante et plus le processus de mémorisation sera efficace.

Ces outils pédagogiques s'inscrivent dans la démarche qualitative de l'enseignement. Ils permettent de joindre le geste pratique à la connaissance théorique, la simulation de l'acte prépare aux conditions réelles, sans travailler sur le patient directement pour la première fois.

1.4 Les objectifs des modèles imprimés en 3D

Avec l'avènement de la technologie, l'odontologie a également évolué, donnant « l'odontologie informatisée » qui est devenue une partie essentielle de l'enseignement et de la pratique dentaire [5]. En effet, au cours des dernières décennies, de nouvelles méthodes de fabrication ont été introduites en odontologie et ont trouvé leur chemin vers l'enseignement universitaire. La combinaison de scanners en trois dimensions (3D), de données du cone-beam et d'imprimantes 3D a permis la réplique de structures anatomiques dans les dents artificielles pour l'enseignement dentaire [6].

Bien qu'il y ait une demande croissante de développement d'outils de formations en odontologie préclinique, elle est moins importante dans le domaine de l'odontologie pédiatrique [7].

Les modèles pédagogiques permettent à l'étudiant de visualiser le soin idéal afin de s'entraîner sur une base de concepts non erronés. La technologie d'impression 3D offre de nouvelles possibilités de formation de traitements dentaires spécifiques qui sont actuellement difficiles à imiter [3].

L'intérêt de l'impression 3D, entre-autre, est de pouvoir concevoir des supports en amont de leur fabrication afin d'avoir des modèles personnalisés [1]. Ainsi, il est possible de choisir, dent par dent les situations cliniques voulues pour optimiser le nombre d'actes sur un seul et même modèle, donnant aux étudiants plus d'opportunités et une formation pratique plus complète.

La mise en œuvre de ce projet par la faculté de chirurgie dentaire, sous réserve d'être équipé du matériel nécessaire, permettrait une indépendance face à l'industrie, une logistique plus simple et une réduction du coût pour les étudiants. Ces derniers pourront également conserver ces modèles pédagogiques et non les rendre à la fin de l'année universitaire (DFASO 1).

D'autre part, une organisation au sein de la faculté sera nécessaire afin de lancer l'impression du bon nombre de modèles en temps voulu. Cela nécessitera probablement le recrutement d'un technicien compétant dans le domaine et une étude préalable du coût de ce projet pour l'UFR.

2 Innovation dans la conception d'un prototype

2.1 Cahier des charges

Dans le cadre de la formation en odontologie pédiatrique, les modèles pédagogiques sont de réels moyens didactiques permettant de procéder à des exercices pratiques précliniques. Ils doivent donc être fonctionnels, adaptés aux fantômes des salles de simulations.

L'innovation du prototype optimal le plus complet pour la formation de l'étudiant, permettra de mettre en application les notions primordiales en odontologie pédiatrique.

2.1.1 Les situations cliniques en odontologie pédiatrique en théorie

L'enjeu principal de l'odontologie pédiatrique est de former les étudiants à la prise en charge bucco-dentaire chez l'enfant [8].

Bien que l'entraînement pratique soit nécessaire dans la formation, il ne remplace et ne dispense aucunement de l'apprentissage théorique. Ce dernier étant le pilier dans la décision de la prise en charge clinique.

2.1.1.1 Le champ opératoire

La digue désigne le champ opératoire optimal à utiliser pour les traitements carieux, non invasifs, restaurateurs, ultraconservateurs et endodontiques. Elle garantit le confort et la sécurité du patient et du praticien et augmente les chances de réussite de ces traitements [9].

Cette technique est utilisée dans le but d'isoler une dent ou un groupe de dents, par le biais d'une feuille déformable en caoutchouc ou en vinyle, préalablement perforée. Celle-ci est maintenue par un crampon qui vient sertir la dent au niveau du collet. Le tout est mis en tension par le cadre à digue en métal ou en plastique. Cet ensemble permet une étanchéité vis à vis du milieu buccal.

En odontologie pédiatrique en particulier, lors de la mise en place du crampon, il est nécessaire de mettre en place un fil dentaire autour de la boucle du crampon afin de sécuriser le tout.

La digue dentaire fait partie intégrante de la prise en charge en odontologie pédiatrique, particulièrement dans les thérapeutiques dont la réussite est conditionnée par le contrôle de l'humidité ambiante et l'asepsie. L'apprentissage de la mise en place de la digue est indissociable de l'apprentissage des actes de soins.

Implication lors de la conception du prototype :

Présence de points de contacts et de contre dépouilles fidèles à l'anatomie des dents.

2.1.1.2 L'anesthésie

L'anesthésie est le blocage de la conduction nerveuse de façon réversible, c'est un acte majeur dans la prise en charge car il y a une composante thérapeutique, pharmacologique et psychologique.

La maîtrise de l'anesthésie, par infiltration ou intra osseuse conditionne la suite des soins car un bon silence opératoire permet un bon déroulement de la séance. En effet, l'anesthésie permet l'instauration d'une relation de confiance.

- Anesthésie par infiltration : injection de l'anesthésie dans un tissu mou ; en muqueuse libre (anesthésie para apicale, tronculaire), attachée (palatine) ou dans le ligament alvéolodentaire (intra-ligamentaire).
- Anesthésie intra osseuse : injection de l'anesthésie dans l'os spongieux entourant la dent après traversée du septum (ostéo-centrale) ou de la corticale externe (transcorticale), puis de l'os spongieux, pour se rapprocher de l'apex des dents et permettre sa diffusion grâce à la circulation sanguine intra-osseuse [9].

Des travaux ont été réalisés par Dental Hi Tec® afin d'entraîner les étudiants à réaliser des injections intra osseuses de façon guidée (Figure 2).

2.1.1.3 La prévention bucco-dentaire

La loi du 4 mars 2002 (article L1417-1) a permis de définir pour la première fois ce qu'est la politique de prévention.

La politique de prévention a pour but d'améliorer l'état de santé de la population en évitant l'apparition, le développement ou l'aggravation des maladies ou accidents et en favorisant les comportements individuels et collectifs pouvant contribuer à réduire le risque de maladie et d'accident.

Cette approche thérapeutique est réalisée sur les patients avec un Risque Carieux Individuel (RCI) élevé.

Les soins préventifs comprennent [10 ; 11]:

- L'application de topiques fluorés.
- L'analyse nutritionnelle.
- Le score de l'indice de plaque.
- La mise en place de sealant (scellement de sillons).
- Le nettoyage dentaire professionnel (la prophylaxie).

Le choix thérapeutique se fait en fonction du type de prévention.

Implication lors de la conception du prototype :

Présence de sillons sur les faces occlusales des molaires permanentes pour l'application de sealants. Ainsi que la présence de rugosités de surfaces sur une dent simulant un défaut de structures tissulaire, permettant une approche préventive de ce type de pathologies et l'application de topiques fluorés.

2.1.1.4 Les soins conservateurs

Les soins conservateurs les plus fréquemment prodigués en odontologie pédiatrique sont les curetages carieux avec mise en place de matériaux en phase plastique [12]. L'étudiant doit alors savoir réaliser des cavités simples et complexes en fonction des différentes classifications de la dentisterie afin de s'adapter au mieux à la situation clinique.

- **Curetage partiel**

- **Traitement restaurateur atraumatique** (Atraumatic Restorative Treatment ou ART) :

Le traitement de restauration atraumatique (ART) est un traitement alternatif pour les lésions carieuses dentaires principalement utilisé dans des conditions non optimales, chez des enfants non coopératifs par exemple. La dentine cariée déminéralisée et insensible est enlevée avec des instruments manuels seulement, sans électricité, ni anesthésie [13]. La cavité est ensuite remplie par un ciment en verre ionomère chémo-polymérisable haute densité suivis de la technique du « Press Finger » et l'élimination des excès de biomatériau [14].

- **Traitement de temporisation** (Interim Restorative Treatment ou IRT) :

Ce traitement de temporisation utilise le plus souvent la méthode ART sans avoir le même objectif. Il peut être envisagé dans un premier temps, à l'occasion d'une des premières visites (et nécessite une réintervention) à savoir [15] :

- Contrôler la maladie carieuse par la correction du risque carieux individuel dans l'attente de restaurations définitives (exemple : dans le cas de formes sévères de la carie de la petite enfance) ;
- Evaluer le comportement de l'enfant.

- **Curetage total, ou traitement conservateur conventionnel** : ces traitements qualifiés de conventionnels, par comparaison aux ART et ITR, peuvent être réalisés avec de nombreux matériaux incluant ceux à base de CVI (ciments verres ionomères) dont les indications dépendent du temps résiduel de la dent temporaire sur l'arcade, de la sévérité, de la localisation de la lésion et enfin de la coopération de l'enfant [16].

Implication lors de la conception du prototype :

Présence de cavités simulant des lésions carieuses à différents stades et différentes localisations.

- **Coiffage pulpaire direct sur dent permanentes** : l'objectif de ce traitement est d'induire, à l'aide d'un biomatériau, la formation d'un pont minéralisé assurant la protection du tissu pulpaire vivant sous-jacent après exposition pulpaire, afin de permettre la poursuite de la rhizogénèse.

Implication lors de la conception du prototype :

Présence d'une cavité simulant la chambre pulpaire d'une dent permanente et une autre cavité simulant une lésion carieuse profonde à proximité pulpaire.

2.1.1.5 Les soins endodontiques

- **Biopulpotomie sur dents temporaires** : c'est une amputation de la pulpe camérale afin de préserver la vitalité de la pulpe radiculaire. Cette thérapeutique dentino-pulpaire est également indiquée en cas de résorption trop avancée de la dent temporaire.
- **Pulpectomie** : il s'agit de l'une des procédures les plus importantes pour maintenir les dents temporaires nécrosées jusqu'à l'exfoliation physiologique. En pratique clinique, l'imprévisibilité de la morphologie canalaire inhérente aux dents temporaires ajoute de la difficulté à la prise en charge. Le succès d'une procédure de pulpectomie dépend principalement de la préparation biomécanique des systèmes endocanalaire [17].

Implication lors de la conception du prototype :

Présence d'une cavité simulant la chambre pulpaire d'une dent temporaire et une autre cavité simulant une lésion carieuse profonde à proximité pulpaire.

2.1.1.6 Les soins prothétiques

- **Mainteneur d'espace** : le mainteneur d'espace est un appareillage classiquement associé à la perte d'une ou de plusieurs dents temporaires et son utilisation appropriée est préconisée pour maintenir l'espace jusqu'à l'éruption des dents permanentes [18].

Implication lors de la conception du prototype :

Pouvoir déposer une dent du support pour simuler un édentement et mise en place d'un mainteneur d'espace.

- **Prothèse fixée** : couronnes pédiatriques préformées (CPP)
Les CPP sont composées de nickel et de chrome, elles ont une plasticité facilitant leur ajustage en bouche. Cette technique est indiquée sur les molaires temporaires délabrées (lésions carieuses multifaces, ICDAS 5-6 avec ou sans traitement pulpaire, anomalie de structure, érosion ou attrition sévère...) [9].

La technique de Hall est une thérapeutique qui utilise les CPP dans le cadre de soins conservateurs. C'est une méthode de prise en charge efficace des lésions carieuses sur molaires temporaires à l'aide de couronnes métalliques préformées, sans anesthésie locale ni élimination des lésions carieuses ou préparation dentaire d'aucune sorte [19].

Implication lors de la conception du prototype :

Présence de dents individualisées, de taille comparable à la réalité clinique avec la présence de points de contacts, afin de mettre en place les mêmes couronnes utilisées sur les patients.

- **Prothèse amovible** : ce type de réhabilitation prothétique est classiquement indiqué suite à la perte ou à l'absence d'une ou de plusieurs dents. Les prothèses pédiatriques amovibles, à la différence des mainteneurs d'espace, agissent également dans le sens vertical en prévenant l'égression des dents antagonistes en regard du site édenté. Elles permettent de rétablir le coefficient masticatoire initial ainsi que la fonction esthétique qui joue un rôle très important sur la psychologie de l'enfant.

Implication lors de la conception du prototype :

Pouvoir déposer une dent du support pour simuler un édentement afin de réaliser des empreintes et des Porte-Empreintes Individuels.

2.1.1.7 La traumatologie

La traumatologie dentaire de l'enfant est spécifique par la présence de la denture temporaire ou mixte et celle des germes des dents permanentes intra-osseux. L'étroite proximité entre la racine de la dent temporaire et le germe de la dent dite définitive rend la protection du développement normal de ce dernier prioritaire. L'examen radiologique est un outil clé, permettant de montrer les fractures et leurs traits par rapport à la pulpe et les déplacements des racines par rapport aux germes [20].

Tout traumatisme d'une dent impose un diagnostic précis des lésions dont dépendront le traitement et le pronostic de survie de la dent à court, moyen et long terme. Les traumatismes dentaires surviennent en denture temporaire, en denture mixte ou en denture permanente. Ils surviennent à tout âge mais avec 2 pics de fréquence : 12—36 mois, âge de la marche et de la découverte de l'environnement, puis à l'adolescence, âge des sports plus violents et d'une certaine autonomie. Ces traumatismes surviennent dans des circonstances diverses , pouvant être de simples accidents dans l'environnement de l'enfant ou des agressions et de la maltraitance [21].

Les situations cliniques en traumatologie dentaire pédiatrique sont les concussions, expulsions, extrusions, impactions, les luxations et subluxations, ainsi que les fractures, qu'elles soient alvéolaires, radiculaires, amélares, amélodentaires avec ou sans exposition pulpaire [22].

Implication lors de la conception du prototype :

Présence de pertes de substances plus ou moins importantes au niveau des dents antérieures afin de simuler une fracture amélaire ou amélodentinaire avec ou sans exposition pulpaire.

2.2 La maquette idéale

2.2.1 Les critères du modèle idéal

2.2.1.1 La taille du modèle

Les modèles pédagogiques doivent simuler des situations cliniques en odontologie pédiatrique, de ce fait, ces supports doivent avoir une dimension réduite pour respecter l'anatomie des maxillaires d'un enfant. Cela se fait autant pour la taille du socle que pour la composition dentaire.

En fonction de la denture choisie, il doit y avoir une concordance entre la composition dentaire et leur support. Pour ce travail, une denture mixte a été utilisée avec toutes les dents lactéales et seulement les premières molaires permanentes. Ces dents devront être notées de leur numéro respectifs pour pouvoir être différenciées et changées après utilisation.

2.2.1.2 Le socle

Dans la maquette idéale, le socle serait imprimé en 3D en respectant certains critères pour que le modèle soit fonctionnel ;

- Compatibilité avec les mâchoires des simulateurs cliniques : cela implique la présence d'un pas de vis à la base du socle qui permettrait de fixer le modèle grâce à la vis dédiée à cet effet.
- Emplacements pour les dents résines : des encoches doivent être prévues afin de placer chaque dent dans sa position anatomique de référence. La taille de la base des dents qui simule la partie radiculaire peut varier et les encoches qui leurs sont dédiés doivent correspondre de sorte à ne laisser visible que la partie coronaire. Ces emplacements doivent être fermés à l'exception d'un orifice qui permettrait le passage de petites vis de stabilisation.
- Espace nécessaire pour positionner une gencive.

2.2.1.3 La composition dentaire

Le schéma dentaire de la maquette idéale a été représenté dans la figure suivante (Figure 7).

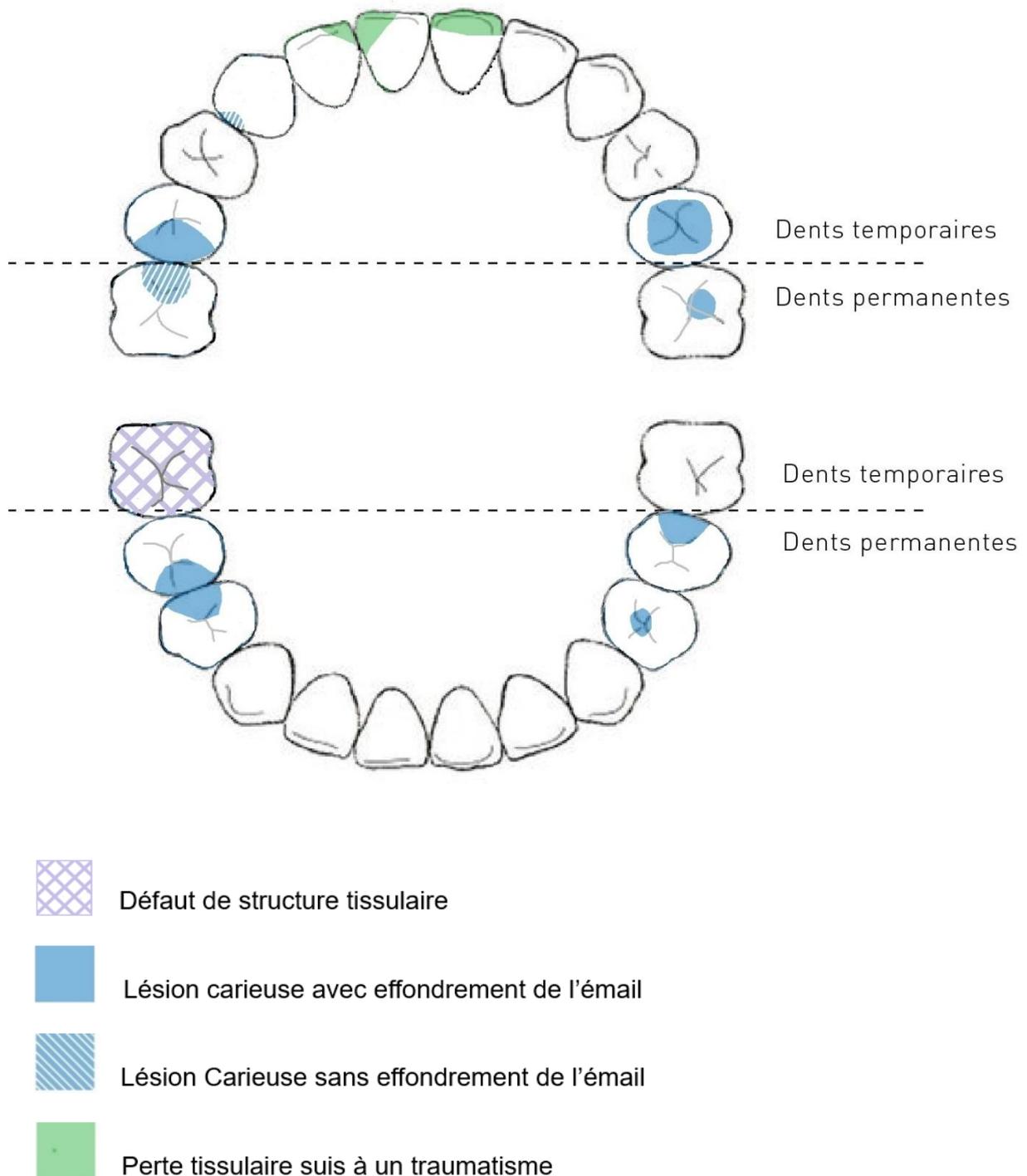


Figure 7 : Schéma résumé du modèle à concevoir

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des situations clinique pour chaque dent du prototype

Situation clinique	Lésion carieuse proximale mésiale ICDAS 4 à proximité pulpaire	Lésion carieuse occluso-distopalatine ICDAS 6	Dent saine	Lésion carieuse ICDAS 5	Fracture amérodentinaire angle mésial	Fracture amélaire angle distal	Fracture amérodentinaire angle mésial et distal	Dents saines				Lésion carieuse occlusale ICDAS 6	Lésion carieuse occlusale à proximité pulpaire ICDAS 5
	(16)	(55)	(54)	(53)	(52)	(51)		(61)	(62)	(63)	(64)	(65)	(26)
	(46)	(85)	(84)	(83)	(82)	(81)		(71)	(72)	(73)	(74)	(75)	(36)
Situation clinique	Défaut de structure tissulaire	Lésion carieuse proximale mésiale ICDAS 6	Lésion carieuse proximale distale ICDAS 6	Dents saines			Dents saines		Lésion carieuse occlusale ICDAS 5	Lésion carieuse proximale distale ICDAS 6	Dent saine		

2.2.1.4 Objectifs thérapeutiques en fonction des situations cliniques :

En fonction de la situation simulée résumée dans le Tableau 2, l'étudiant doit réaliser des actes suivant la logique de prise en charge thérapeutique en respectant les paradigmes de la dentisterie moderne et le principe de gradient thérapeutique.

La maquette idéale doit être optimisée et conçue de sorte à être la plus exhaustive possible et confronter les étudiants à un maximum de situations potentielles. Et ce, en concordance avec les enseignements qui leur sont dispensés.

- Mise en place du champ opératoire
- Réalisation de scellement de sillons sur les molaires permanentes avec face occlusale non cariée, avec ou sans défaut de structure tissulaire.
- Prise en charge des lésions carieuses par curetage et restauration au composite ou au verre ionomère.
- Réalisation de coiffages directs ou indirects sur les dents permanentes cariées.
- Réalisation de biopulpotomie sur molaire temporaire.
- Restauration au composite des pertes de substances dentaires à la suite d'un traumatisme.
- Mise en place d'un mainteneur d'espace. Il s'agira de retirer une dent du socle afin de simuler un édentement encastré.
- Préparation dentaire et mise en place d'une CPP sur une dent délabrée afin d'appliquer la technique de Hall.
- Réalisation de PEI (Porte-Empreintes Individuels) après dépose certaines dents pour simuler un édentement qui nécessiterait une prothèse amovible partielle.

3 Fabrication du prototype en pratique

3.1 La conception du modèle assistée par ordinateur

3.1.1 Acquisition des données au Cone Beam

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) est un outil majeur dans la réalisation de ces supports pédagogiques personnalisés. Elle permet de matérialiser l'idée en un support virtuel, le manipuler et modifier jusqu'à l'acquisition d'un prototype qui pourra par la suite être imprimé en 3D.

3.1.1.1 Le cone beam

Le Cone Beam ou Cone Beam Computed Tomography (CBCT) qui se traduit par tomodensitométrie à faisceau conique, également connue sous le nom de tomographie volumétrique numérique, a été développé à la fin des années 1990 et est maintenant de plus en plus disponible dans la pratique clinique. Il peut fournir des images en coupe transversale en haute résolution des dents et de la région maxillo-faciale avec des applications dans tous les domaines de la dentisterie [23].

Au cours d'un balayage CBCT, le tube à rayons X et le détecteur tournent le long d'une trajectoire circulaire. Les temps de rotation typiques varient entre 10 et 40 secondes, bien qu'il existe des protocoles de balayage plus ou moins rapides. Pendant la rotation, un faisceau de rayons X en forme de cône ou de pyramide entraîne l'acquisition de plusieurs centaines de projections de rayons X bidimensionnelle (2D) (c'est-à-dire des données brutes) par le détecteur. Ces projections peuvent ensuite être reconstruites en une représentation tridimensionnelle (3D) de l'objet scanné [24].

Un ensemble de paramètres est à la disposition de l'utilisateur en fonction de l'indication, la précision recherchée et le volume qu'il souhaite scanner, le tout respectant les principes de la radioprotection que sont la justification, l'optimisation et la limitation.

3.1.1.2 Méthode de numérisation

Dans ce projet, les dents en résine des modèles Frasaco® d'odontologie pédiatrique maxillaires et mandibulaires ont été numérisés grâce au CBCT. Les dents ont été déposées de leur socle et positionnées sur une feuille en cire par leurs faces occlusales afin de les stabiliser. Le tout était placé sur un support afin de surélever les dents et les positionner dans le champ d'acquisition du cone beam.

Le modèle du CBCT utilisé est le PaX-i3D Green de chez VATECH® selon les paramètres suivants :

- FOV (diameter x Height) : 16 x 9
- Vertical option : Occlusion
- Horizontal Option : High Resolution
- Voxel Size : Standard (0.20)

3.1.2 Exportation des données

Après la numérisation, l'exportation des données doit être réalisée dans un format compatible au traitement et à la conception 3D. En l'occurrence, sous la forme d'un fichier STL.

Le format STL est également connu sous le nom de langage de tessellation standard ou langage de triangle standard. Ce format représente les surfaces planes par des triangles et les surfaces incurvées par des polyèdres. En augmentant le nombre de triangles et de polyèdres la résolution du fichier augmente et le risque d'erreur diminue [25].

Ce format de fichier est pris en charge par de nombreux logiciels ; il est largement utilisé pour le prototypage rapide et la fabrication assistée par ordinateur (fabrication additive ou impression 3D). Les fichiers STL décrivent uniquement la géométrie de surface d'un objet tridimensionnel sans aucune représentation de la couleur, de la texture ou d'autres attributs de modèle CAO courants. Le format STL spécifie à la fois les représentations ASCII et binaires. Les fichiers binaires sont plus courants, car ils sont plus compacts.

Le logiciel associé au CBCT qui a été utilisé pour cette étude est le EZ-3Di®. Ce dernier affiche les données numérisées en fonction de leur densité. La densité osseuse étant la référence habituellement utilisée dans les champs d'applications cliniques du CBCT, il faut donc modifier ce paramètre en « *Tissus mous* ».

Afin d'importer les données dans le bon format, il faut aller dans le « Menu Principal », sélectionner « Exporter le modèle de surface » et veiller à ce que le nombre de point inclus dans le fichier STL soit le plus grand possible. Pour ce faire, il faut déplacer le curseur « Valeur ISO » vers la gauche.

Dès lors, il suffit de sélectionner le dossier ou le fichier sera exporté.

3.1.2.1 Traitement des données

Les logiciels utilisés :

Chaque étape, de la numérisation à l'impression, nécessite l'utilisation de logiciels de transfert et de traitement des données essentiels dans l'innovation et l'aboutissement de ce travail.

Dans la thèse du docteur Samy Benchikh sur « Le traitement numérique d'une empreinte en prothèse amovible complète par l'utilisation du cone beam » figure un tableau récapitulatif au paragraphe « logiciel d'intérêt pour le traitement des données » (tableau 3). Seuls les deux premiers logiciels de ce tableau ont été utilisés pour la numérisation et la modélisation du modèle pédagogique. Les deux autres logiciels figurant dans le tableau peuvent être utilisés dans la conversion et le traitement de données issus d'empreintes physiques et numériques.

Tableau 3: Logiciels pour le traitement des données [26].

Logiciel		Type	Utilisation / Intérêt
EZ-3Di		Licence	<ul style="list-style-type: none"> Reconstruction volumique de l'acquisition CBCT et visualisation de l'empreinte numérisée Exportation de l'empreinte sous forme d'un fichier STL
MeshMixer		Freeware	<ul style="list-style-type: none"> « Détourage » du fichier STL de l'empreinte Conversion de l'empreinte primaire ou secondaire détournée en modèle positif Correction des défauts de surface de l'empreinte Élaboration d'un porte-empreinte individuel Réalisation d'un modèle secondaire
Blender			Conversion de l'empreinte primaire ou secondaire détournée en modèle positif
MeshLab			Comparaison des modèles issus du traitement numérique et du traitement physique par « matching » des surfaces via calcul de la distance de Hausdorff

3.1.2.2 *Traitement numérique du fichier STL*

Comme cité précédemment, cela se fait à l'aide du logiciel MeshMixer®, selon les étapes suivantes :

Isoler les dents :

Une étape préliminaire se met en place, celle-ci consiste à séparer et isoler chaque dent du modèle numérisé dans un fichier STL distinct. Cette étape apporte un confort de travail, permettant ainsi de retoucher chaque dent séparément, de revenir sur le traitement d'un fichier sans prendre le risque d'altérer le fichier initial comprenant

toutes les dents. Cette étape offre donc une liberté de traitement et d'impression ainsi qu'un gain de temps et de matière lors de l'impression.

- Ouvrir MeshMixer® : une page s'affiche offrant plusieurs options.
- Importer un fichier grâce à l'icône « import » qui ouvre une page de dialogue.
- Sélectionner le fichier STL scanné dans le dossier dédié (Figure 8).
- Sélectionner l'onglet « Select » qui ouvre une boîte de dialogue (Figure 9 A). Il suffit alors de colorer à l'aide de l'outil « Brush » les dents à exclure, celles-ci vont se colorer en orange comme ci-dessous (Figure 9 B) puis, dans l'onglet « Edit », sélectionner « Discard » afin de retirer les dents préalablement sélectionnées (Figure 10 A).

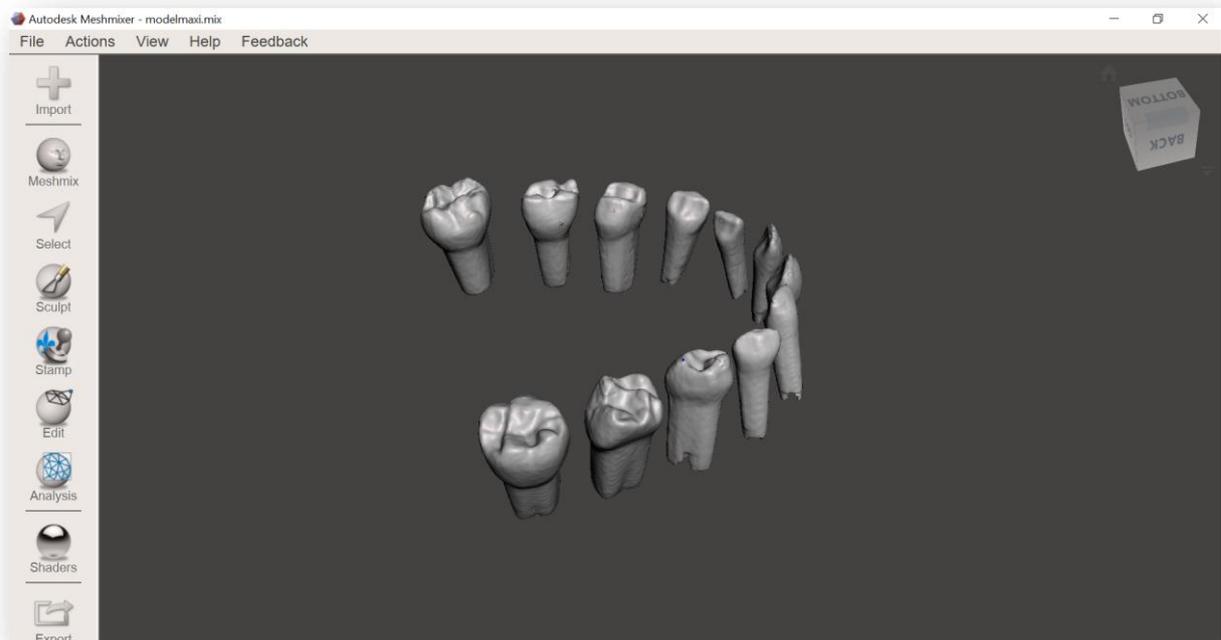
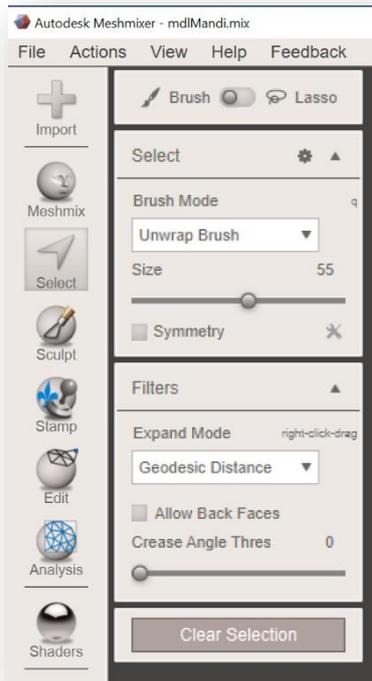
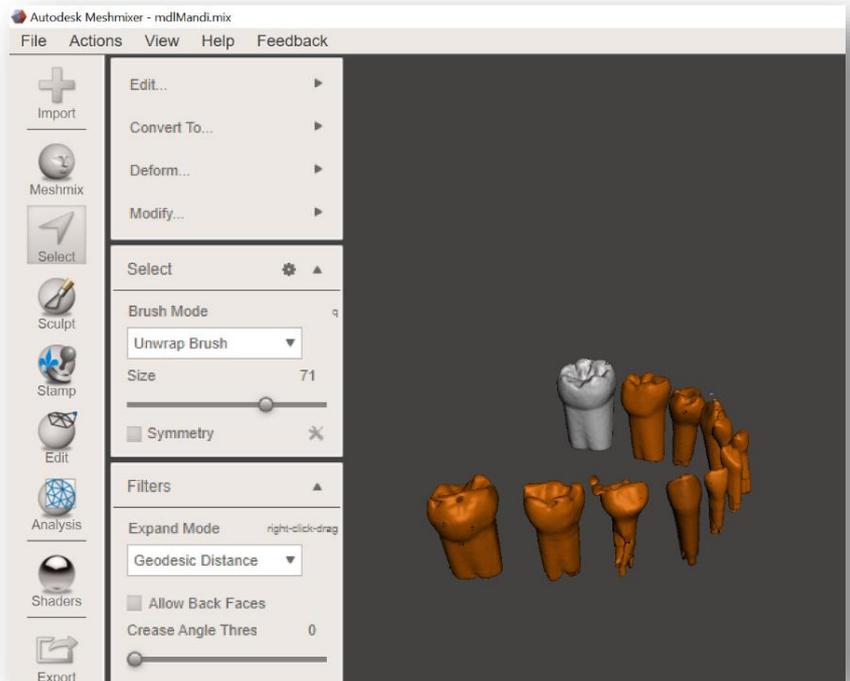


Figure 8 : Modèle maxillaire Frasaco scanné et importé sur le logiciel MeshMixer®
[Source Personnelle]



A



B

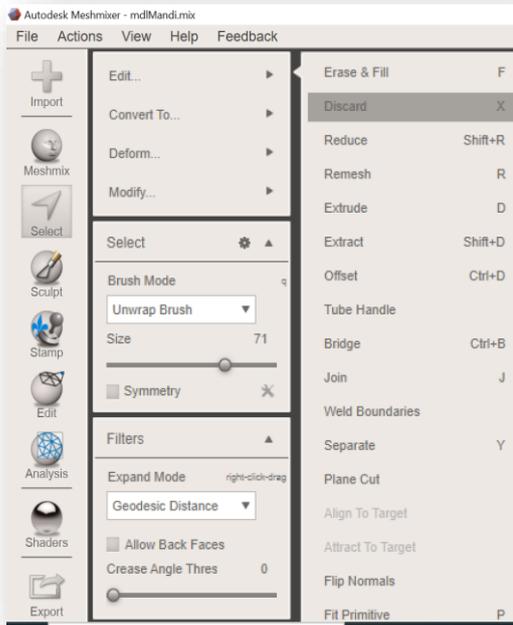
Figure 9: A. Boite de dialogue de l'onglet « Select ». B. Coloration orange des dents à exclure grâce à l'outil « Brush » [Source Personnelle]

Une fois la dent isolée, les outils de Meshmixer permettent de créer des cavités, des formes différentes donnant ainsi une dent virtuelle compatible avec le cahier des charges de cette étude.

Deux étapes préliminaires sont communes à toutes les modifications, elles sont respectivement : ouvrir Meshmixer ; et Importer le fichier de la dent à modifier. La suite des étapes peut différer en fonction du type de modification voulue.

3.1.2.3 Modifier les volumes et les formes :

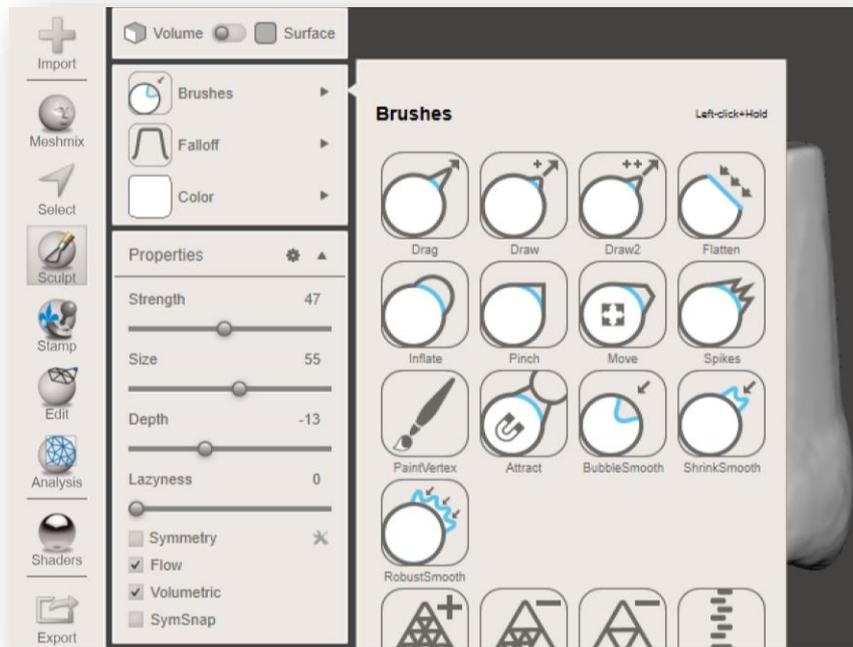
La modélisation au sens propre commence à cette étape. Différents outils sont mis à disposition afin de simuler les différentes situations physiologiques comme la présence d'une pulpe, ou pathologique. Cette dernière catégorie sera représentée par des pertes tissulaires liées à un traumatisme ou une lésion carieuse, des stades de lésions carieuses plus ou moins avancés et des anomalies de structures.



A



B



C

Figure 10: A. Outil « Discard » dans la boîte de dialogue de l'onglet « Edit » ; B. Formes à insérer, disponible dans l'onglet « Meshmixer » ; C. Différents types de « Brushes », disponibles dans l'onglet « Sculpt » [Source Personnelle]

Modification d'un angle incisif :

Une fois les dents isolées dans des fichiers distincts, les modifications se font en fonction du schéma dentaire prévu dans les Tableaux 3 et 4.

Les dents (51) (52) et (61) présentent des angles fracturés pour mimer une situation traumatique. La modélisation s'effectue selon les mêmes étapes pour les 3 dents :

1. Ouvrir l'onglet Select : en ajustant le diamètre, l'outil Brush permet de sélectionner une partie coronaire qui se colore en orange ;
2. Sélectionner l'onglet « Edit » (Figure 10 A) ;
3. Cliquer sur « Erase and fill » : pour soustraire le volume précédemment sélectionné en créant une continuité entre les parois restantes ;
4. Pour adoucir les bords, il suffit d'utiliser l'outil « Brushes » dans l'onglet « Sculpt » en sélectionnant « Flatten » ou « RobustSmooth ». En cliquant sur les surfaces rugueuses ou les bords vifs, ces derniers vont s'arrondir et s'amoinrir (exemple dans la Figure 11).

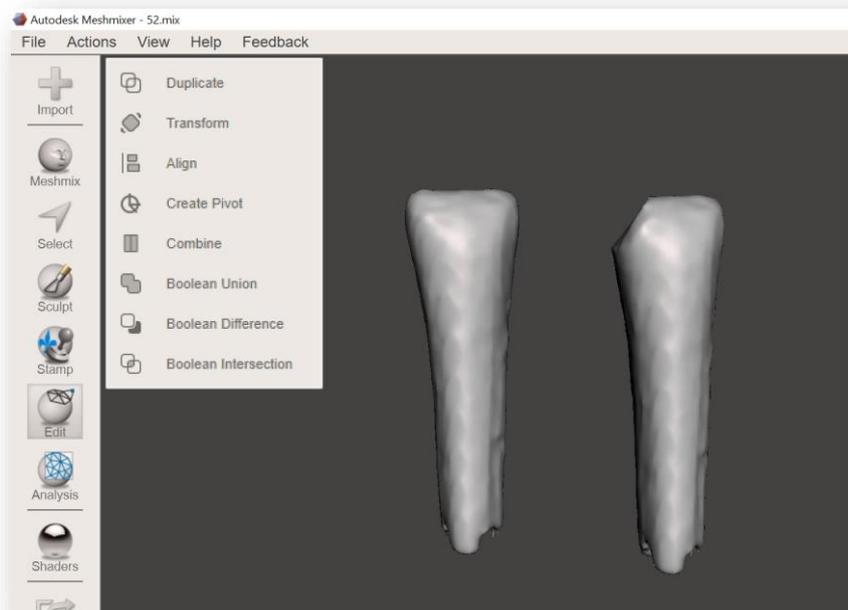


Figure 11 : Comparaison avant et après modification de la (52) simuler une fracture coronaire [Source personnelle]

Modification d'une surface occlusale :

Concernant les dents (65), (26), (75) (84) et (85), la situation clinique décrit une perte de substance occlusale, de profondeur plus ou moins importante mais la conception sur ordinateur se fait selon les mêmes étapes :

1. Ouvrir l'onglet Select : en ajustant le diamètre, l'outil Brush permet de sélectionner une partie coronaire qui se colore en orange (Figure 9 B) ;
2. Sélectionner l'outil « Extrude » dans l'onglet « Edit » ;
3. Ajuster le niveau de la zone sélectionnée grâce au paramètre « offset » pour créer une cavité : en déplaçant le curseur vers la droite, plus la valeur est inférieure à 0 plus la zone sélectionnée est en dessous de la surface de la dent ;
4. Pour adoucir les bords, il suffit d'utiliser l'outil « Brushes » dans l'onglet « Sculpt » en sélectionnant « Flatten » ou « RobustSmooth ». En cliquant sur les surfaces rugueuses ou les bords vifs, ces derniers vont s'arrondir et s'amoinrir ;
5. Enregistrer le nouveau fichier conçu (exemple dans la Figure 12)

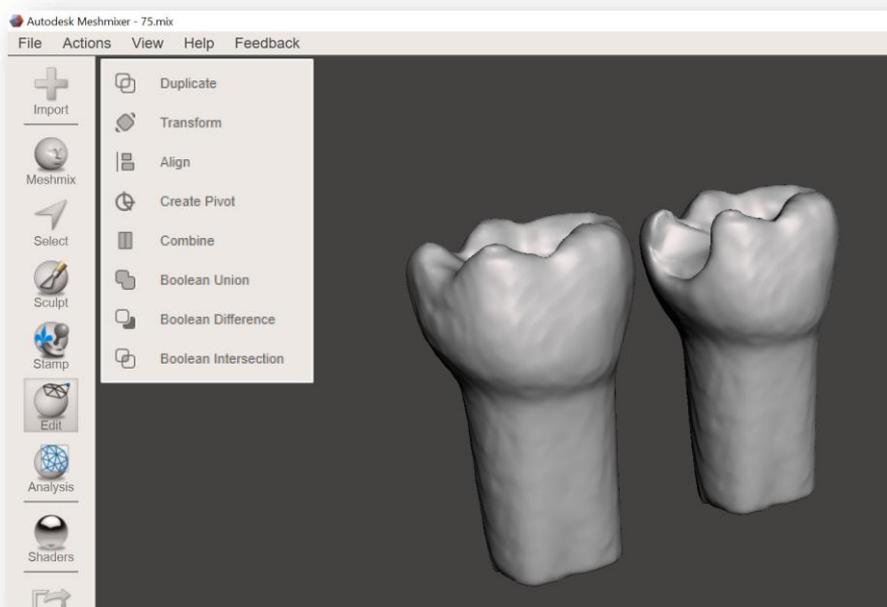


Figure 12: Comparaison avant et après modification de la (75) pour simuler une lésion carieuse proximale [Source personnelle]

Modification d'une surface complète :

Afin de confronter l'étudiant à un maximum de situations cliniques, une dent a été modélisée pour simuler un défaut de structure tissulaire tel un stade avancé de MIH.

Cela permettra d'aborder l'approche préventive adéquat à ce type de pathologies.

1. Ouvrir l'onglet « Sculpt » : choisir « ShrinkSmooth » dans l'outil « Brushes » ;
2. Ajuster les propriétés « Strength/Size/depth/lazyness » afin d'apporter une modification de l'état de surface homogène (Figure 10 C) ;
3. Cliquer sur la surface dentaire au niveau des différentes faces ;
4. Enregistrer le nouveau fichier conçu.

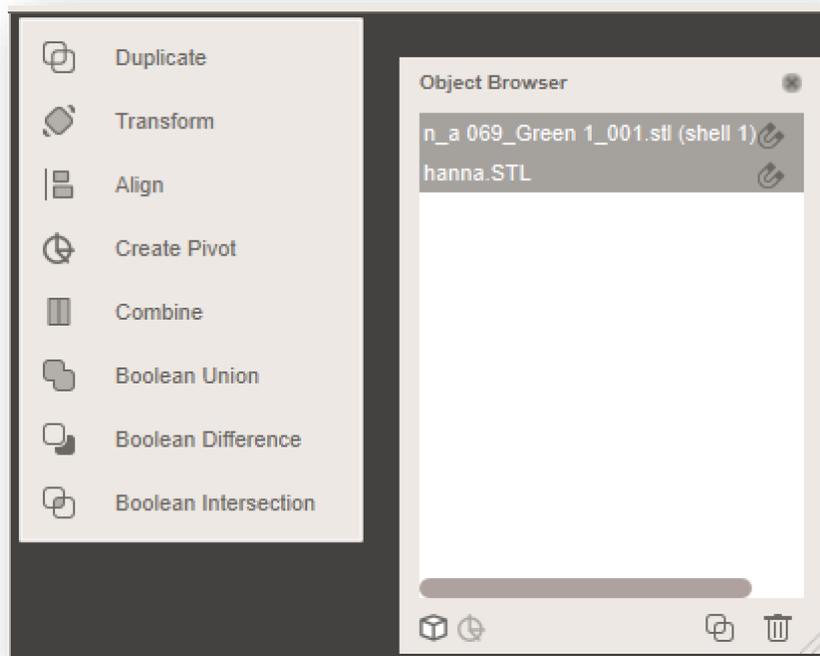
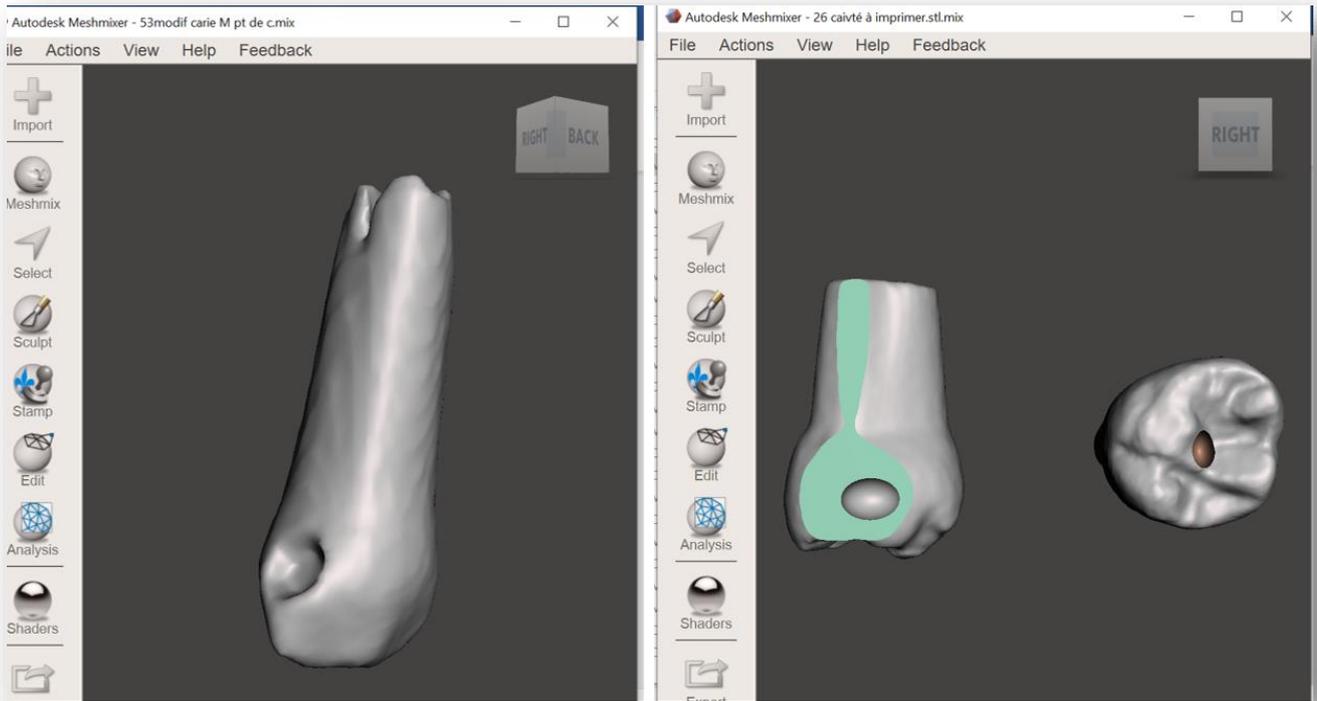


Figure 13: Onglet « Object Browser » permettant l'accès au paramètre « Boolean Difference » [Source personnelle]

Mise en place d'une cavité proximale

1. Cliquer sur l'onglet « Meshmixer » afin d'insérer une forme (Figure 10 B) ;
2. Faire glisser la forme souhaiter, la sphère en l'occurrence. L'insertion d'une forme fait apparaître la boîte de dialogue « Object Browser » qui permet d'afficher, masquer et/ou sélectionner les éléments importés et insérés sur Meshmixer.
3. Ajuster le volume en modifiant la valeur « size » puis donner une forme plus ovale pour mimer la forme d'une cavité. Cela se fait en décochant le paramètre « Uniform scaling » puis en manipulant les vecteurs jusqu'à obtenir la forme souhaitée ;
4. Afin de faciliter la manipulation, l'onglet « Shaders » permet d'afficher la dent en transparence ;
5. Positionner la future cavité à l'intérieur de la dent en laissant une perforation permettant une communication avec l'extérieur ;
6. Mettre la forme qui a été insérée en négatif : en sélectionnant respectivement la dent puis la forme insérée, un onglet s'affiche (Figure 13) offrant plusieurs outils. Cliquer sur « Boolean Difference » pour soustraire le volume inséré et mis en forme à l'étape 5 ;
7. Dans le cadre de l'impression en stéréolithographie qui sera détaillée dans la suite de ce travail, il est nécessaire d'insérer dans la conception une évacuation entre la cavité formée et l'extérieure qui permettra d'injecter de l'air pressurisée afin d'évacuer la résine liquide non photopolymérisée lors de l'impression. Pour cela, il faut donc un orifice d'entrée d'air et un orifice de sortie. La mise en place d'un « tube d'évacuation » est réalisable en suivant les étapes de 3 à 7 en sélectionnant le volume « cylindre ».
8. Enregistrer le nouveau fichier conçu (exemple dans la Figure 14).



A

B

Figure 14 : A. Mise en place d'une cavité proximale sur 53. B. Mise en place d'une cavité proximale sur (16) et (26) grâce à une solution alternative [Source personnelle]

Solution alternative pour mettre en forme une cavité :

1. Sélectionner l'outil « plan cut » dans l'onglet « edit » : un plan de coupe apparait dont le niveau dans les trois sens de l'espace et l'angulation sont modifiable à l'aide de vecteurs. En fonction du niveau où la forme mimant la lésion carieuse sera insérée, le plan de coupe peut être parallèle ou perpendiculaire à la face occlusale.
2. Dérouler les options du paramètre « Cut type », sélectionner « Slice (keep both) » et valider grâce à la touche « Accept » : cette opération permet de dissocier la dent en deux fichiers distincts au niveau du plan de coupe et de faire apparaitre la boîte de dialogue « Object Browser » dont l'intérêt a été expliqué au paragraphe précédent.
3. Sélectionner la partie voulue de la dent divisée, insérer la forme de la future carie, la redimensionner et la positionnée comme expliquée précédemment.
4. Mettre la forme insérée en négatif ;
5. Veiller à laisser une communication entre la cavité et l'extérieur et insérer un cylindre mis en négatif comme seconde communication ;
6. Sélectionner les fichiers dans la boîte de dialogue « Object Browser » puis « Combine » dans l'onglet qui s'affiche ;
7. Enfin, dans l'onglet « Edit » sélectionner « Make Solid ».
8. Enregistrer le nouveau fichier conçu (Figure 10 B).

3.1.2.4 Mise en place d'une chambre pulpaire sur molaires maxillaires permanentes

1. Importer le fichier de la pulpe de molaire maxillaire : dans cette modélisation, la partie radiculaire de la pulpe n'est pas utile, un travail en amont sera donc nécessaire afin de modifier le fichier initial pour ne garder que la pulpe camérale.
2. Redimensionner la pulpe et ajuster l'axe en fonction de la dent
3. Afin de faciliter la manipulation, l'onglet « Shaders » permet de d'afficher la dent en transparence ;
4. Faire glisser la pulpe à l'intérieur de la dent en vérifiant dans tous les sens de l'espace que la pulpe est centrée et que la corne pulpaire la plus haute se situe en mésio-vestibulaire.
5. Mettre la pulpe en négatif : en sélectionnant respectivement la dent puis la pulpe, un onglet s'affiche (Figure 9). Cliquer sur « Boolean Difference » ;
6. Créer une jonction entre la chambre pulpaire et le pas de vis pour avoir une transition homogène entre les deux reliefs négatifs. En suivant les étapes de 3 à 7 du sous-titre précédent et en sélectionnant le volume « cone » le résultat apparait comme ci-dessous (figure 15) ;
7. Comme expliqué précédemment, il doit y avoir une communication entre la cavité creuse et l'extérieur pour que l'air pressurisé puisse entrer et sortir. Le pas de vis étant l'orifice d'entrée, il est donc nécessaire de rajouter un tube d'évacuation qui communique avec le vide de la chambre pulpaire, en suivant les étapes de 3 à 7 du sous-titre précédent et en sélectionnant le volume « cylindre ».
8. Enregistrer le nouveau fichier conçu.

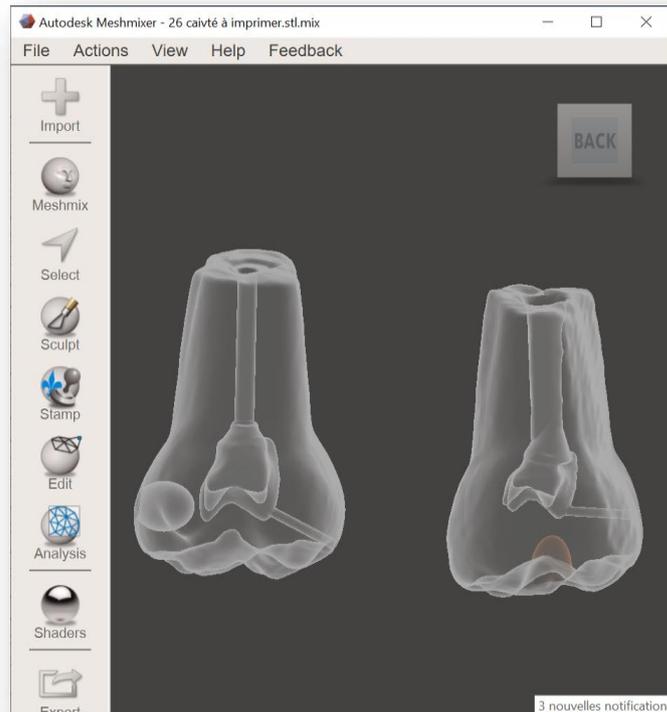


Figure 15: Vue par transparence de (16) et (26) pour afficher le relief pulpaire négatif et le cône de raccordement [Source personnelle]

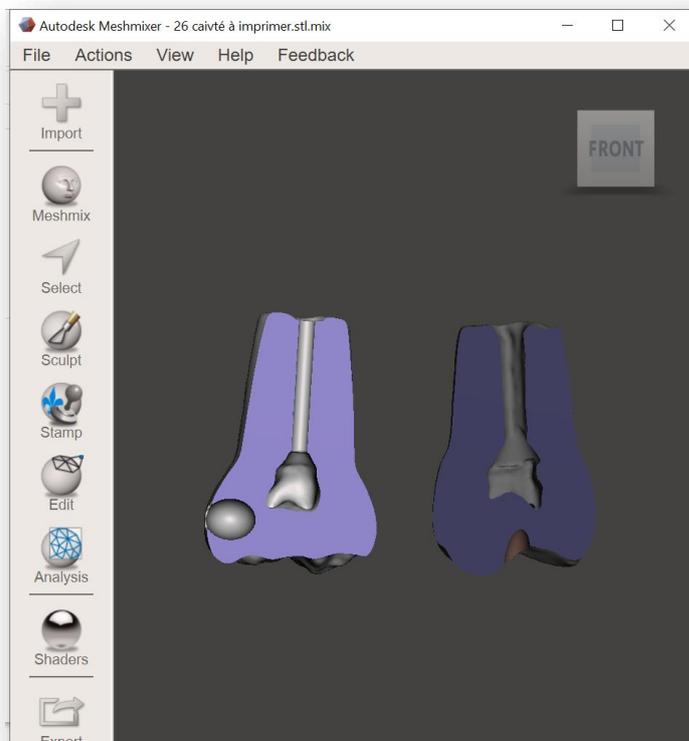


Figure 16 : Vue en coupe mésio-distale de (16) (violet) et en coupe vestibulo-palatine de la (26) (bleu marine) [Source personnelle]

3.2 Fabrication du prototype par Impression 3D

3.2.1 Conversion du format STL au format Preform

Une fois la modélisation des différentes dents terminée, les fichiers STL sont importés dans le logiciel Preform de FormLabs®, qui les converti en un fichier compatible avec l'imprimante 3D.

Ce logiciel de transition donne accès à des paramètres importants à définir avant de lancer l'impression ; tel que le modèle de l'imprimante, le matériau d'impression et l'épaisseur des couches de résine. Ce dernier paramètre a une influence sur la précision et la vitesse d'impression des modèles (Figure 17).

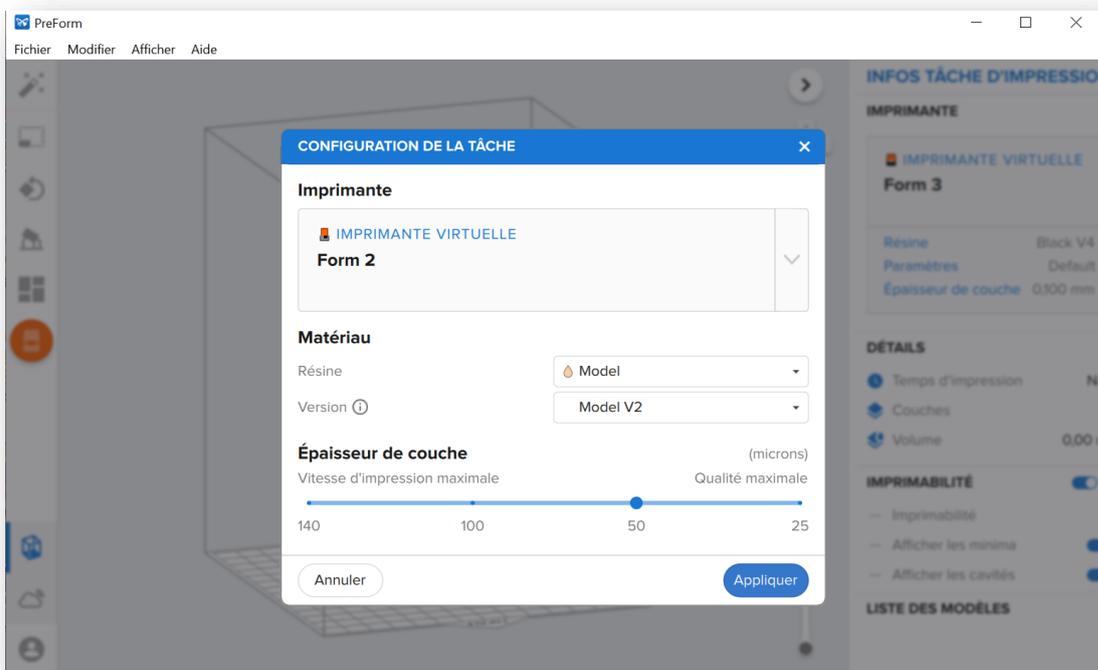


Figure 17 : Configuration des paramètres du logiciel Preform de FromeLabs®
[Source personnelle]

Il s'agit alors d'importer les fichiers STL un à un, en vérifiant que la dimension est fidèle aux dents scannées pour pouvoir les réinsérer dans les logettes définies dans le socle Frasaco®. Enfin, pour chaque dent il faut mettre en place des socles, donnant ainsi une visualisation de ce qui sera imprimé (Figure 18).

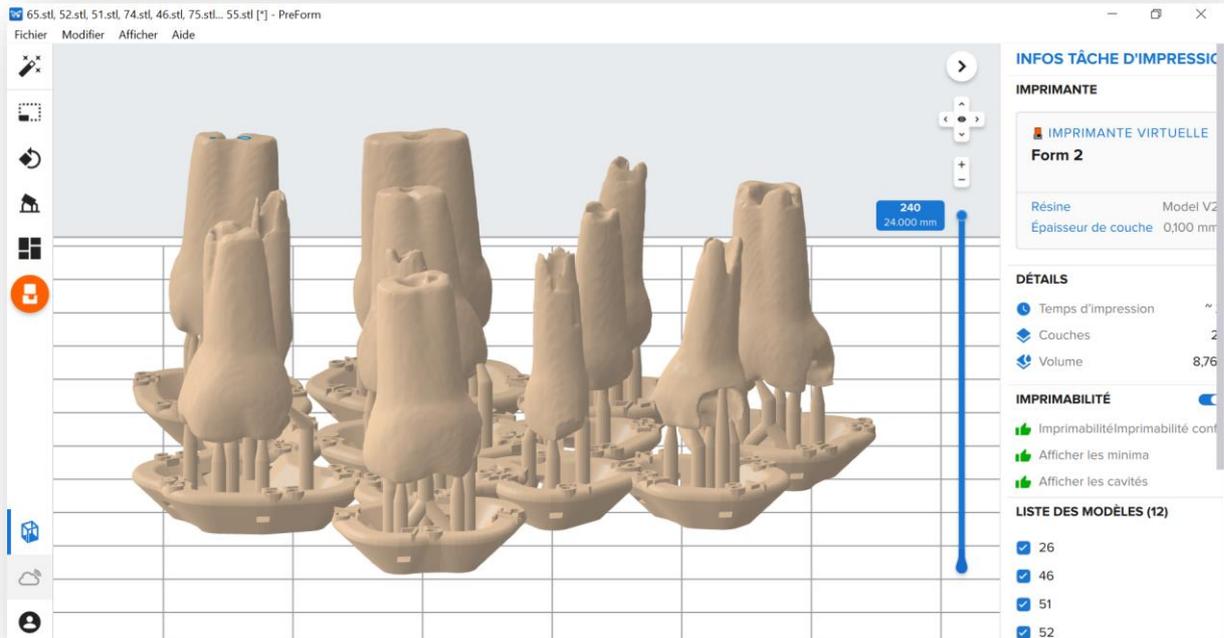


Figure 18: Visualisation des modèles avant impression sur le logiciel Preform® de FormLabs® [Source Personnelle]

Dès que tous les paramètres sont renseignés, les fichiers sont transférés à l'imprimante par une clé USB dans le format Preform® et l'impression peut être lancée.

3.2.2 Impression 3D

3.2.2.1 Les techniques d'impression 3D

Le terme impression en trois dimensions (impression 3D) est généralement utilisé pour décrire une approche de fabrication qui construit des objets une couche à la fois, en ajoutant plusieurs couches pour former un objet [27].

L'impression 3D peut être utilisée pour produire des modèles en utilisant différentes techniques ; les techniques courantes qui utilisent la lumière pour polymériser la résine se font grâce à un appareil de stéréolithographie (SLA), triple technologie de jet (PolyJet), traitement numérique de la lumière (DLP) et production

continue d'interface liquide (CLIP). La technologie SLA est un processus qui utilise un laser ultraviolet pour polymériser les gouttes de résine dans la forme souhaitée. La technique PolyJet est similaire à une imprimante à jet d'encre, elle applique des gouttes polymérisables sur une plate-forme de construction. La technologie DLP utilise un projecteur numérique comme source de lumière pour polymériser la résine liquide couche par couche sur l'ensemble de la plate-forme [28].

3.2.2.2 L'imprimante

L'imprimante 3D qui a été utilisée est la Form 2 de FormLabs® se trouvant au sein de la faculté de chirurgie dentaire (Figure 19 A.).

Cette imprimante répond à certains critères de choix qui déterminent la performance de l'imprimante et les applications possibles telles que la taille de l'imprimante, le volume de l'impression, la taille minimale imprimables (communément appelée comme résolution latérale dans le plan X – Y), le coût de l'imprimante, la vitesse d'impression [29].

La Form 2 fonctionne grâce à la SLA et permet d'imprimer des couches de résine de 25 à 300 microns, ses caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant (Tableau 4).



Figure 19 : [30] A. Imprimante Form 2 de Formlabs®. B. Résine dentale Model FLDMBE02 de Formlabs®.

Tableau 4 : Fiche technique de l'imprimante Form 2 de Formlab® [30].

Domaines	Caractéristiques	Détails
Matériel	Dimensions	35 x 33 x52 cm
	Poids	13 kg
	Température de fonctionnement	Automatique 35°C
	Contrôle de la température : la cuve chauffe automatiquement	La cuve chauffe automatiquement
	Puissance électrique requise	100-240 V ; 1.5 A 50/60 HZ ; 65 W
	Laser	Certifié EN 60825-1 :2007 ; Laser classe 1 ; Laser violet 405nm ; Laser 250 mW
	Connectivité	Wifi, Ethernet et USB
	Chambre optique	Scellée
	Panneau de contrôle	Ecran tactile interactif et bouton poussoir
Propriétés des impressions	Technologie	Stéréolithographie (SLA)
	Décollement	Glissement horizontal et balayage
	Volume d'impression	145 x 145 x 175 mm
	Épaisseur de couche (axe z)	25, 50, 100 microns
	Diamètre du point laser (axe xy)	140 microns
	Supports	Générés automatiquement ; facile à enlever
Logiciel Preform	Configuration requise	windows 7 (64-bit) and up/ Mac OS X 10.10 and up/ OpenGL 2.1 4GB RAM
	Compatibilité matérielle	Imprimante 3D Form 2
	Caractéristiques	Stéréolithographie (SLA) ; Glissement horizontal et balayage ; Automatique
Kit de finition	Plateau de finition, pince plate, support de cuves, cuve de rinçage, bouteille souple, pince coupante, gants en nitrile jetables, PEC*PAD Wipes, tissu en microfibres, outil d'extraction, support d'extraction.	

3.2.2.3 Les matériaux d'impression

L'impression 3D a été réalisée à l'aide d'une résine acrylique liquide photopolymérisable de type « Dental Model » commercialisée par Formlabs® FLDMBE02 (figure 19 B).

3.2.3 La fabrication par stéréolithographie

Pour l'impression du travail réalisé dans le cadre de cette thèse, la technique utilisée était la stéréolithographie.

La stéréolithographie (SLA) a été développée dans les années 1980. Son principe repose sur la polymérisation sélective, couche par couche, d'une résine liquide photosensible. Un faisceau laser incident de longueur d'onde spécifique est orienté à l'aide de micro-miroirs afin de polymériser la résine. Le plateau où repose l'objet se déplace verticalement selon l'épaisseur de la couche déterminée jusqu'à la mise en forme complète de la pièce. La régularité des différentes couches peut être assurée par le mouvement d'un racleur de balayage qui égalise la surface de la résine à chaque mouvement du plateau. La résolution verticale minimale (épaisseur moyenne respective des couches successives) de la SLA varie de 25 à 100 μm selon le dispositif et le paramétrage sélectionnés. Cette résolution reste supérieure aux 20 μm obtenus par usinage [31].

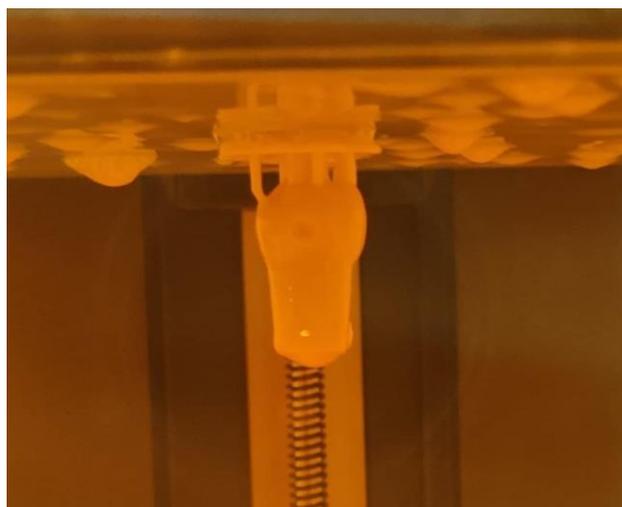


Figure 20: Dent résine en cours d'impression par stéréolithographie [Source personnelle]

3.2.4 Traitement post impression

Le processus d'impression étant achevé, les dents imprimées doivent être traitées dans un bain d'alcool isopropylique (IPA) pendant 30 minutes dans Formwash® de Formlabs® (Figure 21A). Cet outil est conçu dans le but de nettoyer automatiquement la résine liquide non polymérisée sur la surface des pièces imprimées.

Le passage de l'imprimante 3D à la Formwash® impose des mesures de précautions pour éviter le contact direct de la peau et des muqueuses avec la résine liquide et les modèles dont la polymérisation n'est pas complète [32].

Concernant les dents conçues avec des cavités internes, que ça soit une chambre pulpaire ou une lésion carieuse, une étape supplémentaire de nettoyage est nécessaire afin de retirer les résidus de résine non polymérisés. Cela se fait en passant de l'air pressurisé au travers des tubes d'évacuations reliant les cavités internes des dents à l'extérieur.



Figure 21: A. Formwash® de Formlabs® B. FormCure® de Formlabs® [30]

Enfin, pour compléter la photopolymérisation, les dents sont placées dans une chambre de post-traitement ultra-violet (UV) à 60°C pendant 60 minutes. Cette dernière étape de post-polymérisation est réalisée dans la FormCure® de chez Formlabs® (Figure 21B).

3.2.5 Résultat de l'impression

Le résultat de toute la chaîne d'étape de la numérisation au traitement post-polymérisation se présente soit sous la forme d'un plateau solidarisé (figure 6) soit sous la forme de plusieurs dents séparées sur socles individuels (figure 22). Concernant la deuxième catégorie, le socle porte le nom du fichier imprimé qui est dans le cadre de ce projet, le numéro de la dent imprimée.



Figure 22: Dent (26) imprimée avec socle individuel [Source personnelle]

Il s'agit de désolidariser les dents de leurs supports à l'aide d'un bistouri et d'adoucir les surfaces anciennement au contact des tiges à l'aide d'un papier de verre à grain fin.

Dès lors, chaque dent peut être placée dans l'encoche qui lui est dédiée sur le socle et fixée à l'aide d'une vis. Dans le cadre de ce prototype, certains pieds de dents n'étaient pas complètement imprimés, la fixation s'est donc faite à l'aide d'un matériau silicone. Visuellement, les dents issues de l'impression mise en place sur les modèles se distinguent des dents Frasaco® par la couleur (Figure 23).

Une fois mis en occlusion, les deux modèles sont stables (Figure 24).

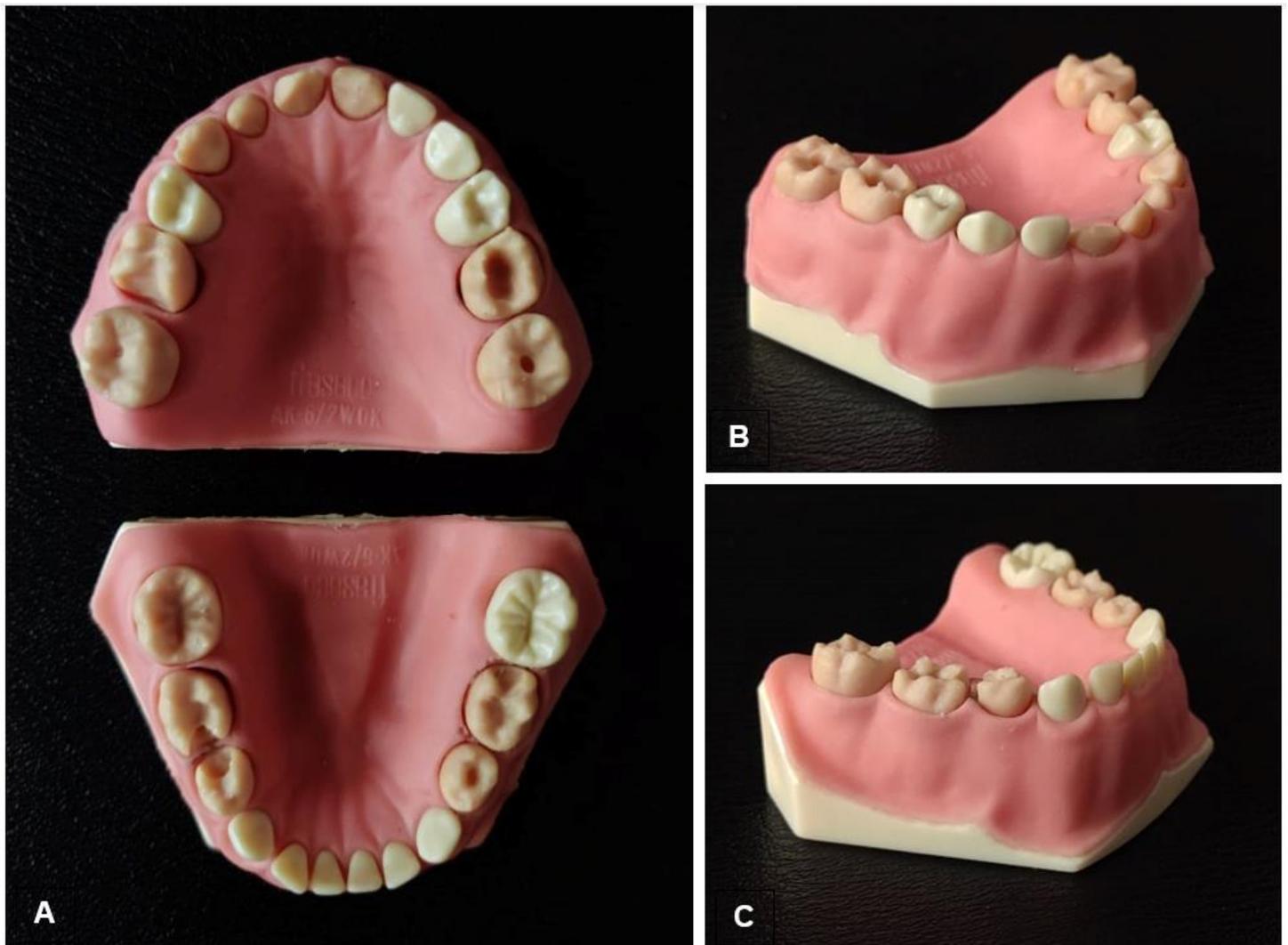


Figure 23 : Modèles maxillaire et mandibulaire avec les dents issues de l'impression.
 A. Vu occlusale des modèles maxillaire et mandibulaire. B. vue disto-vestibulaire du modèle maxillaire. C. vue disto-vestibulaire du modèle mandibulaire



Figure 24: Modèles avec les dents issues de l'impression mis en occlusion

4 Discussion

4.1 Problèmes rencontrés

Au cours de la modélisation et de la fabrication des supports pédagogiques, certains problèmes ont été rencontrés à différents niveaux.

Numérisation

- Résolution du CBCT insuffisante pour les tissus mous. Au cours de la numérisation, les structures de petites dimensions étaient incomplètes, par exemple : le pied des incisives mandibulaires et le pas de vis de toutes les dents.
- Bruits et sensibilité aux artéfacts.
- Nécessité d'ajouter manuellement le format STL car il ne se fait pas automatiquement.

Modélisation

- Logiciel Meshmixer® moins puissant et moins ergonomique que certains logiciels possédant une licence payante.
- Plus la résolution du fichier STL est élevée, plus le logiciel Meshmixer® prendra du temps à l'importer.
- L'emplacement des piliers reliant la dent au socle sont mis de façon aléatoire, si un pilier se place à l'intérieur d'une cavité, il peut être difficile à déposer.
- La dimension des dents peut être altérée lors de la modélisation. La première dent imprimée était surdimensionnée par rapport à la taille voulue (Figure 25 B).

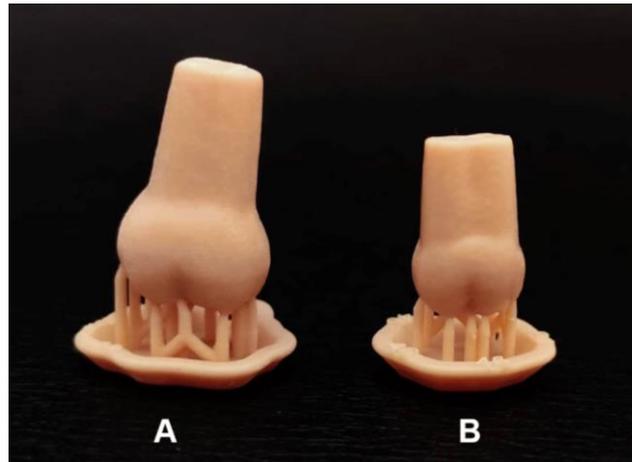


Figure 25: Comparaison des dimensions entre la première dent imprimée (A) et une dent issue d'une seconde impression (B) [Source personnelle]

Impression

- Le matériau d'impression : nécessité de mélanger la résine car les charges sédimentent facilement.
- Caractéristiques de la résine une fois l'impression réalisée : dureté moindre par rapport aux dents Frasaco®, couleur brune non fidèle à la réalité clinique.
- Forte odeur au caractère irritant lors de l'impression.
- Temps d'impression important, proportionnel à la précision voulue.
- Nécessité d'une surveillance afin de relancer l'imprimante dans le cas d'un arrêt précoce.
- Temps de traitement post-impression parfois aussi long que le temps d'impression.

Certains de ces problèmes ont pu être contournés d'autres devront être pris en considération pour l'amélioration et l'évolution de ce projet.

4.2 Solutions éventuelles

Certains des problèmes cités dans le paragraphe précédent pourraient être résolu grâce à une approche différente de ce qui a été réalisé pour cette thèse, d'autres dépendent des moyens disponibles.

Numérisation

- Numérisation à l'aide d'une système d'acquisition plus sensible aux tissus mous comme le micro-CT scan (la micro-tomographie aux rayons X) [33].
- Numériser les surfaces manquantes à l'aide d'une caméra optique, mais cela ne pourra pas améliorer l'acquisition des zones difficiles d'accès comme le pas de vis.
- Injection d'un matériaux tel que le Temp Bond® dans le pas de vis pour en augmenter la radio opacité.

Modélisation

- Utilisation d'un logiciel plus performant pour la modélisation.
- Nécessité d'avoir un ordinateur suffisamment performant pour importer des fichiers de taille conséquente sans ralentir le fonctionnement du logiciel.
- Vérifier l'emplacement des piliers avant le lancement de l'impression.
- Enregistrer les dimensions des dents à l'aide d'un pied à coulisse et veiller à qu'elles ne soient pas altérées sur le logiciel Preform®.

Impression

- Utilisation de plusieurs types de résines pour distinguer les différents tissus de la dent.
- Utilisation de matériaux plus appropriés, si cela est disponible, en couleur, dureté et radio-opacité.
- Définir la précision d'impression suffisante pour avoir des supports pédagogiques fidèles à la réalité clinique et ne pas augmenter le temps d'impression si une meilleure résolution n'apporte pas de bénéfice réel.
- Désigner une personne compétente présente lors de l'impression pour veiller à son bon déroulement.

- Mettre en place un système d'aération efficace au cours de l'impression.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des problèmes rencontrés et de solutions éventuelles tout au long de la chaîne de fabrication [Source personnelle]

Étape de réalisation	Problèmes rencontrés	Solutions éventuelles
Numérisation	<ul style="list-style-type: none"> • Résolution du CBCT • Format STL non automatique 	<ul style="list-style-type: none"> • Numérisation au micro-CT et/ou à la caméra optique
Modélisation	<ul style="list-style-type: none"> • Logiciel Meshmixer® • Difficulté d'importer des fichiers volumineux • Emplacement aléatoire des piliers • Altération des dimensions des dents 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un autre logiciel • Utilisation d'un ordinateur suffisamment performant • Vérifier la localisation des piliers • Renseigner les dimensions voulues avant impression
Impression	<ul style="list-style-type: none"> • Matériau d'impression • Odeur irritante lors de l'impression • Facteur temps/précision de l'impression • Risque d'arrêt intempestif de l'imprimante • Temps de traitement post-impression 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un/de plusieurs matériaux plus appropriés • Système d'aération efficace • Définir la précision nécessaire et suffisante pour l'impression • Désigner une personne compétente pour veiller au bon déroulement de l'impression

4.3 Limites des modèles pédagogiques

Malgré le bénéfice pédagogique, ce travail ne répond pas de façon exhaustive aux objectifs fixés.

Sur le plan conceptuel, certaines applications des soins préventifs (indice de plaque) et conservateurs (ART et IRT) ne pourront pas être ajoutés à la modélisation du support pédagogique.

Sur le plan pédagogique, la présence de dents antérieures maxillaires définitives serait un atout pour la réalisation de contention de maintien en cas de traumatisme. L'idéal serait donc de pouvoir interchanger les dents lactéales et définitive sur le même modèle. De plus, la distinction entre les différents tissus dentaire, à la fois à l'œil nu et radiographiquement, donnerait une perspective plus précise de la réalité clinique (Figure 26) Pour cela, une évolution dans la méthode et les matériaux d'impression s'avère nécessaire.



Figure 26 : Comparaison entre la radio-opacité des différents tissus d'une vraie dent et la radio opacité de la résine d'une dent imprimée en 3D [Source personnelle]

Enfin, comme cela a été réalisé pour les molaires maxillaires définitives, les autres dents doivent bénéficier d'une chambre pulpaire anatomique et d'une anatomie radiculaire propre à chaque dent. L'idéal est de numériser de vraies dents lactéales et définitives immatures afin de respecter l'anatomie dentaire chez l'enfant.

4.4 Avantages et inconvénients de la fabrication des modèles pédagogiques

4.4.1 Avantages

Ce projet apporte une avancée considérable dont les principaux aspects résident dans :

- Sauvegarde numérique des données
- Possibilité de modifier et de faire évoluer le modèle à tout moment.
- Mise à disposition des outils présents à l'UFR3S-odontologie, au service de la pédagogie.
- Gain de temps par l'absence de délais de traitement de commande et de livraison.
- Diminution des besoins vis-à-vis de l'industrie et de l'impact écologique associé (par la diminution des transports).
- Estimation réelle des besoins pour chaque promotion et impression au fur et à mesure.
- Opportunité pour les étudiants de conserver le modèle pédagogique.
- Abord de l'odontologie pédiatrique par la simulation de réels cas cliniques.

4.4.2 Inconvénients

Le modèle résultant de cette thèse est un premier essai dans le domaine, il présente encore certains inconvénients :

- Coût, gestion, entretien et disponibilité des équipements nécessaires.
- Risque d'exposition aux produits chimiques lors de la manipulation de la résine non photopolymérisée :
 - Risque au contact de la peau ou les muqueuses et importance du port de gants et de lunettes
 - Risque par inhalation lors de l'impression.
- Aspect écologique : par l'utilisation d'une quantité importante d'alcool isopropylique lors du rinçage.

- Aspect financier si production à grande échelle et ce que cela impliquerait dans les frais de matériel des étudiants.
- Aspect chronophage de la fabrication qui impliquerait le recrutement d'un technicien à temps partiel afin de :
 - Veiller au bon déroulement de l'impression
 - Traitement post-impression des dents
 - Gestion en amont des commandes de matériaux relatifs à la fabrication.
- Indépendance partielle de l'industrie : le support étant le même que le modèle appartient à Frasaco®.
- Besoin d'évolution certain vis-à-vis des matériaux et de la technique d'impression.

4.5 Perspectives

4.5.1 Evolution du modèle

Les situations cliniques proposées dans le modèle issu de ce travail peuvent être modifiées perpétuellement car toute la chaîne de fabrication se fait localement, dès l'étape de modélisation. L'évolution du modèle s'adapte aux objectifs pédagogiques.

En vue du nombre d'étudiants par promotion, l'imprimante présente à l'UFR3S-odontologie (FromLab®) convient amplement. Toutefois, la méthode d'impression, l'imprimante et la catégorie de résine peuvent évoluer afin d'améliorer la qualité des dents imprimées, en termes de couleur, de dureté et de radio opacité.

Une indépendance totale vis-à-vis de l'industrie devrait être mise en place, par la modification du socle et de la forme de la racine.

La situation idéale serait de numériser les arcades dentaires d'un jeune patient.

4.5.2 Evaluation du modèle

Cette thèse est un premier pas dans l'innovation des supports pédagogiques en odontologie pédiatrique, de ce fait, une évaluation des différents aspects de ces dents imprimées doit être réalisée avant de les intégrer dans les travaux pratiques :

Les critères d'évaluation peuvent être décrit comme cela :

- Le matériau d'impression :
 - Dureté et résistance du matériau au fraisage.
 - Compatibilité avec un système de collage.
 - Radio-opacité.
- Questionnaire de Feed back pour les étudiants.
- Étude économique du projet : à l'échelle d'un modèle et à celle d'une promotion.

4.5.3 Production à grande échelle

Après l'évaluation des différents aspects liés à la fabrication et afin de mettre en application ces supports pédagogiques, une impression à grande échelle doit être envisagée.

Une étude doit être mise en place pour évaluer le coût total de ce projet pour une promotion, en prenant en compte :

- Le prix du matériel et son entretien : l'imprimante, le bac d'alcool nettoyant ainsi que la chambre à photopolymérisation UV.
- Les consommables : résine, IPA, consommation électrique.
- La rémunération éventuelle d'un technicien à temps partiel.
- Comparaison entre le coût d'un modèle imprimé et de celui d'un modèle de l'industrie.
- Évaluation des répercussions sur les frais de matériels demandés aux étudiants en début de cursus.

D'autre part, le temps nécessaire pour toute la chaîne de fabrication doit également être étudiée (tableau 6).

Tableau 6: Tableau résumé du temps nécessaire à chaque étape de la chaîne de fabrication dans l'optique d'une production à grande échelle [Source personnelle]

Etapes			Temps nécessaire	
Numérisation			10 minutes	
Modélisation			2 à 3 heures	
Impression	Préparation de l'imprimante (monté en température)		10 à 15 minutes	
	Temps réel d'impression (37 °C)	Nombre de dents	Pour 1 dent	Pour 66 dents
		25µm	6h45	13h15
		50µm	3h	4h45
		100µm	1h30	2h45
	Traitement à l'alcool isopropylique (60 °C)		30 minutes	
Photopolymérisation		60 minutes		
Traitement post-impession	Dépose des socles au bistouri et polissage		1 minute/dent	

Sur ce tableau figure une comparaison entre le temps nécessaire pour imprimer une dent et pour en imprimer 66. Ce dernier nombre étant le maximum de dents imprimable en une fois grâce à l'imprimante Form 2 de FormLabs®.

Le temps réel d'impression n'inclut pas le temps de préparation de l'imprimante qui lui permet d'élever la température à 37 °C. Ce temps varie de la température ambiante autour de l'imprimante et dure entre 5 et 10 minutes.

5 Conclusion

La CFAO a aujourd'hui une place indétrônable dans l'exercice odontologique et s'insère de plus en plus dans le parcours pédagogique, permettant l'innovation au profit de l'étudiant et de sa formation. C'est dans cet esprit que ce travail de thèse a été réalisé.

Grace au matériel mis à disposition par l'UFR3S-Odontologie de Lille, ce projet d'innovation a pu aboutir. Donnant ainsi, des supports pédagogiques personnalisés pour les travaux pratiques en odontologie pédiatrique modélisés et imprimés en 3D au sein même des locaux de la faculté.

Cette première approche apporte des informations sur les différents aspects à prendre en compte afin d'optimiser cette chaîne de fabrication et d'en améliorer le bénéfice pédagogique.

Chaque étape de la modélisation et de l'impression a été détaillée afin de normaliser ce processus et de pouvoir faire évoluer ces supports jusqu'à s'affranchir de l'industrie et de la gestion qui y est associée.

Un travail considérable doit encore être réalisé avant l'utilisation généralisée de ces modèles pédagogiques et une étude complète des avantages et inconvénients d'une production à grande échelle doit être menée. Et ce, en mettant l'intérêt pédagogique au cœur de toute cette réflexion.

Bibliographie

1. Höhne C, Schwarzbauer R, Schmitter M. Introduction of a new teaching concept for crown preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ.* 2020;24:526–34p.
2. Mariño R, Ramos-Gómez F, Manton DJ, Onetto JE, Hugo F, Feldens CA, et al. The future of pediatric dentistry education and curricula: a Chilean perspective. *BMC Oral Health.* 2016;17p.
3. Reymus M, Fotiadou C, Hickel R, Diegritz C. 3D-printed model for hands-on training in dental traumatology. *Int Endod J.* 2018;51:1313–9p.
4. Lugassy D, Levanon Y, Shpack N, Levartovsky S, Pilo R, Brosh T. An interventional study for improving the manual dexterity of dentistry students. *PLOS ONE. Public Library of Science;* 2019;14:e0211639.
5. Kato A, Ziegler A, Utsumi M, Ohno K, Takeichi T. Three-dimensional imaging of internal tooth structures: Applications in dental education. *J Oral Biosci.* 2016;58:100–11.p
6. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ.* 2019;83:1100–6p.
7. Chae YK, Lee H, Jih MK, Lee H-S, Lee J-W, Kim S-H, et al. Validation of a three-dimensional printed model for training of surgical extraction of supernumerary teeth. *Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur.* 2020;
8. Chisini LA, Collares K, Cademartori MG, de Oliveira LJC, Conde MCM, Demarco FF, et al. Restorations in primary teeth: a systematic review on survival and reasons for failures. *Int J Paediatr Dent.* 2018;28:123–39p.
9. Collège des Enseignants en odontologie pédiatrique. Guide d'odontologie pédiatrique La clinique par la preuve 2e édition. CdP. 2018;2;458p.
10. Ahovuo-Saloranta A, Forss H, Walsh T, Nordblad A, Mäkelä M, Worthington HV. Pit and fissure sealants for preventing dental decay in permanent teeth. *Cochrane Database Syst Rev.* 2017;7:CD001830.
11. Schorer-Jensma MA, Veerkamp JSJ. A comparison of paediatric dentists' and general dental practitioners' care patterns in paediatric dental care. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent.* 2010;11:93–6p.
12. Franzon R, Opdam NJ, Guimarães LF, Demarco FF, Casagrande L, Haas AN, et al. Randomized controlled clinical trial of the 24-months survival of composite resin restorations after one-step incomplete and complete excavation on primary teeth. *J Dent.* 2015;43:1235–41p.
13. Dorri M, Martinez-Zapata MJ, Walsh T, Marinho VC, Sheiham (deceased) A, Zaror C. Atraumatic restorative treatment versus conventional restorative treatment for managing dental caries. *Cochrane Database Syst Rev.* 2017;2017.
14. Bhoopathi P, Voruganti S, Kotha A, M S M, Gandhi B, Suresh N. An Efficacy Study between High Viscosity Glass Ionomers and Resin Sealants in Fissure Caries Prevention: A 2-Year Split Mouth Randomized Controlled Trial. *Eur J Dent.* 2021;

15. Saber AM, El-Housseiny AA, Alamoudi NM. Atraumatic Restorative Treatment and Interim Therapeutic Restoration: A Review of the Literature. *Dent J.* 2019;7p.
16. Dhar V, Hsu KL, Coll JA, Ginsberg E, Ball BM, Chhibber S, et al. Evidence-based Update of Pediatric Dental Restorative Procedures: Dental Materials. *J Clin Pediatr Dent.* 2015;39:303–10p.
17. Chauhan A, Saini S, Dua P, Mangla R. Rotary Endodontics in Pediatric Dentistry: Embracing the New Alternative. *Int J Clin Pediatr Dent.* 2019;12:460–3p.
18. Setia V, Pandit IK, Srivastava N, Gugnani N, Sekhon HK. Space maintainers in dentistry: past to present. *J Clin Diagn Res JCDR.* 2013;7:2402–5p.
19. Innes N, Evans D, Hall N. The Hall Technique for Managing Carious Primary Molars. *Dent Update.* 2009;36:472–4, 477p.
20. Vazquez M-P, Kadlub N, Soupre V, Galliani E, Neiva-Vaz C, Pavlov I, et al. Facial trauma and injury in children. *Ann Chir Plast Esthet.* 2016;61:543–59p.
21. Tenenbaum A, Sarric M, Bas AC, Toledo R, Descroix V, Azogui-Levy S. Children’s consultations for dental emergency. Retrospective study in Île-de-France. *Rev Epidemiol Sante Publique.* 2020;68:17–24p.
22. Cours : E-learning Dental-Trauma 2021 [Internet]. [cited 2021 Nov 10]. Available from: <https://moodle.univ-lille.fr/course/view.php?id=22081>
23. Horner K, Jacobs R, Schulze R. Dental CBCT equipment and performance issues. *Radiat Prot Dosimetry.* 2013;153:212–8p.
24. Pauwels R, Araki K, Siewerdsen JH, Thongvigitmanee SS. Technical aspects of dental CBCT: state of the art. *Dentomaxillofacial Radiol. British Institute of Radiology;* 2015;44,120140224:20p.
25. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent.* 2020;45:30–40p.
26. Benchikh S. TRAITEMENT NUMÉRIQUE D’UNE EMPREINTE EN PROTHÈSE AMOVIBLE COMPLÈTE PAR L’UTILISATION DU CONE BEAM. [Faculté de chirurgie dentaire de Lille]: UFR3S-odontologie; 2020,100p.
27. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219:521–9p.
28. Rungrojwittayakul O, Kan JY, Shiozaki K, Swamidass RS, Goodacre BJ, Goodacre CJ, et al. Accuracy of 3D Printed Models Created by Two Technologies of Printers with Different Designs of Model Base. *J Prosthodont.* 2020;29:124–8p.
29. Tully JJ, Meloni GN. A Scientist’s Guide to Buying a 3D Printer: How to Choose the Right Printer for Your Laboratory. *Anal Chem. American Chemical Society;* 2020;92:14853–60p.
30. Spécifications techniques - Form 2 [Internet]. Formlabs. [cited 2021 Nov 2]. Available from: <https://formlabs.com/fr/3d-printers/form-2/tech-specs/>
31. Chia HN, Wu BM. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *J Biol Eng.* 2015;9:1–14p.

32. Lipari Fornaciari E. Évaluation des risques chimiques liés aux imprimantes 3d en milieu professionnel. [Lille (France) : Université Lille 2]: UNIVERSITÉ DE LILLE Faculté Ingénierie et Management de la Santé; 2018,70p.

33. Cresswell-Boyes AJ, Barber AH, Mills D, Tatla A, Davis GR. Approaches to 3D printing teeth from X-ray microtomography. J Microsc. 2018;272:207–12.

Table des figures

Figure 1 : Modèles de dents temporaires naturelles [source personnelle].....	19
Figure 2 : Modèles d'odontologie pédiatriques Frasaco® actuellement utilisés pour les travaux pratiques en DFASO 1. Modèle maxillaire et mandibulaire, en vue occlusale et antéro-vestibulaire [source personnelle].....	21
Figure 3 : Photographie en vue supérieure du modèle pédagogique mandibulaire « Bob » [source personnelle].....	22
Figure 4 : 2 dents temporaires imprimés en 3D en résine blanche. A. Vue occlusale et proximale. B. Vue linguo occlusal d'une dent saine et une dent avec cavité d'accès occlusale[source personnelle].....	23
Figure 5 : Dent imprimée en résine brune pour entraînement au traitement endodontique sur dent temporaire [source personnelle].....	23
Figure 6 : Impression groupée de plusieurs molaires temporaires pour entraînement au traitement endodontique [source personnelle].....	24
Figure 7 : Schéma résumé du modèle à concevoir	36
Figure 8 : Modèle maxillaire Frasaco scanné et importé sur le logiciel MeshMixer® [Source Personnelle].....	43
Figure 9 : A. Boite de dialogue de l'onglet « Select ». B. Coloration orange des dents à exclure grâce à l'outil « Brush » [Source Personnelle].....	44
Figure 10 : A. Outil « Discard » dans la boîte de dialogue de l'onglet « Edit » ; B. Formes à insérer, disponible dans l'onglet « Meshmixer » ; C. Différents types de « Brushes », disponibles dans l'onglet « Sculpt » [Source Personnelle].....	45
Figure 11 : Comparaison avant et après modification de la 52 pour simuler une fracture coronaire [Source personnelle].....	46
Figure 12 : Comparaison avant et après modification de la 75 pour simuler une carie proximale [Source personnelle]	47
Figure 13 : Onglet « Object Browser » permettant l'accès au paramètre « Boolean Difference » [Source personnelle]	48
Figure 14 : A. Mise en place d'une cavité proximale sur 53. B. Mise en place d'une cavité proximale sur 16 et 26 grace à une solution alternative [Source personnelle]	50
Figure 15 : Vue par transparence de 16 et 26 pour afficher le relief pulpaire négatif et le cone de raccordement [Source personnelle].....	53
Figure 16 : Vue en coupe mésio-distale de 16 (violet) et en coupe vestibulo-palatine de la 26 (bleu marine) [Source personnelle].....	53
Figure 17 : Configuration des paramètres du logiciel Preform de FromeLabs® [Source personnelle].....	54
Figure 18 : Visualisation des modèles avant impression sur le logiciel Preform® de FormLabs® [Source Personnelle]	55
Figure 19 : [30] A. Imprimante Form 2 de Formlabs®. B. Résine dental Model FLDMBE02 de Formlabs®	56
Figure 20 : Dent résine en cours d'impression par stéréolithographie [Source personnelle]	58
Figure 21 : A. Formwash® de Formlabs® B. FormCure® de Formlabs® [30].....	59
Figure 22 : Dent (26) imprimée avec socle individuel [Source personnelle]	60
Figure 23 : modèles maxillaire et mandibulaire avec les dents issues de l'impression. A. Vu occlusale des modèles maxillaire et mandibulaire. B. vue disto-vestibulaire du modèle maxillaire. C. vue disto-vestibulaire du modèle mandibulaire	61
Figure 24 : Modèles avec les dents issus de l'impression mis en occlusion	61

Figure 25: Comparaison des dimensions entre la première dent imprimée (A) et une dent issue d'une seconde impression (B) [Source personnelle]..... 63

Figure 26 : Comparaison entre la radio-opacité des différents tissus d'une vraie dent et la radio opacité de la résine d'une dent imprimée en 3D [Source personnelle]..... 66

Table des tableaux

Tableau 1: Emploi du temps des travaux pratiques d'odontologie pédiatrique en DFASO 1.....	18
Tableau 2 : Maquette des situations clinique pour chaque dent du prototype	37
Tableau 3: Logiciels pour le traitement des données [26].	42
Tableau 4 : Fiche technique de l'imprimante Form 2 de Formlab® [30].	57
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des problèmes rencontrés et de solutions éventuelles tout au long de la chaine de fabrication [Source personnelle]	65
Tableau 6: Tableau résumé du temps nécessaire à chaque étape de la chaine de fabrication dans l'optique d'une production à grande échelle [Source personnelle]...	70

Modélisation et fabrication de supports pédagogiques imprimés en 3D pour les TP d'odontologie pédiatrique / **TAZDAÏT Hanna**.- p.79 : ill. 32 ; réf. 33.

Domaines : Odontologie pédiatrique, Enseignement

Mots clés Rameau: Modèle, pédagogique, odontologie pédiatrique, modélisation, impression.

Mots clés FMeSH: Odontologie pédiatrique, pédagogique, modélisation, impression.

Résumé de la thèse :

La conception et la fabrication par impression 3D ont investi le monde de l'odontologie et peuvent aujourd'hui être mis à profit dans la pédagogie.

Cette thèse a pour objectif de faire évoluer les supports pédagogiques en odontologie pédiatrique grâce à la modélisation et les outils d'impression disponibles au sein de l'UFR3S-odontologie.

En numérisant les supports pédagogiques actuels à l'aide du CBCT, il est possible de modéliser différentes situations cliniques par la simulation de cavités pulpaires, lésions carieuses et de pertes de substances traumatiques. Cette étape numérique nécessite différents logiciels jusqu'à obtenir une version prête à l'impression.

Le processus fabrication des supports commence par l'impression et passe par plusieurs étapes de désinfection et de polymérisation avant de pouvoir être utilisés.

Ce projet ayant abouti à l'échelle d'un modèle pédagogique, il serait intéressant d'évaluer la faisabilité d'une production à plus grande échelle en prenant en compte l'intérêt pédagogique et les contraintes de fabrication.

Cette thèse a permis la conception d'un groupe de dent temporaires et définitives en résine qui met en situation l'étudiant dans sa phase pré-clinique en odontologie pédiatrique, lui permettant l'acquisition de compétences pour sa pratique future.

JURY :

Président : Madame le Professeur DELFOSSE Caroline

Asseseurs : Monsieur le Docteur VANDOMME Jérôme

Monsieur le Docteur MARQUILLIER Thomas

Monsieur le Docteur HAMOUCH Salim

Membre invité : Monsieur le Docteur DENIS Corentin