



UNIVERSITÉ DE LILLE
DEPARTEMENT FACULTAIRE UFR3S-ODONTOLOGIE

[Année de soutenance : 2025]

N°:

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

Présentée et soutenue publiquement le 5 mars 2025

Par Bastien HAUCHECORNE

Né le 24 MARS 1998 à HARFLEUR – FRANCE

Les modèles pédagogiques imprimés en 3D en chirurgie-dentaire, intérêts, limites : une revue de la littérature

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Lieven ROBBERECHT

Assesseurs :

Madame le Docteur Marion DEHURTEVENT

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Madame le Docteur Marine HENAUT

Président de l'Université :	Pr. R. BORDET
Directrice Générale des Services de l'Université :	A.V. CHIRIS FABRE
Doyen UFR3S :	Pr. D. LACROIX
Directrice des Services d'Appui UFR3S :	A. PACAUD
Vice doyen département facultaire UFR3S-Odontologie :	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services :	L. KORAÏCHI
Responsable de la Scolarité :	V MAURIAUCOURT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE

PROFESSEUR DES UNIVERSITES EMERITE

E DEVEAUX Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

K. AGOSSA Parodontologie

P. BOITELLE Responsable du département de Prothèse

T. COLARD Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux

**C. DELFOSSE Vice doyen du département facultaire UFR3S-
Odontologie
Odontologie Pédiatrique
Responsable du département d'Orthopédie dento-
faciale**

**L ROBBERECHT Responsable du Département de Dentisterie
Restauratrice Endodontie**

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

T. BECAVIN	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
F. BOSCHIN	Parodontologie
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
C. DENIS	Prothèses
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	Responsable du Département de Parodontologie
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
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 - CHU Lille
C. OLEJNIK	Responsable du Département de Biologie Orale
H. PERSOON	Dentisterie Restauratrice Endodontie (Maître de conférences des Universités associé)
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. SAVIGNAT	Responsable du Département de Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
T. TRENTESAUX	Responsable du Département d'Odontologie Pédiatrique
J. VANDOMME	Prothèses
R. WAKAM KOUAM	Prothèses

PRATICIEN HOSPITALIER et UNIVERSITAIRE

M Bedez

Biologie Orale

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

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

Aux membres du Jury,

Monsieur le Professeur Professeur Lieven ROBBERECHT

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Lille

Habilité à diriger des recherches

Responsable du Département de Dentisterie Restauratrice

Endodontie

Madame le Docteur Marion DEHURTEVENT

Maître de Conférences des Universités – Praticien hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master Recherche Biologique et Santé - Université de Lille

Doctorat de l'Université polytechnique des Hauts-De-France – Ecole doctorale science de la matière, rayonnement et environnement de Lille

Habilitation à Diriger les Recherches - Université de Lille

Diplôme Universitaire en prothèse Amovible Complète - Université de Lille

Diplôme Universitaire d'Occlusodontie et de Réhabilitation Orale Fonctionnelle - Université de Lille

Certificat d'Etude Supérieure en Prothèse Fixée - Université de Nantes

Lauréate de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire - 2018

Chargée de mission Nouvelles Technologies

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire

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

C.E.S Prothèses Fixées – Université d'Aix-Marseille

Madame le Docteur Marine HENAUT

Chef de Clinique des Universités – Assistant Hospitalier

Section de Réhabilitation Orale

Département de Dentisterie Restauratrice Endodontie

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master 2 Dispositifs Médicaux et Biomatériaux – Conception et Evaluation

À mes proches,

Table des matières

Table des abréviations	16
Introduction	17
1. Les modèles pédagogiques.....	19
1.1 Les modèles pédagogiques dentaires actuels	21
1.2 Problèmes rencontrés avec les modèles actuels	21
1.3 Les modèles imprimés en 3D en médecine.....	22
1.4 Le début des modèles imprimés en 3D en chirurgie-dentaire.....	22
1.5 Avantages et inconvénients de ces modèles imprimés en 3D en chirurgie-dentaire	23
2. L'impression 3D : une nouvelle méthode d'impression au service de la chirurgie-dentaire	24
2.1. Principes Généraux : de la 2 dimension (2D) à la 3 dimension (3D)	24
2.2. L'impression 3D.....	25
2.3. Les différents procédés d'impression en 3D	26
2.3.1 Stéréolithographie (SLA) et Digital Light Processing (DLP)	26
2.3.2 Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF).....	28
2.3.3 PolyJet (PJ).....	30
2.3.4 Selective Laser Sintering (SLS) & Selective Laser Melting (SLM)	31
2.3.5 Binder Jetting (BJ)	32
3. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D en chirurgie-dentaire	34
3.1. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D à visée endodontique	35
3.1.1 Les modèles unitaires en résine transparente.....	35
3.1.2 Les modèles unitaires en résine opaque	37
3.1.2.1 Les modèles développés pour la réalisation de cavités d'accès	37
3.1.2.2 Les modèles développés pour la réalisation de traitements endodontiques complets..	38
3.1.3 Les modèles d'arcade complète	42
3.2. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en dentisterie prothétique fixée et amovible	44
3.2.1 Les modèles en dentisterie prothétique fixée	44
3.2.2 Les modèles en dentisterie prothétique amovible	48
3.3 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en dentisterie restauratrice	51
3.4 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en implantologie	57
3.5 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en pédodontie	59
3.6 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en traumatologie	61
3.7 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en anatomie externe des dents.....	63
Tableau récapitulatif.....	65

Conclusion	70
Bibliographie.....	71
Webographie	76
Table des figures	77
Table des tableaux	79

Table des abréviations

2D = 2 Dimensions

3D = 3 Dimensions

ATM = Articulation Temporo-Mandibulaire

BJ = Binder Jetting

CAO = Conception Assistée par Ordinateur

CD = Chirurgien-Dentiste

CPP = Coiffe Pédiatrique Préformée

CT = Computed Tomography

CVI = Ciment Verre Ionomère

CVIMAR = Ciment Verre Ionomère Modifié par Ajout de Résine

μCT = Micro-Computed Tomography

DLP = Digital Light Processing

EAL = Localisation Electronique d'Apex

FAO = Fabrication Assistée par Ordinateur

FDM = Fused Deposition Modeling

FFF = Fused Filament Fabrication

ICA = Aide Nettoyage Interdentaire

ICDAS = International Caries Detection And Assessment System

IDB = Brossette Inter Dentaire

OCP/OPC = Oblitération du Canal Pulpaire

ODF = Orthopédie Dento-Faciale

PJ = PolyJet

PLA = Acide Polylactique

RCS = Simulateur de Canal Radiculaire

SCR = Elimination Sélective des Caries

SLA = Stéréolithographie

SLM = Selective Laser Melting

SLS = Selective Laser Sintering

STL = Stéréolithographie

TP = Travaux Pratiques

Introduction

La formation initiale des étudiants en chirurgie-dentaire pendant leur cursus universitaire constitue une base essentielle élémentaire pour leur future activité clinique de chirurgien-dentiste (CD). Cette formation globale repose sur un modèle pédagogique bien défini reposant sur les travaux de Bloom. Ce modèle d'apprentissage se propose de hiérarchiser les étapes du processus global en un système schématisé de pyramide dans lequel il est nécessaire de maîtriser le/les niveau(x) inférieur(s) afin de pouvoir passer au niveau supérieur (Fig. 1).

Concrètement, lors des études de CD, l'étudiant doit acquérir une base théorique solide en **mémorisant** et en **comprenant** des informations. Il pourra ensuite passer à la formation pratique en **appliquant** ces informations tout en **analysant** la situation conjointement. C'est une fois cette partie de la formation maîtrisée que nous pourrions avoir une activité clinique avec les patients après avoir **synthétiser** l'ensemble de ce processus (1).

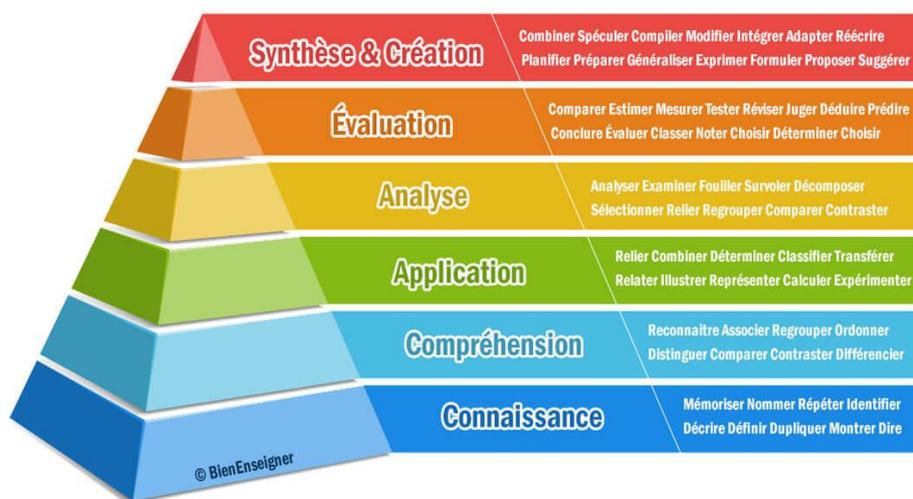


Figure 1 : Schéma représentant le principe pyramidal de la taxonomie de Bloom¹.

Ainsi, afin de permettre à ces futurs praticiens de bénéficier d'une formation pratique la plus optimale possible, il semble nécessaire de leur offrir les meilleurs outils existants.

¹ BienEnseigner É de. Le guide complet de la taxonomie de Bloom [Internet]. Bien Enseigner. 2021 [consulté 30 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.bienenseigner.com/taxonomie-de-bloom/>

Les évolutions technologiques ainsi que la complexification des thérapeutiques en chirurgie-dentaire sont constantes. Les modèles pédagogiques utilisés actuellement, tels que les modèles en plâtre, les dents artificielles ou bien les dents naturelles, présentent des inconvénients. Afin de remédier à ces limites, et donc obtenir des modèles plus réalistes se rapprochant des conditions cliniques, faire évoluer ces outils est un enjeu capital pour les instituts formateurs.

Avec l'essor important des imprimantes en 3 dimensions (3D) ces dernières années, que ce soit en nombre ou en qualité, nous avons vu apparaître de manière croissante des modèles pédagogiques imprimés en 3D et ce dans de nombreuses disciplines (2).

Ce travail est essentiellement consacré à une revue de la littérature concernant les modèles pédagogiques imprimés en 3D actuels existant dans les études de chirurgie-dentaire, ainsi que de déceler leurs intérêts mais aussi leurs inconvénients. En préambule, une explication du principe générale de l'impression 3D est détaillée.

1. Les modèles pédagogiques

Un modèle est un objet possédant des qualités ou caractéristiques propres permettant de servir de type, de référence dans une certaine catégorie². La pédagogie correspond à l'ensemble des méthodes éducatives permettant d'instruire, d'apprendre des connaissances à une personne³.

Donc quand nous parlons de modèles pédagogiques, nous évoquons l'ensemble des objets utilisés à des fins éducatifs, de formation⁴. Ces modèles vont être utilisés lors des formations médicales, que ce soit dans le cadre des études de médecine ou bien de chirurgie-dentaire, lors des travaux pratiques (TP). Ces TP vont permettre aux étudiants de s'initier à la réalisation de gestes techniques opératoires, avant de les réaliser par la suite chez les patients (3,4).

Dans le cadre de la chirurgie-dentaire, ces modèles ont pour but de reproduire de manière synthétique l'anatomie buccale dans sa globalité (dents, parodonte, muqueuses, os des maxillaires, articulation temporo-mandibulaire (ATM)). Ces modèles peuvent aussi reproduire en complément l'anatomie parodontale, l'anatomie dentaire unitaire, l'anatomie dentaire multiple (groupe de dents, hémi-arcade, arcade(s)) ou bien encore l'occlusion d'un groupe ou de la totalité des dents⁵ (Fig. 2) (5,6).

² Larousse É. Définitions : modèle - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [consulté 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mod%C3%A8le/51916>

³ PÉDAGOGIE : Définition de PÉDAGOGIE [Internet]. [consulté 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.cnrtl.fr/definition/p%C3%A9dagogie>

⁴ Drecq juliette. Outils pédagogiques pour faciliter l'apprentissage - Interstis [Internet]. 2023 [consulté 3 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.interstis.fr/blog/outils-pedagogiques-faciliter-apprentissage>

⁵ Typodont | Dental-Dictionary.com [Internet]. [consulté 3 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.dental-dictionary.eu/en/english-dictionary/84637/typodont>



Figure 2 : Photographie d'un modèle pédagogique bi-maxillaire développé par la société Frasaco GmbH (Tettnang, Allemagne).

1.1 Les modèles pédagogiques dentaires actuels

A ce jour, il existe plusieurs modèles pédagogiques utilisés dans les universités, dans le cadre de la formation pratique pré-clinique. Il existe notamment les dents naturelles humaines extraites qui sont utilisées en particulier pour la formation endodontique (7). On retrouve aussi les modèles coulés en plâtre, issus de moules standards usinés (type moule en silicone KaVo⁶) ou bien d'empreintes de patients réels (8,9). Ensuite on va retrouver les modèles développés par des entreprises de l'industrie dentaire : ces modèles vont présenter des dents artificielles en résine, des mâchoires et gencives synthétiques qui peuvent se monter sur des têtes dites « fantômes », afin de simuler la situation clinique avec un patient (à l'instar des modèles développés par la société Frasco entre autres).

1.2 Problèmes rencontrés avec les modèles actuels

Ces modèles actuels vont néanmoins présenter divers inconvénients. Pour les dents naturelles extraites, se pose la question de la disponibilité de ces dents. En effet, il est parfois compliqué de parvenir à trouver des dents extraites utilisables en travaux pratiques (TP) avec un état de délabrement minimal, la grande majorité des dents étant extraites pour raisons carieuses (10). Les exceptions sont celles extraites pour extractions parodontales ou orthodontiques. De plus, pour ces dents se pose aussi la question du risque d'infection croisée si celles-ci ne sont pas suffisamment aseptisées, ainsi que le soucis d'équité, chaque dent étant unique (10–12).

Pour les modèles en plâtre, les inconvénients sont aussi multiples, tels que les coulées chronophages des modèles, le stockage complexe et la fragilité du plâtre rendant les modèles cassants (13,14).

Concernant les modèles dentaires avec des dents artificielles, ces dents ne reproduisent pas réellement les situations cliniques que nous pouvons rencontrer en bouche chez les patients. Il en existe des plus réalistes, par exemple avec des simulations de lésions carieuses (développées par Frasco, Tettang, Allemagne) ou de l'anatomie pulpaire, mais ils représentent un coût financier important à l'achat (15).

⁶ Moules en silicone KaVo pour modèles de dent | KaVo Dental [Internet]. [consulté 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.kavo.com/fr-fr/produits/formation-dentaire/modeles-detudes-et-dents/moules-en-silicone>

1.3 Les modèles imprimés en 3D en médecine

Depuis quelques années maintenant, les modèles imprimés en 3D sont de plus en plus utilisés, à commencer dans la médecine éducationnelle, en sa globalité. Cette nouvelle technique d'impression va être utilisée pour la création de divers modèles anatomiques, allant de structures osseuses à des structures anatomiques telles que les organes (16). Mais dans ce domaine, ce type d'impression va aussi être utilisée pour d'autres motifs. En effet, comme principales utilisations, nous pouvons évoquer la création de moules de prothèses, de guides chirurgicaux ou encore de prothèses implantaires (Fig. 3) (17).



Figure 3 : Photographie montrant un exemple de modèle pédagogique d'aorte simulant un anévrisme (16).

1.4 Le début des modèles imprimés en 3D en chirurgie-dentaire

Après avoir fait son apparition dans le domaine de la médecine dans sa globalité, les modèles imprimés en 3D arrivent petit à petit dans la dentisterie. En effet, avec l'essor des empreintes optiques, les laboratoires de prothèses impriment de plus en plus les modèles destinés à leurs travaux. Ces modèles vont concerner les travaux de prothèses, implantaires ou encore dans le cadre de traitements orthodontiques (18,19).

Les modèles pédagogiques dentaires actuels présentant des inconvénients, comme nous l'avons vu précédemment, les instituts formateurs cherchent de nouveaux outils afin d'améliorer la formation des étudiants. C'est ainsi que ces modèles imprimés en 3D

commencent aussi à être utilisés à des fins pédagogiques, ils vont principalement être utilisés en formation pré-clinique chez les étudiants lors de leur cursus universitaire. Mais ils peuvent aussi être utilisés au cours de la carrière du CD lors des formations continues, afin de développer des compétences techniques dans divers domaines, avant de réaliser les actes au cours de soins chez les patients (20).

1.5 Avantages et inconvénients de ces modèles imprimés en 3D en chirurgie-dentaire

Ces modèles imprimés en 3D semblent pouvoir représenter l'avenir et présentent plusieurs avantages. Tout d'abord, on peut noter la possibilité de créer une diversité quasi infinie de modèles dentaires en partant de scans intra-oraux de patients. Ces modèles vont pouvoir être utilisés dans la majorité des disciplines dentaires et permettre de fabriquer des modèles dentaires complexes avec des spécifications techniques externes très précises (18,21). Ils vont aussi permettre d'imprimer en série à partir d'un modèle sans être chronophage, et de ne pas perdre de matériaux, contrairement à la fabrication soustractive ou manuelle (22). Ils permettent aussi de fabriquer des dents unitaires et d'éviter le risque de contaminations croisées (23).

Cependant, on peut aussi noter des inconvénients pour ces modèles. Malgré l'amélioration constante des imprimantes, la technique d'impression peut encore comporter un manque de précision. De plus, des erreurs d'impression, à n'importe quelle étape du processus d'impression, sont toujours possibles. La qualité de l'impression est aussi très dépendante de la qualité de l'imprimante et de la pertinence de la technique d'impression choisie (24,25).

2. L'impression 3D : une nouvelle méthode d'impression au service de la chirurgie-dentaire

2.1. Principes Généraux : de la 2 dimension (2D) à la 3 dimension (3D)

Une image en 2D se définit par 2 dimensions dans une surface plane : la largeur (x) et la hauteur (y). Lorsque l'on passe à une image 3D, on ajoute une 3^{ème} dimension : la profondeur (z). Une notion de volume se dégage donc dans la notion de 3D vs 2D⁷.

Le numérique, via des logiciels informatiques, va permettre de concevoir ou modéliser des volumes en 3D en vue ensuite de leur fabrication : il s'agit de la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et de la Fabrication Assistée par Ordinateur ((FAO) correspondant à la CAD/CAM en anglais). La CAO va permettre de concevoir le modèle virtuel en 3D et la FAO va permettre de fabriquer ce modèle, à l'aide d'une unité d'usinage spécifique (26). La CFAO se découpe schématiquement en 3 grandes étapes que sont l'acquisition de données, le traitement de ces données et pour finir la fabrication.

Il faut donc commencer par acquérir les données du centre d'intérêt grâce à un système de scan : ces données peuvent être issues d'un cone-beam (CBCT), de Computed Tomography scan (CT) ou de micro-Computed Tomography (μ CT scan), ou de scanner intra-oraux (empreintes optiques). Ces systèmes, qui peuvent aussi se combiner, vont permettre de numériser un centre d'intérêt pour passer d'un système analogique à un système numérique (27–29). Une fois ces données d'imagerie acquises, il est obligatoire de traiter ces données. A l'aide de fichiers de CAO, un fichier .stl (stéréolithographie) est créé (Fig. 4). Il est possible de combiner plusieurs modèles .stl afin de personnaliser, de modifier le modèle que l'on souhaite créer (16). Une fois le fichier .stl validé, il pourra être envoyé vers son imprimante 3D pour le processus d'impression en 3D.

⁷ Cours : Modélisation et impression 3D | Campus RÉCIT [Internet]. [consulté 13 juin 2024]. Disponible sur: <https://campus.recit.qc.ca/course/view.php?id=311#section-0>

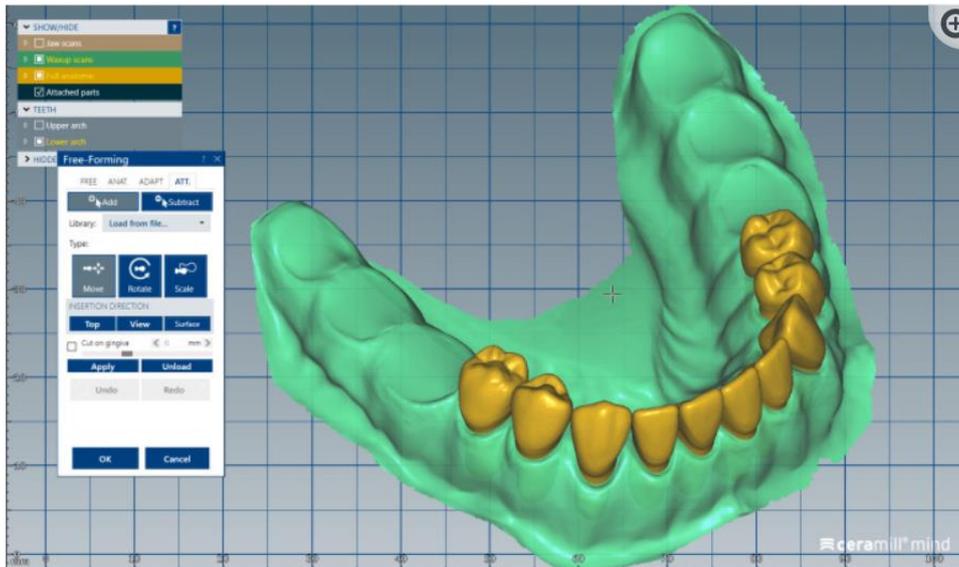


Figure 4 : Image représentant un exemple de fichier .stl d'une arcade mandibulaire (obtenue sur le logiciel Ceramill Mind (Amann Girrbach AG, Koblach, Autriche)) (28).

2.2. L'impression 3D

L'impression 3D est apparu dans les années 80 avec un principe de base simple qui est la fabrication couches par couches par ajout de matériaux (résines, céramiques, métaux...). Elle se différencie totalement de l'usinage classique dit soustractif. L'avantage principal de l'impression 3D, par rapport aux techniques classiques, est de pouvoir fabriquer des structures plus complexes et de manière plus rapide tout en économisant du matériau (30).



Figure 5 : Photographie d'une d'imprimante 3D Form2 (FormLabs Inc., Somerville, États-Unis).

2.3. Les différents procédés d'impression en 3D

Il existe de nombreuses techniques d'impression 3D à ce jour (31). Nous allons décrire rapidement le principe général des techniques d'impression les plus utilisées en chirurgie-dentaire (22).

2.3.1 Stéréolithographie (SLA) et Digital Light Processing (DLP)

La **Stéréolithographie (SLA)** est la technique d'impression en 3D la plus couramment utilisée. Son principe général repose sur l'utilisation de matériau photosensible photopolymérisé par un rayonnement UV laser. Une plateforme est immergée dans un réservoir de matériau monomère liquide (type résine). Un laser va balayer, couches par couches, le matériau et le polymériser. En fonction du positionnement du laser (en haut ou en bas), la plateforme va petit à petit monter ou descendre pour avoir la formation de couches successives (Fig. 6) (32).

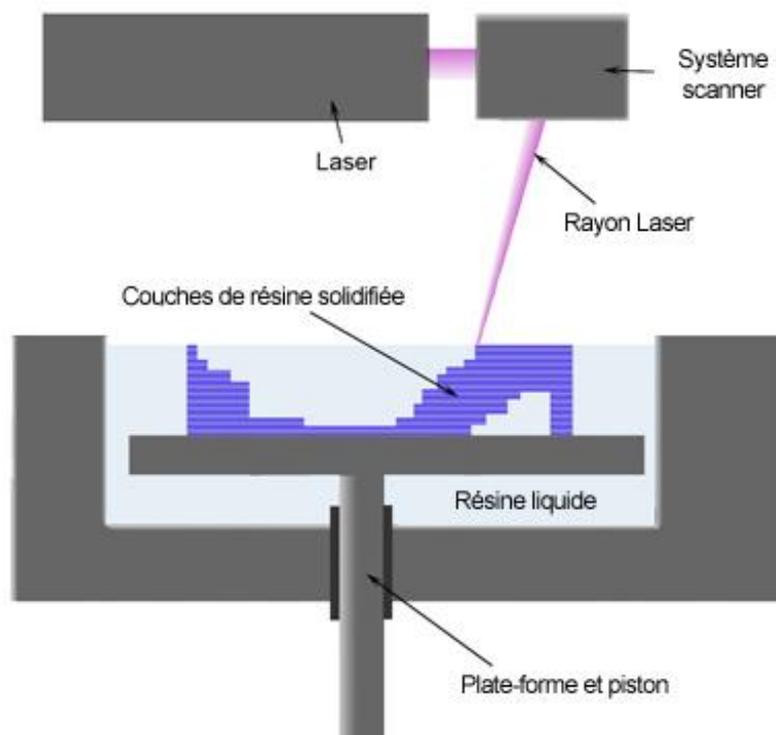


Figure 6 : Schéma simplifié représentant le principe de la SLA (19).

Le **Digital Light Processing (DLP)**, qui signifie traitement numérique de la lumière en français, repose sur le même principe général que la SLA avec une plateforme immergée dans

une solution de monomère liquide. La différence réside sur le fait que dans cette technique, il n'y a pas un seul laser qui vient balayer la zone par des mouvements successifs, mais de nombreux micro-miroirs, qui viennent refléter la lumière sur le monomère pour une polymérisation complète couche par couche (Fig. 7). L'avantage principale est d'avoir une photopolymérisation couche par couche en un seul balayage, au contraire de la SLA (22).

Que ce soit pour la SLA ou la DLP, des couches successives de 25 à 100 μm sont formées. Les monomères les plus souvent employés sont les résines types méthacrylates, époxy et vinyl éther (22).

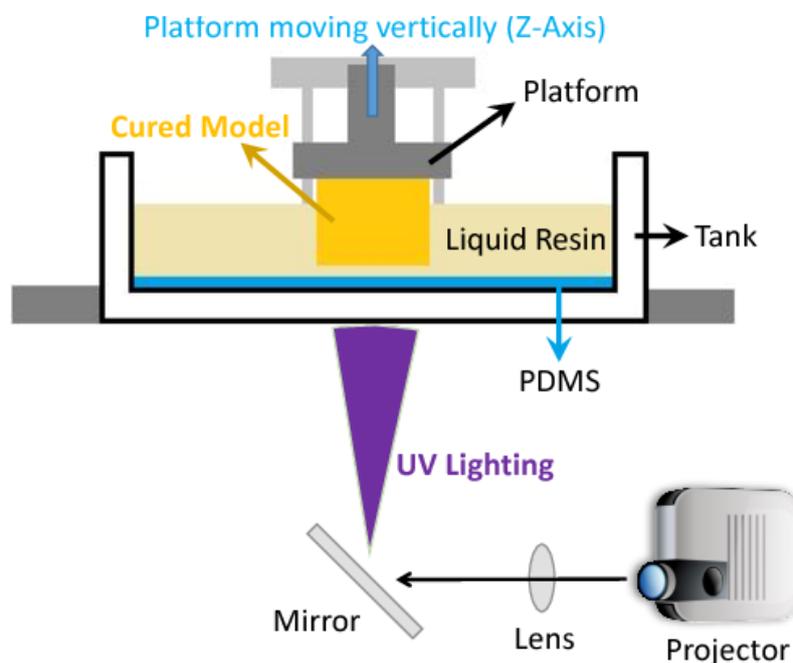


Figure 7 : Schéma simplifié représentant le principe de la DLP⁸.

Ces deux techniques vont présenter plusieurs avantages comme la possibilité d'utiliser de très nombreuses résines photopolymérisables. La résolution d'impression étant relativement haute, il est possible d'imprimer des structures complexes et la qualité globale de l'objet est vraiment satisfaisante (33,34).

Malgré tout, il existe des inconvénients liés aux modes de fonctionnement de ces imprimantes : l'objet imprimé ne peut être qu'en un seul matériau et se limite aux résines photopolymérisables. Il est aussi possible de deviner les différentes couches liées à

⁸ Digital Light Processing (DLP) [Internet]. [consulté le 13 juin 2024]. Disponible sur: https://www.amf.uzh.ch/en/additive-manufacturing/our_technologies/dlp.html

l'impression. Il est aussi nécessaire de réaliser un traitement post-impression pour éliminer les monomères de surface non photopolymérisés (33,34).

2.3.2 Fused Deposition Modeling (FDM) / Fused Filament Fabrication (FFF)

La technique du **Fused Deposition Modeling (FDM)** est équivalente à la **Fused Filament Fabrication (FFF)** qui signifie dépôt de fils en français.

Son principe général consiste à venir appliquer couche par couche un filament polymérique thermoplastique (fondu) : une première couche se forme, la plateforme descend et ainsi de suite vont se former les différentes couches jusqu'à former l'objet demandé⁹ (Fig. 8). Pour cette technique, des couches successives de 200 µm sont formées et tous les matériaux thermoplastiques peuvent être utilisés.

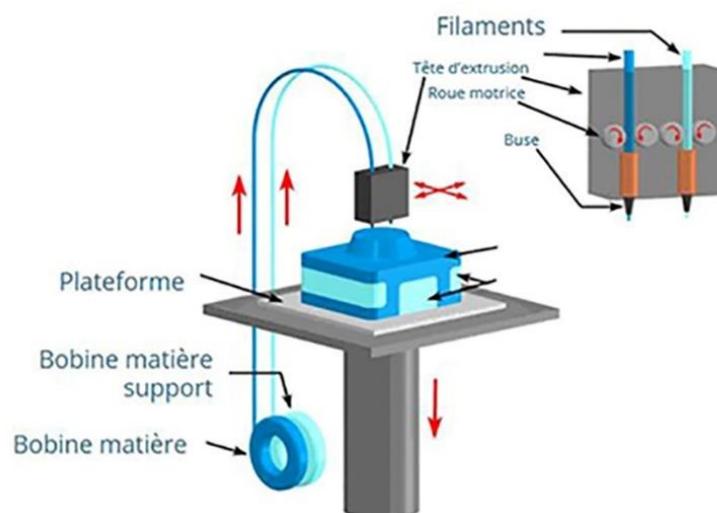


Figure 8 : Schéma simplifié représentant le principe de la FFF⁹.

Cette technique va présenter divers avantages comme la possibilité d'utiliser tous les matériaux thermoplastiques. On a aussi la possibilité d'imprimer des objets avec plusieurs matériaux différents. De plus, il existe de nombreuses imprimantes existantes utilisant cette

⁹ Fused Filament Fabrication (FFF) : impression 3D industrielle avec OMNI | Polyvia [Internet]. [consulté 13 juin 2024]. Fused Filament Fabrication (FFF) : impression 3D industrielle avec OMNI | Polyvia. Disponible sur: <https://www.polyvia.fr/fr/fabrication-additive/fused-filament-fabrication-fff-impression-3d-industrielle-avec-omni>

technique. Il y a donc la possibilité de pouvoir acheter des imprimantes d'entrée de gamme avec un coût financier abordable, de l'ordre d'une centaine d'euros (33,34).

Malgré tout, cette technique est peu utilisée en chirurgie-dentaire puisqu'elle utilise une faible résolution (peu précise) et a une qualité globale d'impression moyenne. L'impression étant couche par couche, il est possible de distinguer aisément les couches. Elle est aussi limitée aux matériaux thermoplastiques (22,33).

2.3.3 PolyJet (PJ)

La technique du **PolyJet (PJ)** (équivalente au MultiJet MJ) repose sur le même principe de base qu'une imprimante à jet d'encre : la tête d'impression va projeter les différents photomonomères qui seront ensuite polymérisés par projection UV (ou par thermopolymérisation). La plateforme va ensuite descendre pour avoir une formation couche par couche (Fig. 9) (22). Pour cette technique, des couches successives pouvant aller jusqu'à 16 μm sont formées avec des résines photopolymérisables (12).

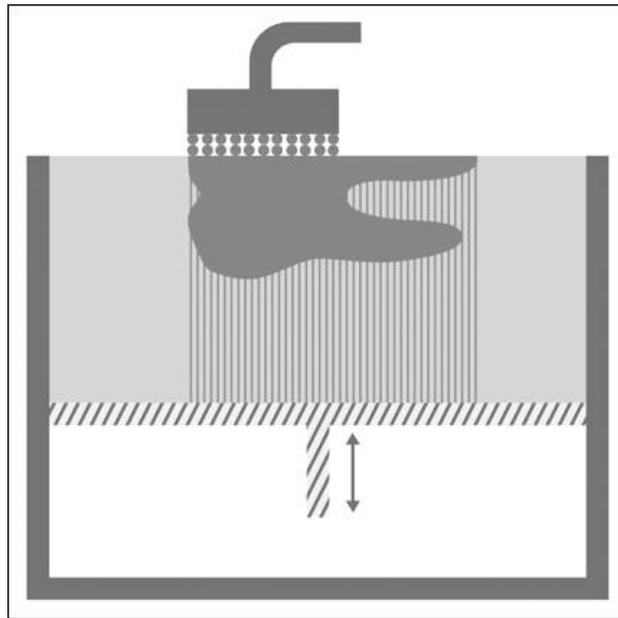


Figure 9 : Schéma simplifié représentant le principe du PJ (22).

L'avantage principal de cette technique est de pouvoir projeter, donc fabriquer un objet avec plusieurs matériaux (avec des propriétés physico-chimiques et couleurs différentes) en même temps et ce de manière rapide. De plus, la résolution haute permet d'avoir une qualité d'impression satisfaisante. Ces avantages permettent l'impression de structures relativement complexes (34).

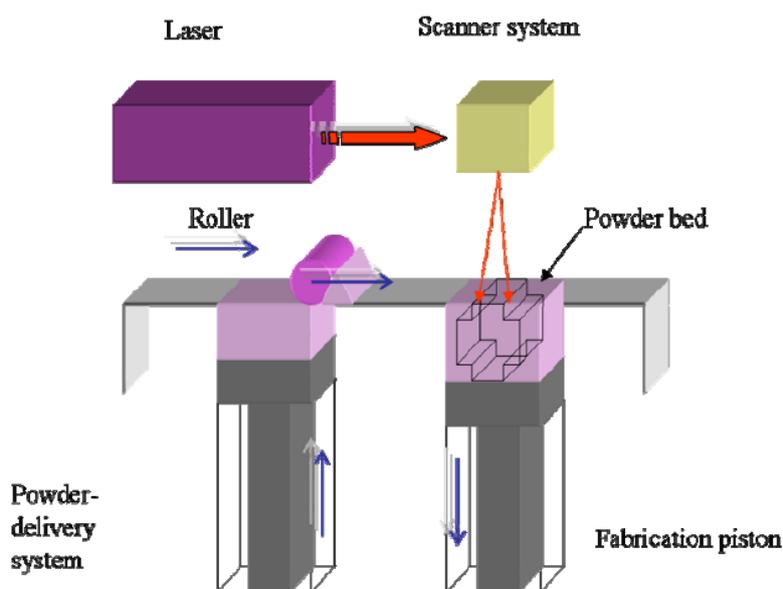
Il existe cependant des inconvénients, en particulier un temps de traitement post-impression très long. En effet, il est nécessaire de « laver » l'objet avec des agents de lavage agissant en plusieurs heures. De plus, ces imprimantes représentent un coût très important à l'achat, de plusieurs dizaines à centaines milliers d'euros (34).

2.3.4 Selective Laser Sintering (SLS) & Selective Laser Melting (SLM)

La technique du **Selective Laser Sintering (SLS)**, soit en français le frittage sélectif par laser, correspond à un frittage sur lit de poudre. Un rayon laser vient fritter des poudres (c'est-à-dire les chauffer sans atteindre le point de fusion) pour les faire agglomérer couche par couche et ainsi créer petit à petit un objet (Fig. 10).

La technique du **Selective Laser Melting (SLM)**, soit en français fusion sélective par laser, repose sur le même principe que le SLS sauf qu'ici le matériel entre en fusion et est donc fondue¹⁰.

Tous les matériaux qui peuvent être frittés ou fondus peuvent être utilisés, ce qui correspond principalement aux matériaux métalliques. Mais les matières céramiques et plastiques (comme les polyamides, le polyéther éther cétone PEEK) peuvent aussi être utilisées et former des couches d'environ 60 à 100µm (22).



Selective laser sintering

Figure 10 : Schéma simplifié représentant le principe du SLS (Schéma du Dr Kellomäki de l'Université de Tampere en Finlande).

¹⁰ Dassault Systèmes [Internet]. 2021 [consulté 13 juin 2024]. Fusion sur lit de poudre DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM. Disponible sur: <https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/powder-bed-fusion>

L'avantage de cette technique est d'avoir une impression rapide avec une grande diversité de matériaux, sans structure de support. La résolution moyenne permet d'imprimer des objets avec une qualité de finition et une résistance satisfaisante (35,36).

Il existe aussi des inconvénients, en particulier le fait que les objets imprimés peuvent présenter une surface poreuse, rugueuse. De plus, seuls les matériaux supportant bien le fait d'être soumis à des hautes températures peuvent être utilisés (35,36).

2.3.5 Binder Jetting (BJ)

La technique du **Binder Jetting (BJ)**, signifiant projection de liant en français, utilise aussi comme la SLS ou la SLM de la poudre mais ici une différence est notable. Une couche de poudre est formée, la buse de la tête d'impression va projeter une solution liquide, qui correspond à la solution liante, pour permettre la solidification couche par couche de la poudre (Fig. 11) (37).

Cette technique permet d'imprimer des couches de 20 à 100µm avec des matériaux divers comme les alliages métalliques ainsi que les céramiques (38).

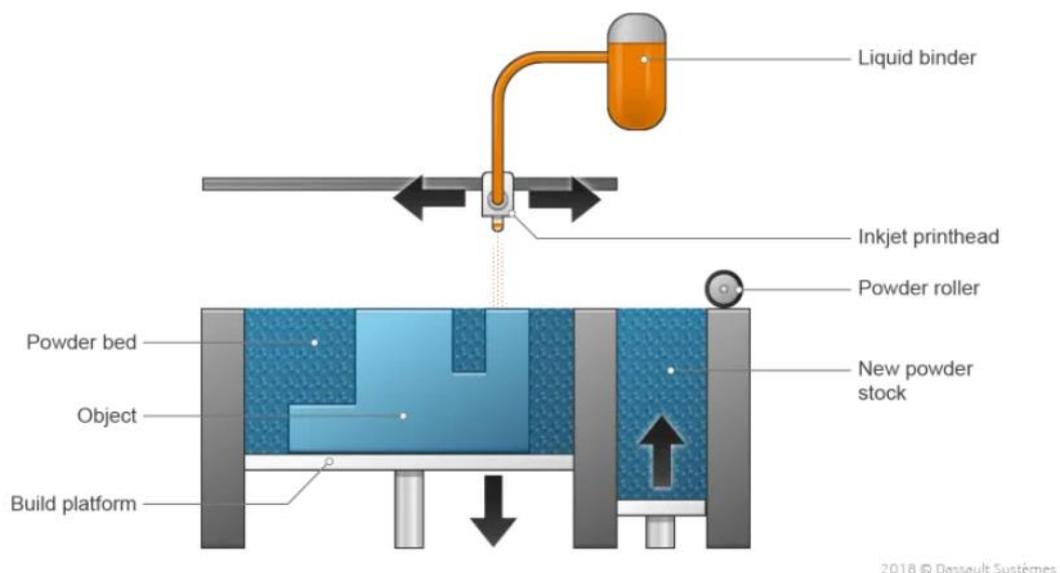


Figure 11 : Schéma simplifié représentant le principe du BJ¹¹.

¹¹Dassault Systèmes [Internet]. 2021 [consulté le 14 juin 2024]. Projection de liant - BJ. Disponible sur: <https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/binder-jetting>

L'avantage principale de cette technique est de pouvoir imprimer en couleur et ce avec une grande diversité de matériaux. Un autre avantage du BJ, liée à son impression dans la poudre, est de ne pas présenter de structure de support (38,39).

On retrouve aussi plusieurs inconvénients pour cette technique, en particulier à cause des nombreuses étapes chronophages de post-traitement telles que le durcissement, le dépoudrage, l'infiltration, les finitions... Ces étapes auront pour conséquences d'augmenter le coût global du processus d'impression. De plus, il existe une réelle difficulté d'obtenir des pièces avec une densité importante (38,39).

3. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D en chirurgie-dentaire

Comme nous avons pu le voir un peu plus haut, les modèles pédagogiques imprimés en 3D arrivent petit à petit en chirurgie-dentaire. Ils ont pour objectif d'améliorer la formation pré-clinique universitaire des futurs praticiens, mais aussi la formation continue du chirurgien-dentiste.

En effet, pour les étudiants en formation, il n'est pas toujours simple de faire la transition entre ce qu'ils ont pu apprendre pendant leurs années universitaires avec la réelle activité clinique. C'est pour cette raison que de plus en plus de modèles personnalisés sont développés, avec un objectif simple, qui est d'essayer de se rapprocher le plus possible de situations cliniques que nous allons rencontrer avec nos patients, et ainsi d'avoir une future prise en charge qualitative et efficiente (40).

C'est pour cette raison que l'impression de modèles pédagogiques en 3D rencontre un essor important. Elle permet une personnalisation et une réalisation quasi infinie de modèles simulant différentes situations cliniques des différentes spécialités dentaires.

Les modèles pédagogiques imprimés en 3D sont utilisés dans de nombreux domaines en chirurgie-dentaire (15,18,41-43) :

- Endodontie ;
- Dentisterie prothétique :
 - fixée ;
 - amovible ;
- Dentisterie restauratrice ;
- Implantologie ;
- Pédodontie ;
- Traumatologie ;
- Anatomie externe des dents.

3.1. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D à visée endodontique

Les traitements endodontiques sont souvent redoutés car perçus comme un des traitements les plus complexes de la chirurgie-dentaire par les futurs praticiens, et encore même par certains praticiens pourtant expérimentés.

Ces différents modèles vont principalement être utilisés dans l'apprentissage et la réalisation des différentes étapes du traitement endodontique complet, afin de réduire le stress du praticien lors de futurs traitements chez les patients (44).

Ces étapes sont, pour commencer la mise en place du champ opératoire (digue), la réalisation de la cavité d'accès, puis le cathétérisme canalaire manuel ayant pour but de déterminer la longueur de travail (radiographique et/ou avec localisateur électronique d'apex EAL). Une fois ces étapes réalisées, nous pouvons passer aux étapes de mise en forme canalaire, d'irrigation et pour finir d'obturation canalaire (10, 45–48).

La réalisation de ces différentes étapes sur des modèles pédagogiques va permettre au praticien de se familiariser avec les différents matériels et matériaux, d'acquérir des automatismes, et d'améliorer ses compétences en manière de traitement endodontique. Ces modèles vont aussi permettre de simuler l'anatomie pulpaire de différentes dents et avec des anatomies diverses : canaux droits, courbés, en S, minéralisés... (49). Le but étant donc d'acquérir de nouvelles compétences afin de mieux appréhender et gérer de futurs cas de traitements endodontiques plus complexes.

3.1.1 Les modèles unitaires en résine transparente

Les premiers modèles développés ont été des blocs en résine époxy transparente dans lesquels sont simulés un canal pulpaire. Parmi ce type de modèles, nous pouvons citer par exemple les Endo-Block développés par Dentsply-Maillefer (Ballaignes, Suisse) (Fig. 12) (50–53).

Ces modèles présentent l'avantage d'essayer de simuler un canal pulpaire et donc de s'initier à la réalisation de traitement endodontique sans nécessité d'être en possession de dents naturelles extraites. Mais ces blocs possèdent des canaux trop simplifiés et ne

représentent pas la complexité du système canalaire d'une dent naturelle. De plus, le côté transparent s'éloigne fortement de l'opacité radiculaire réelle (50).

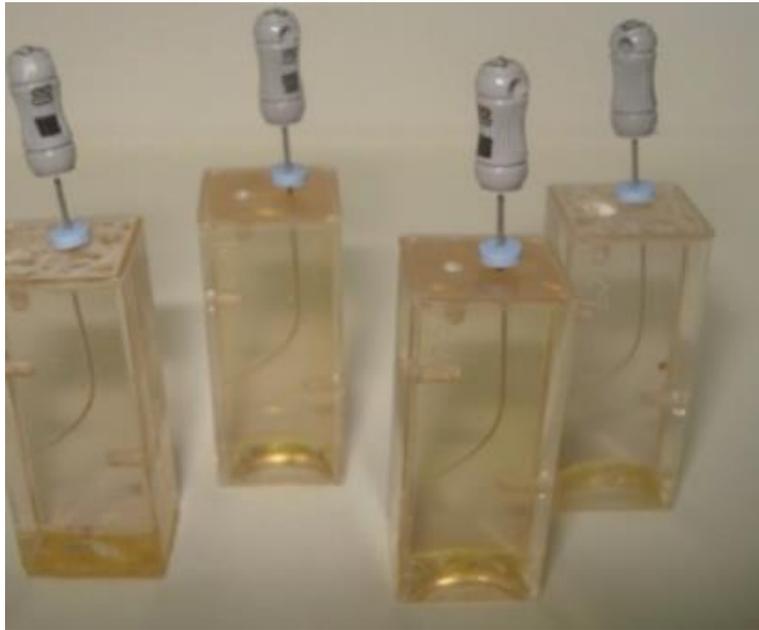


Figure 12 : Photographie de plusieurs Endo-Block (50).

Par la suite, pour combler les inconvénients des blocs, d'autres modèles dentaires unitaires en résine transparente ont été créés. Leur différence principale était ici de représenter la morphologie globale d'une dent, afin de se rapprocher un peu plus d'un système pulpaire d'une dent naturelle. Parmi ces modèles, nous pouvons citer par exemple les dents Real-T Endo développées par Acadental (Overland Park, États-Unis) (Fig. 13). Ces dents présentent une couronne clinique faite de résine opaque avec une anatomie radiculaire en résine transparente. On retrouvera des modèles de dents mono- ou bien pluriradiculées (47, 53, 54).

Ces modèles vont ainsi présenter plusieurs avantages. Tout d'abord, ce genre de modèle va ici se rapprocher beaucoup plus de l'anatomie externe d'une dent naturelle. De même, le système pulpaire de ces modèles sera donc beaucoup plus réaliste. Ces modèles ont été développées avec des résines radio-opaques se rapprochant des dents naturelles, ce qui est intéressant lors de la réalisation de clichés radiographiques pré-traitement, limes et cônes en place. Nous pouvons aussi cité un autre avantage de ces modèles qui est la standardisation : lors d'évaluations, chaque étudiant aura la même dent, ce qui n'est évidemment pas le cas avec les dents naturelles (53,54).

Malgré tout, on va aussi retrouver certains inconvénients. Comme évoqué ci-dessus, l'anatomie radulaire est réalisée en résine transparente, ce qui ne reflète pas la réalité clinique avec des dents naturelles. De plus, même si plus réaliste que les blocs, le système canalaire de ces modèles reste trop simpliste par rapport à la variété et la complexité de ceux des dents naturelles. Dans le même sens, la dureté de la résine ne représente pas encore les sensations que l'on peut retrouver avec les substances amélaire et dentinaires de la dent, ce qui peut altérer les sensations ressentis lors du traitement (53,54).



Figure 13 : Exemple de dent Real-T Endo (ici une 11) développée par Acadental (47).

3.1.2 Les modèles unitaires en résine opaque

Afin de se rapprocher encore plus de dents naturelles, d'autres modèles unitaires vont être développés, ici intégralement en résine opaque.

3.1.2.1 Les modèles développés pour la réalisation de cavités d'accès

On peut d'abord retrouver des modèles qui ont été développés pour l'entraînement à la réalisation de cavité d'accès. Meglioli *et al.* ont ainsi développé deux modèles dentaires (une 11 et une 36) avec ce but (46). Ces dents ont été imprimées en technique SLA à l'aide d'une imprimante Form2 (FormLabs) avec une résine Model V2 (FormLabs) (Fig. 14). Ces modèles ont été évalués par des étudiants de 5^{ème} année de l'Université de Parme. Les étudiants reconnaissent une bonne reproduction de l'anatomie coronaire externe et de la pulpe camérale mais notent un manque de réalisme au niveau des sensations tactiles ressenties.

Kustra *et al.* ont aussi développé le même type de modèles d'entraînement à la réalisation de cavités d'accès, imprimés en technique SLA à l'aide d'une imprimante Form2 (FormLabs®) avec une résine Dental Model (FormLabs), à partir de scan d'incisives centrales mandibulaires, de deuxièmes prémolaires maxillaires et de premières molaires maxillaires naturelles (45). Ces modèles ont été évalués par des étudiants de 4^{ème} année sans expérience à la réalisation de traitements endodontiques. Pour ce modèle de nombreuses erreurs opératoires ont été constatées car les étudiants n'avaient aucune expérience préalable, et il est donc difficile de tirer des conclusions sur le réalisme de la morphologie pulpaire et des sensations tactiles ressenties (45,46).



Figure 14 : Photographie présentant une réplique d'incisive centrale 11 imprimée en technique SLA suite aux travaux de Meglioli *et al.* (46).

3.1.2.2 Les modèles développés pour la réalisation de traitements endodontiques complets

On va aussi retrouver des modèles imprimés en 3D avec pour but la réalisation de traitements endodontiques complets telles que les Dentalike développés par Dentsply (York, États-Unis). Par exemple, Reymus *et al.* ont développé des modèles issus de dents naturelles (15). Une sélection de dents a été réalisée, puis, après une préparation canalaire manuelle, une mise en place de coton dans la chambre pulpaire et une obturation coronaire avec un matériau radio-opaque, ces dents ont été scannées à l'aide d'un CBCT. Des fichiers .stl ont ainsi

été créés puis les modèles imprimés en technique SLA grâce à une imprimante Form2 avec une résine Grey V3 FLGPGR03 (FormLabs) (15).

Ces modèles vont rassembler les avantages des modèles unitaires en résine transparentes vus ci-dessus, que ce soit au niveau de leur système pulpaire relativement réaliste, de leur radio-opacité ou encore par rapport à la standardisation. Mais leur principal avantage se retrouve au niveau de leur anatomie externe, avec une opacité radiculaire simulant la réalité clinique. Mais un inconvénient majeur est toujours présent, celui des propriétés de la résine (dureté, résistance à la traction) qui ne reproduisent pas encore les propriétés mécanique et physiques de la dentine. De plus, ce modèle ne simule pas encore suffisamment la complexité pulpaire, tels que les canaux minéralisés, les canaux latéraux ou bien encore les isthmes (15).

C'est donc pour essayer de remédier à ces inconvénients que de nouveaux modèles continuent d'être développés. Robberecht *et al.* ont essayé de développer un modèle imprimé en 3D simulateur de canal radiculaire (RCS) anatomique possédant des propriétés physiques, telle que la dureté, se rapprochant de la dentine en utilisant de la céramique (23). En effet, la dentine est composée à 70% d'une phase minérale, principalement d'hydroxyapatite, à 20% d'une phase organique, principalement le collagène, et à 10% d'eau (55).

Cette équipe est donc partie de μ CT de dents naturelles extraites, afin d'imprimer en 3D (en technique SLA) des moules en résine acrylique des systèmes canaux. Dans ce moule, a été coulé, en barbotine, un mélange composé à 75% de poudre d'hydroxyapatite. Ensuite, après certaines étapes de post-traitement, les RCS ont été dissociés de leur moule. On pouvait ainsi retrouver deux types de RCS, un dense et un plus poreux dans lequel avait été ajouté de l'amidon de riz. Ces modèles ont ensuite été utilisés pour réaliser les étapes d'un traitement endodontique, de la préparation à l'aide du système ProTaper (Dentsply) à l'obturation avec de la gutta-percha thermocompactée (Fig. 15) (23). Afin d'évaluer la pertinence de ces modèles, plusieurs tests ont été réalisés : tout d'abord, les tests de porosité ont montré que le modèle dit poreux se rapproche beaucoup plus de la dentine que pour la résine acrylique. Ensuite, les tests de microdureté ont montré que la dureté du simulateur poreux est similaire à la dentine (bien plus qu'un simulateur en résine acrylique) mais beaucoup plus faible que l'émail. Pour le simulateur dense, la dureté est supérieure aux deux tissus dentaires. Enfin, une analyse visuelle comparant les μ CT des systèmes canaux versus les radiographies des simulateurs, a permis de mettre en évidence une grande similarité entre les deux (23).

Malgré des avancées indéniables, en particulier au niveau de la microdureté, les deux RCS ne fournissent pas encore les sensations tactiles que l'on peut retrouver sur les dents naturelles. En effet, la dentine possédant une phase organique représentant 20% de sa composition, cette phase exerce inévitablement une influence sur ces sensations. La simple utilisation de céramique ne suffit donc pas. Enfin, ces RCS ne possèdent pas l'anatomie externe de dents naturelles, en particulier au niveau coronaire.



Figure 15 : Photographie présentant le simulateur canalaire en céramique développé par Robberecht et al. après préparation et obturation à l'aide de gutta-percha (23).

Ainsi, Robberecht *et al.* ont poursuivi leurs travaux pour continuer d'améliorer leurs simulateurs (10). En se basant sur les RCS développés avec une phase minérale, leurs travaux ont cette fois-ci porter sur le fait d'intégrer une phase organique afin d'avoir un RCS en céramique dite hybride. Ils ont donc infiltré le RCS en céramique poreux avec une résine époxy CaldoFix (Struers, Ballerup, Danemark) avant plusieurs étapes de post-traitement permettant d'avoir une infiltration satisfaisante. La qualité de ces infiltrations a été réalisée via une analyse de coupes, précédemment colorées au bleu de méthylène, étudiées avec le logiciel Perfect Image (Clara Vision, Verrières le Buisson, France). Ces tests ont permis de montrer un degré d'infiltration de la céramique très satisfaisant (10). Des tests ont ensuite été réalisés chez des étudiants de 4^{ème} année afin de comparer leurs ressentis lors de la réalisation d'un traitement endodontique sur ce nouveau RCS en céramique hybride ou sur le précédent RCS en céramique simple ou sur un bloc en plastique type Endo-Block. Ils ont donc rempli un questionnaire après avoir réalisé un traitement canalaire complet avec ouverture de chambre,

préparation canalaire via le système ProTaper puis une obturation avec de la gutta-percha associée au ciment Topseal (Dentsply) avec diverses radiographies pré-, per- et post-opératoires. Le but était aussi de comparer ces modèles par rapport à des dents naturelles extraites, préparées quelques semaines plus tôt. Les résultats des questionnaires ont permis de mettre en évidence que les étudiants avaient de bien meilleures perceptions haptiques lors de la réalisation de ces traitements sur les RCS en céramique (simple et hybride) par rapport aux blocs plastiques. Lors de l'utilisation du système ProTaper, les étudiants ont perçu une meilleure résistance et sensation tactile avec le RCS en céramique hybride par rapport à celui en céramique simple ce qui confirme une amélioration des propriétés mécaniques sur ces nouveaux RCS. Toutefois, on note une perception globale de simplicité de l'anatomie radiculaire. Il serait donc intéressant de continuer ces tests sur des RCS en céramique hybride avec une anatomie canalaire plus complexe, et donc plus réaliste. Il semble donc nécessaire de continuer à développer ces modèles et une étude à plus grande échelle devrait être menée vu le faible échantillon lors de cette étude (30 étudiants) (10).

Dans un but d'appréhender au mieux les diverses situations cliniques qu'un clinicien peut rencontrer, Vasudevan *et al.* ont effectué des recherches afin de développer un modèle imprimé 3D simulant une calcification pulpaire (49). En effet, dans le cadre d'une recherche pour mettre au point un guide utilisable en endodontie guidée sur ce type de dents, ils ont donc développé une incisive maxillaire 21 présentant une oblitération pulpaire. Ce modèle a été développé à partir du CBCT d'une dent d'un patient puis imprimé en technique SLA avec une imprimante Form2 (Formlabs) (Fig. 16). Ce modèle peut ainsi être placé sur une arcade montée sur une tête fantôme (49). Ce modèle a l'avantage de pouvoir s'exercer à la réalisation de traitement endodontique sur des dents présentant une oblitération pulpaire, ce qui est plus complexe sur des dents naturelles extraites car il est difficile de s'en procurer. Malgré tout, ce modèle présente des limites comme le fait d'être développé avec une résine semi-opaque qui ne simule pas les propriétés physiques et mécaniques de la dentine et de l'émail.

De plus, le modèle a été créé pour apprendre à utiliser un guide endodontique. Or, ces guides étant généralement utilisés sur des dents monoradiculées, ce modèle n'a pas encore été développé avec des dents pluriradiculées.



Figure 16 : Photographie présentant le simulateur de calcification pulpaire, développé par Vasudevan et al., monté sur arcade avec mise en place de la digue (49).

3.1.3 Les modèles d'arcade complète

La majorité des modèles imprimés à visée endodontique sont des modèles unitaires. Toutefois, certaines équipes de chercheurs ont développé des modèles avec une arcade complète, compatible avec un localisateur électronique d'apex (EAL), ayant pour objectif de réaliser toutes les étapes d'un traitement endodontique complet. Ainsi, Hanafi *et al.* ont développé un modèle imprimé en 3D avec des arcades complètes, comprenant l'ensemble de la denture bimaxillaire et du parodonte (29). Un fichier .stl a été créé sur le logiciel Geomagic Freeform (3D Systems, Rock Hill, États-Unis) à partir de données CBCT d'un crâne humain et dents naturelles extraites, puis le modèle a été imprimé en technique SLA avec l'imprimante Form2 (FormLabs). Chaque sextant est amovible et personnalisable, ce qui permet de moduler les arcades avec trois types de sextants en fonction de leur utilisation. Les sextants « vides » permettent de placer des dents naturelles ou des modèles dentaires d'entraînement (imprimé en 3D ou non) (Fig. 17) ; les sextants incomplets avec des dents imprimés simultanément que l'arcade et des alvéoles vides ; des sextants totalement imprimés avec toutes les dents.

De plus, une « pâte » a été fabriquée pour créer un milieu conducteur compatible avec l'utilisation d'EAL (29). Ainsi, il était possible de réaliser le traitement endodontique complet de dents : radiographies, mise en place du champ opératoire, réalisation de la cavité d'accès, détermination de la longueur de travail avec l'EAL et des radiographies, préparation canalaire mécanique et irrigation, puis l'obturation avec des cônes de gutta-percha. Pour évaluer ces modèles, des étudiants de 3^{ème} année ont répondu à un questionnaire après s'être entraîné dessus (29). Ce modèle a l'avantage de présenter des arcades complètes réalistes compatibles à la réalisation d'un traitement canalaire complet et avec l'utilisation d'EAL. Toutefois, il présente aussi des inconvénients majeurs : les dents imprimées en 3D au sein de l'arcade ne sont pas vraiment exploitables car ne possèdent pas une anatomie canalaire utilisable. Afin de réaliser les traitements endodontiques, il est donc nécessaire de se procurer de nombreuses dents naturelles extraites, et toutes les contraintes vues précédemment, qui en découlent.

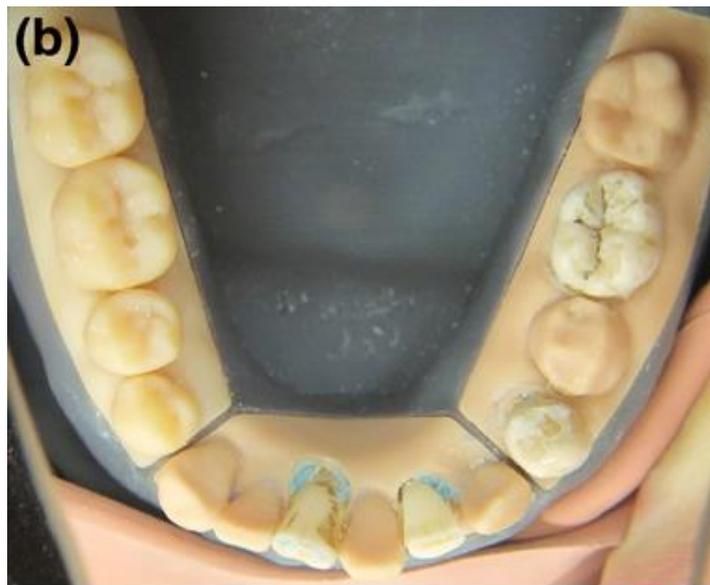


Figure 17 : Photographie présentant l'arcade mandibulaire, avec des sextants mêlant dents imprimées et dents naturelles, du modèle développé par Hanafi et al. (29).

3.2. Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en dentisterie prothétique fixée et amovible

La prothèse, fixée et amovible, occupe une part prépondérante et capitale de l'activité quotidienne du clinicien depuis de nombreuses années. Au sein de ces deux disciplines, les solutions existantes au sein du gradient thérapeutique sont multiples et nécessitent un apprentissage pré-clinique important. De plus, les situations cliniques rencontrées sont très nombreuses et uniques pour chaque patient, ce qui rend cette discipline parfois complexe à appréhender, en particulier en début de carrière. Ainsi, l'apprentissage des différentes situations cliniques, des gestes, des techniques en amont de cette future activité, est une des clés de la réussite.

3.2.1 Les modèles en dentisterie prothétique fixée

En prothèse fixée/conjointe, ces modèles vont être utilisés dans un but d'apprentissage des méthodes de préparations dentaires et d'empreintes pour la réalisation de couronnes, d'inlay-cores, de bridges, de facettes ou encore la dépose de couronne. Cela permettra d'apprendre et d'améliorer les gestes pour ces travaux avant de les réaliser chez les patients (20,27).

Ainsi, Höhne *et al.* ont dans un premier temps développé une dent imprimée en 3D intégrable dans des modèles pédagogiques standards type KaVo (56). La particularité de cette dent était de simuler des lésions carieuses ainsi que le complexe pulpaire. La finalité étant de préparer la dent pour une réalisation de couronne. Pour réaliser ce modèle, l'équipe s'est basé sur le CBCT d'une dent naturelle 36. Le fichier .stl en découlant a été modifié sur AutoDesk Inventor (AutoDesk, San Rafael, États-Unis) afin d'y intégrer une lésion carieuse mésio-occluso-disto-vestibulaire avec une proximité pulpaire en mésial. Le fichier créé a été envoyé vers le logiciel PreForm 2.15.1 (FormLabs) afin d'être imprimé en technique SLA via une imprimante Form2 (FormLabs) avec une résine blanche RS-F2-GPWH-04 (FormLabs). La pulpe a été simulée avec un polyéther (Impregum Penta DuoSoft Light Body, 3M Espe, Seefeld, Allemagne) et la lésion carieuse avec une résine Dentalon (Heraeus, Hanau, Allemagne) recouverte de nouveau avec la résine blanche RS-F2-GPWH-04 (56). Une fois ces modèles imprimés et après avoir réalisé une radiographie pour identifier les sites carieux, des étudiants de 4^{ème} année ont réalisé l'excavation carieuse, l'obturation coronaire avec une résine composite (Rebilda DC blanc, VOCO, Cuxhaven, Allemagne) sur la dent matricée. Ensuite, ils ont effectué la

préparation coronaire périphérique pour une couronne. Un contrôle de la bonne élimination carieuse a été réalisé avec une lumière LED bleue, en effet, chaque résine utilisée apparaît d'une couleur différente lorsqu'elle est exposée à la lumière LED. Les étudiants ont aussi rempli un questionnaire par la suite afin d'y exprimer leur ressenti (56). Ce modèle est intéressant pour son côté très réaliste, au lieu de préparer des modèles de dents saines, la dent présente ici une lésion carieuse étendue. Cela reflète donc la réalité clinique car les chirurgiens-dentistes ne préparent que très rarement des dents saines. Malgré tout, une seule résine simulait l'émail et la dentine saine. Il serait intéressant d'utiliser différentes résines afin de se rapprocher un peu plus des propriétés mécaniques et des sensations haptiques retrouvées avec une dent naturelle.

C'est pour cette raison qu'Höhne *et al.* ont tenté d'améliorer leur modèle en créant une dent distinguant l'émail et la dentine (57). Toujours en partant d'une dent 36 naturelle, le modèle a été imprimé en technique SLA via une imprimante Form2 (FormLabs). La différence étant ici l'utilisation de deux résines : une résine photopolymère blanche RS-F2-RGWH-01 pour l'émail (FormLabs) et une résine Color Kit RS-F2-PKG-CR (FormLabs) pour la dentine (Fig. 18.A). La pulpe a été simulée de nouveau avec un matériau polyéther Impregum Penta DuoSoft Light Body, mais ici aucune résine spécifique n'a été utilisée pour simuler une lésion carieuse (57). Ainsi, des étudiants de 4^{ème} année mais aussi des chirurgiens-dentistes (possédant au moins quatre années d'expérience) ont pu utiliser cette dent pour réaliser la préparation coronaire périphérique pour une couronne (Fig. 18.B). Un modèle dentaire de la même dent simulant la préparation coronaire périphérique « idéale » a été imprimé en résine grise RS-F2-GPGR-04 (FormLabs) afin de pouvoir comparer les tailles. Les étudiants et les CD ont par la suite rempli un questionnaire pour y décrire leur expérience de travail sur ce modèle (57). Ce modèle présente les avantages d'utiliser différentes résines pour distinguer l'émail et la dentine. Ainsi on pouvait retrouver une couleur et une dureté différente sur le modèle, ce qui reflète bien la réalité des dents naturelles. Malgré tout, suite aux résultats des questionnaires pratiqués sur les étudiants et CD qui ont utilisé ce modèle, il faudrait améliorer la différence de dureté entre les résines simulant les deux tissus pour améliorer le réalisme. De plus, contrairement au précédent modèle, ici aucune lésion carieuse n'est simulée. Il serait donc intéressant de « combiner » les avantages des deux modèles.

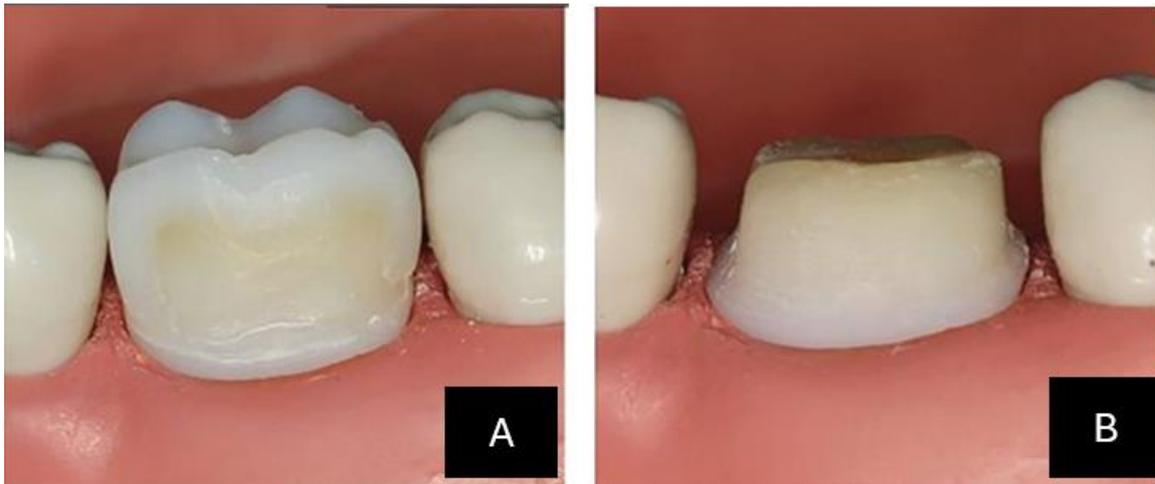


Figure 18 : Photographies présentant le modèle dentaire de la dent 36 préparé en vestibulaire mettant en évidence les différences de couleur entre les deux résines (A) ; modèle avec la préparation coronaire périphérique totale (B) (57).

Par la suite, Höhne *et al.* ont poursuivi leurs travaux concernant la création de modèles pédagogiques imprimés en 3D (27). Après les deux modèles principalement utilisés pour la préparation pour couronne, ils ont par la suite développé un modèle ayant pour but de s'entraîner à la préparation d'un logement pour tenon radiculaire. L'équipe s'est basé sur le μ CT d'une dent 36 extraite. Le fichier .stl a de nouveau été modifié sur Autodesk Inventor, afin d'y intégrer un complexe pulpaire « virtuellement » préparé par un système réciproque similaire au Reciproc Blue R25 (VDW, Munich, Allemagne). La partie coronaire a aussi été coupée pour simuler une dent préparée suite à un délabrement coronaire volumineux. Ensuite, le fichier a été importée sur le logiciel PreForm 3.0.1 (FormLabs) afin d'être imprimée en technique SLA avec l'imprimante Form2 (FormLabs) avec une résine photopolymère blanche RS-F2-GPWH-04 (FormLabs). Une fois les modèles imprimés et les étapes de post-impression réalisées, une obturation canalaire avec de la gutta-percha et un ciment AH Plus (Dentsply DeTrey GmbH, Constance, Allemagne) est effectuée (Fig. 19). La dent pouvant ainsi être intégrée dans un modèle KaVo standard (27). Des étudiants de 4^{ème} année ont ainsi pu réaliser la préparation d'un tenon radiculaire avec des forets de différentes dimensions ER-System (Komet, Lemgo, Allemagne). La dent a ensuite été retirée pour vérifier l'absence de perforations, et un tenon témoin a été utilisée pour vérifier la bonne préparation radiculaire. Un questionnaire a été rempli par les étudiants pour décrire leur ressentis sur ce modèle (27).

Ce modèle est très intéressant car il existe actuellement peu de modèles ayant pour but une préparation de tenon radulaire, et ceux qui existent sont généralement coûteux. Malgré tout, il présente plusieurs défauts : il serait intéressant de ne pas couper la partie coronaire pour intégrer une couronne simulant une lésion carieuse, utiliser des résines avec des couleurs et dureté différentes pour avoir un modèle réaliste (Fig. 18). Il serait aussi envisageable de ne pas préparer les canaux sur les fichiers .stl afin d'avoir une dent très réaliste utilisable en endodontie et en prothèse.



Figure 19 : Photographie présentant le modèle de la 36 avec l'obturation canalaire réalisée et intégrée dans un modèle KaVo (27).

Pour compléter l'offre de modèles utilisables en prothèse fixée, Kröger *et al.* ont développé plusieurs versions de modèles imprimés en 3D (20). Ils ont commencé par se baser sur un scan intra-oral ou un scan de modèle en plâtre d'une arcade maxillaire d'un patient. Les fichiers ont ensuite été modifiés sur le logiciel GOM Inspect (GOM, Brunswick, Allemagne). Afin d'être intégrables à une tête fantôme, une plaque associable au modèle a été créée sur le logiciel Rhinoceros (McNeel Europe, Barcelone, Espagne). Les modèles ont été imprimés en technique PolyJet avec une imprimante Objet Eden 260V (Stratasys, Rehovot, Israël) avec une résine photopolymère liquide MED690 (Stratasys) (20). Le premier modèle a été utilisé à des fins d'entraînement à la préparation de facettes : après avoir réalisé des wax-ups et d'une clé en silicone de ces derniers, les étudiants en 4^{ème} année ont pu réaliser le mock-up et la préparation dentaire en vue d'une pose de facettes, l'empreinte et la réalisation des provisoires (Fig. 20.A).

Un des autres modèles développés était multidisciplinaire (prothèse fixée, prothèse amovible, dentisterie restauratrice). Entre autres, une couronne préformée en acier (3M Espe) a été scellée avec un ciment Luxatemp Star (DMG Chemisch-Pharmazeutische Fabrik GmbH, Hambourg , Allemagne) sur un pilier de dent 16 simulant une lésion carieuse (Fig. 20.B). Un des objectifs de ce modèle était de permettre aux étudiants d'apprendre à déposer la couronne et le ciment sur cette dent (20).

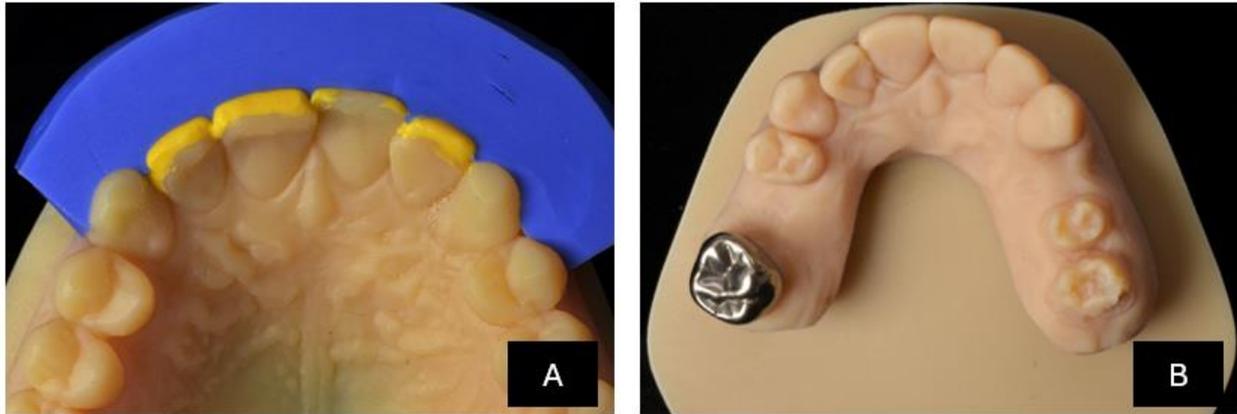


Figure 20 : Photographies présentant un modèle maxillaire avec des wax-ups de futures facettes avec une clé en silicone (A) ; un modèle pluridisciplinaire, simulant un édentement partiel de classe III modification 1 de Kennedy, une couronne coulée sur 16 à déposer et des lésions carieuses sur les dents 25/26 (B) (20).

3.2.2 Les modèles en dentisterie prothétique amovible

Dans le cadre de la prothèse amovible/adjointe, l'impression de modèles est utilisée pour simuler des édentements afin de réaliser une réflexion globale sur une situation clinique d'édentement précise et réaliste. Ces modèles vont permettre une analyse occlusale et des courbes mais aussi une identification de l'édentement, une observation complète des dents afin d'imaginer les différentes alternatives thérapeutiques et de concevoir les tracés des possibles châssis de stellites répondant aux édentements.

Par exemple, le modèle de simulation interdisciplinaire développé par Kröger *et al.* (vu sur la figure 20.B) présente un édentement et permet donc de réaliser une analyse complète de l'arcade (20). Il permet de donner la classification de Kennedy et d'analyser les courbes occlusales dans le plan frontal, transversal et sagittal afin d'évaluer d'éventuelles modifications à réaliser pour le futur traitement. Il est aussi possible d'observer la position intra-arcade des dents mais aussi leur forme et leur état. A partir de cette analyse, il sera intéressant d'imaginer

les plans de traitements globaux avec en particulier la partie prothétique amovible qu'elle soit transitoire ou d'usage (20). L'avantage principal de ce modèle est qu'il permet une analyse réaliste et la possibilité de réaliser le tracé prospectif du futur châssis de stellite, comme c'est le cas des modèles primaires des patients réalisés au cabinet. De plus, il est possible d'imprimer une infinité d'arcades pour observer une grande diversité de situations cliniques. Toutefois, ce modèle d'arcade maxillaire devrait être aussi développé à la mandibule pour avoir une analyse occlusale/inter-arcades pertinente et réaliste. Il pourrait aussi être intéressant d'ajouter une fausse gencive pour améliorer le côté réaliste du modèle.

Petre *et al.* ont aussi effectué des travaux afin de développer une méthodologie permettant de créer des modèles imprimés en 3D simulant diverses situations d'édentements (28). La méthodologie décrite se base sur un scan initial de modèles pédagogiques standards type Frasaco. Ensuite, d'autres scan sont réalisés, à savoir des dents Frasaco intactes et d'autres dents Frasaco simulant des préparations périphériques totales ou partielles. Ainsi, à l'aide du logiciel de CAO Ceramill Mind (Amann Girrbach AG, Koblach, Autriche), il est ainsi possible de créer une infinité de fichiers .stl avec des dents naturelles et/ou préparées ainsi que n'importe quel édentement. Il est aussi possible d'amplifier ou diminuer la résorption osseuse des zones édentées. Les fichiers .stl créés peuvent ainsi être montés sur un articulateur virtuel. Les modèles ont ainsi été imprimés en technique SLA avec une imprimante Form 3B+ (FormLabs) et une résine White Resin (FormLabs). Les modèles imprimés peuvent être montés sur des têtes fantômes pour recréer une situation réaliste comme la mise en occlusion (Fig. 21). Ils ont ainsi pu être évalués par le biais d'un questionnaire réalisé chez des étudiants de 3^{ème} et 4^{ème} année ayant pu utiliser ces modèles (28). Ces modèles vont ainsi présenter plusieurs avantages majeurs. En effet, la possibilité de créer une infinité de fichiers et donc de modèles, permettant de simuler toutes les situations cliniques possibles. Il est aussi possible de créer ces modèles avec des scans de patients réels, afin d'avoir des modèles d'une situation clinique réelle. De plus, ces modèles sont montables sur des têtes fantômes pour recréer une situation semblable à celle au fauteuil avec le patient. Il est aussi intéressant de noter le côté « personnalisable » des résorptions gingivales et osseuses au niveau des édentements, ainsi que l'utilisation multidisciplinaires de ces modèles. Toutefois, il est possible de les améliorer, par exemple en utilisant une ou plusieurs résines avec une couleur et une dureté similaire à celles des dents naturelles, mais aussi en créant un masque gingival spécifique, afin d'en améliorer le réalisme.

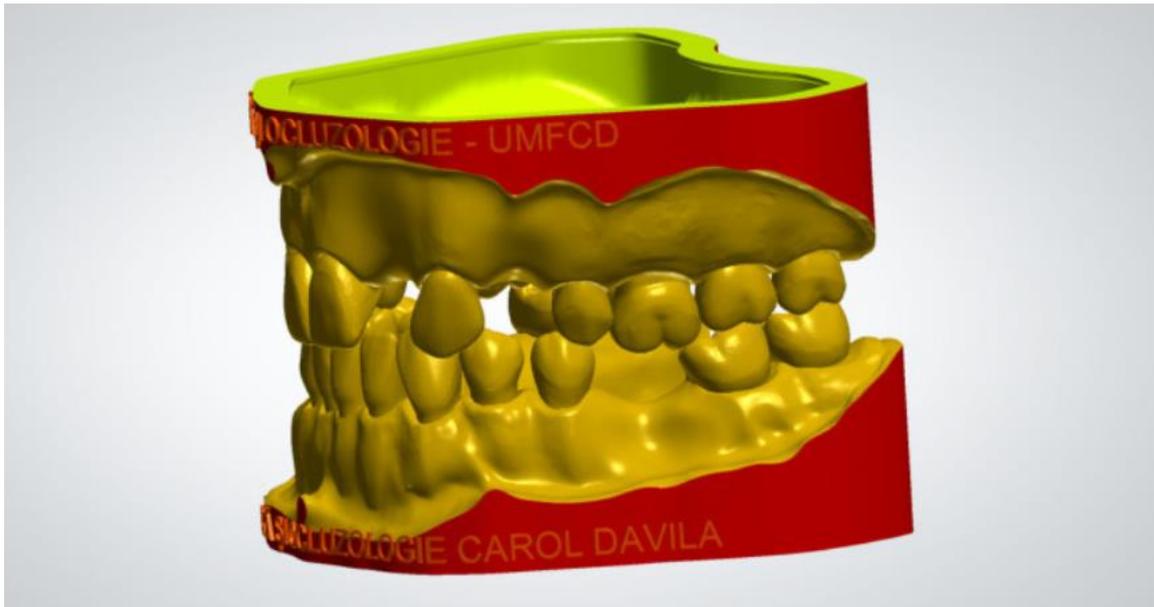


Figure 21 : Image représentant un fichier .stl de modèles maxillaire et mandibulaire avec des édentements partiels mis en occlusion, prêts à être imprimés (28).

3.3 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en dentisterie restauratrice

La maladie carieuse étant la maladie infectieuse la plus répandue dans le monde, il est capital pour le CD de savoir la détecter, dès les stades les plus précoces, et ainsi de savoir la traiter (58). Dans le cadre de la dentisterie restauratrice, ce genre de modèles va principalement être utilisé pour créer des dents simulant des lésions carieuses de différents sites. L'intérêt de ce genre de modèle imprimé en 3D est d'éviter les inconvénients liés à l'utilisation de dents naturelles. Leur utilisation va permettre à un étudiant dans un premier temps d'évaluer le stade International Caries Detection and Assessment System (ICDAS) d'une lésion carieuse avant d'envisager leur traitement (59).

Comme vu dans la partie prothèse (Fig. 20.B), Kröger *et al.* ont développé plusieurs modèles imprimés en 3D présentant des cavités carieuses simulées à l'aide du logiciel Blender (Blender Foundation) (20). Le but de ceux-ci était pour les étudiants de cureter les lésions carieuses, de réaliser des wax-up et de faire une clé en silicone de ces derniers. Cette clé palatine permet également de servir de support pour réaliser une nouvelle obturation par composites en technique stratifiée (20). Ces modèles sont intéressants car ils permettent de présenter diverses situations de curetages carieux à réaliser ainsi que la possibilité d'apprendre les techniques de réalisations d'obturations par résines composites. Malgré tout, ces modèles présentent des lésions carieuses cavitaires sur des modèles avec un seul type de résine, les lésions étant simulées par une baisse de la densité de résine. Il pourrait donc être amélioré en utilisant plusieurs types de résines, afin de mieux simuler les lésions carieuses.

De leur côté, Sinha *et al.* ont tenté de développer un modèle imprimé en 3D d'une dent 16 présentant une lésion carieuse occlusale, imprimée en technique SLA avec une imprimante Form 3 (FormLabs) (60). La lésion carieuse est simulée par une différence de densité au niveau de la résine. Ainsi, des étudiants de 5^{ème} année ont pu réaliser le curetage carieux sur cette dent avant de remplir un questionnaire afin d'avoir leurs ressentis. De plus, pour évaluer les curetages, une analyse des photographies sur un logiciel spécifique ainsi qu'une analyse de la carte thermique des curetages de toutes les dents a été effectuée (60). Ce modèle est intéressant pour son approche de simulation de lésion carieuse, toutefois nous n'avons aucune information sur la manière dont a été créé ce modèle, ni sur le type de résine utilisée. De plus, le modèle est ici limité à une dent 16 avec une seule classe de lésion carieuse, il serait donc

intéressant de développer ce genre de modèle à d'autres dents et d'autres lésions carieuses, telles que proximales. On peut aussi noter que seul un curetage carieux a été réalisé sur ce modèle, pas d'obturation coronaire.

Dans ce sens, Ballester *et al.* ont développé un modèle dentaire de dents 35 et 36 présentant des lésions carieuses adaptables sur des modèles Frasaco classiques, dans un but de diagnostic du stade ICDAS (4 à 5) ainsi que la réalisation de curetages carieux sur ces dernières (61). Ils ont ainsi commencé par un scan des dents 35 et 36 des modèles Frasaco AG-3. Les fichiers .stl créés ont ainsi été modifiés sur le logiciel MeshMixer (Autodesk) afin de simuler une chambre pulpaire, une masse dentinaire, la coque amélaire ainsi que des lésions carieuses amélo-dentaires. Les fichiers .stl ont pu être importés dans le logiciel PreForm 3.22.1 (Formlabs) afin d'être imprimés en technique SLA via l'imprimante Form3 (FormLabs). Deux résines ont été utilisées, tout d'abord la résine blanche RS-F2-GPWH-04 (FormLabs) pour la partie amélaire, et la résine RS-F2-GPCB-01 pigmentée en teinte #E7CEA8 du module Custom Color Picker de FormLabs pour le noyau dentinaire. Après des étapes classiques post-impression, les cavités carieuses ont été remplies de résine photopolymérisable Clip Flow (VOCO, Cuxhaven, Allemagne) teintée à l'aide de pigments pour simuler le tissu carié. Les coques amélaire ont été assemblées au reste du modèle avec une résine CoreX Flow (Dentsply). Enfin, la chambre pulpaire était remplie d'Impregum Penta DuoSoft Light Body (3M Espe). Ainsi, des étudiants de 4^{ème} et 6^{ème} année (appartenant à l'Université d'Aix-Marseille en France) ont pu évaluer le stade ICDAS des lésions carieuses avant de réaliser le curetage sur ce modèle, aidé du schéma simulant la radiographie de ces dents (Fig. 22). On peut toutefois noter que seul le curetage a été réalisé, pas l'obturation coronaire adéquate. Un questionnaire a ensuite été réalisé afin de retranscrire leurs ressentis sur ces deux modèles (61). Ce modèle est ainsi très intéressant car il permet de se rapprocher d'une situation classique retrouvée au fauteuil avec un patient, c'est-à-dire visuellement et radiologiquement, détecter les caries, diagnostiquer leur stade ICDAS, afin d'en déduire la thérapeutique adéquate avant de les traiter. De plus, les différences de teintes et de dureté entre les différents tissus ainsi que la sensibilité tactile au curetage améliorent ce côté réaliste. Toutefois, selon les étudiants, la différence de teinte entre émail/dentine et la translucidité amélaire peuvent être améliorées, tout comme avoir une dureté amélaire plus importante. De plus, différentes étapes de fabrications de ces modèles sont chronophages, car du fait de l'utilisation de plusieurs résines, un assemblage des différentes parties est nécessaire, tout comme le remplissage des cavités

cariées et pulpaires. Enfin, il pourrait être bénéfique de développer ce genre de modèles sur d'autres dents, afin d'avoir une formation plus complète.

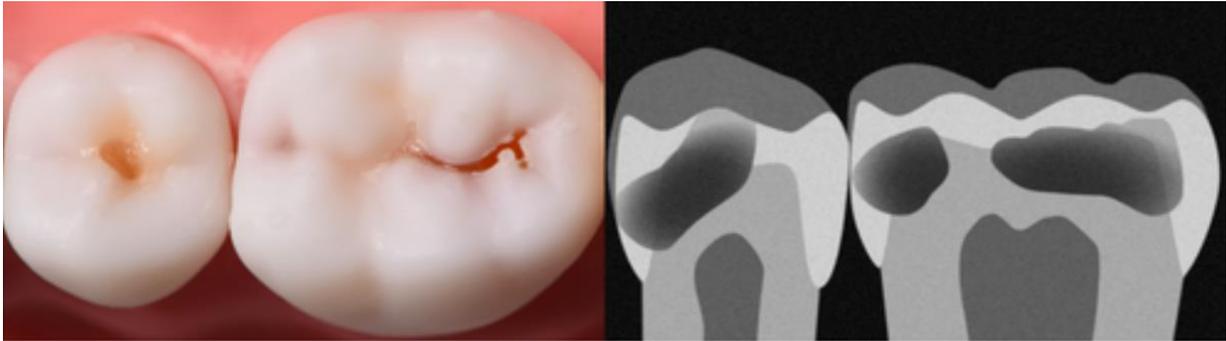


Figure 22 : Photographie représentant des modèles de dents 35 et 36 imprimés en 3D présentant des lésions carieuses amélo-dentinaire ICDAS 4-5 (à gauche) et schéma représentant la radiographie rétro-coronaire correspondante à ces deux dents (à droite) (61).

Un autre modèle imprimé en 3D développé ayant des intérêts en dentisterie restauratrice, est celui développé par Hühne *et al.* vu un peu plus haut dans la partie prothèse conjointe (56). Ce modèle imprimé en technique SLA avec l'imprimante Form2 et une résine blanche RS-F2-GPWH-04 de FormLabs. La pulpe a été simulé avec un polyéther Impregum Penta DuoSoft Light Body (3M Espe) et la lésion carieuse avec la résine Dentalon (Heraeus). Ce modèle présente certes un but d'entraînement en prothèse mais aussi en dentisterie restauratrice. En effet, les étudiants de 4^{ème} année vont dans un premier temps réaliser le curetage carieux, et ce sur un matériau spécifique mimant, en sensation tactile et couleur, les tissus carieux. De plus, une partie de la lésion carieuse présente une proximité pulpaire en mésial. La chambre pulpaire étant remplie d'Impregum de couleur rouge/rose, il est possible de deviner en transparence la pulpe, et donc aux étudiants de s'entraîner à la réalisation d'in coiffage pulpaire indirect avec un hydroxyde de calcium Kerr-Life (Kerr, Orange, États-Unis). Ensuite, l'obturation coronaire avec une résine composite est réalisée (56). Cependant, ce modèle peut être encore amélioré en utilisant différentes résines pour l'émail et la dentine comme ce fut le cas sur le modèle suivant développé par Hühne *et al.* (Fig. 18), mais ce dernier ne simule pas de lésion carieuse et n'a donc pas d'intérêt dans cette partie.

Ensuite, Panpisut *et al.* ont développé un modèle imprimé en 3D dont le but est de réaliser une élimination Sélective des Caries (SCR) (62). En effet, dans certaines situations, une dent peut présenter une lésion carieuse atteignant le tiers interne de la dentine et être donc proche de la pulpe, mais ne pas présenter de symptômes pulpaire. Dans ce genre de cas, il peut être intéressant de ne réaliser l'excavation que de la dentine infectée (molle) et de laisser la dentine affectée présentant une sclérose tubulaire, afin d'éviter d'éventuelles complications pulpaire (63–65). Pour développer ce modèle, l'équipe a commencé par réaliser des cavités, proximales et occlusale, sur une dent 36 en résine pour simuler des lésions carieuses. Après un scan pour créer le fichier .stl, ce dernier a été modifié sur le logiciel SolidWorks (Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, Waltham, États-Unis) afin de créer un volume pour la chambre pulpaire. La dent a ensuite été imprimée en technique DLP avec l'Asiga MAX UV (Asiga, Alexandria, Australie). Pour cette dent, plusieurs matériaux sont utilisés, une résine Optiprint Model (Dentona AG, Dortmund, Allemagne) pour la base dentaire, la pulpe a été remplie de cire rouge (Whip Mix, Louisville, États-Unis) et les lésions carieuses de Ciment Verre Ionomère Modifié par Ajout de Résine (CVIMAR) Fuji II LC (GC, Tokyo, Japon) teinté en marron. De plus, la lésion occlusale a été recouverte d'une résine composite Filtek Z350 XW Body Shade (3M Espe). Le modèle de cette 36 pouvait ensuite être placée dans un modèle pédagogique standard (Fig. 23). Ainsi, des étudiants de 5^{ème} année ont réalisé le curetage en technique SCR avant de remplir un questionnaire (62). Le but initial de s'entraîner à la technique SCR est pertinent, toutefois on ne note pas de distinction de matériau utilisé pour simuler la dentine affectée et infectée, ce qui est pourtant l'objectif du modèle. De plus, le CVIMAR coloré qui est utilisé pour la lésion carieuse est intéressant au niveau coloration, mais ce genre de matériau ne représente pas bien la sensation tactile que l'on peut retrouver au curetage d'une vraie lésion carieuse. De même, selon les étudiants, le composite utilisé pour la couche amélaire supra-carieuse ne reflète pas la dureté réelle de l'émail. On pourrait aussi améliorer ce modèle en utilisant différentes résines pour l'émail et la dentine, tout en améliorant la transparence amélaire pour deviner la lésion carieuse.

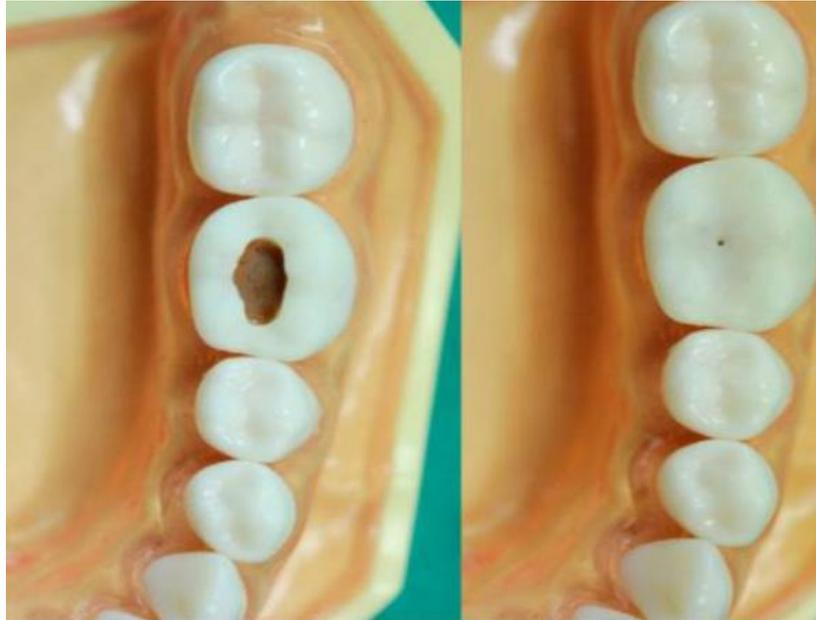


Figure 23 : Photographie présentant le modèle imprimé en 3D de la dent 36 mise en place dans un modèle pédagogique classique, avec le CVIMAR simulant la lésion carieuse occlusale (à gauche) et recouverte de composite simulant l'émail sain (à droite) (62).

Un autre modèle imprimé en 3D a été développé conjointement par le département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille et la société RightNao (Nantes, France) (Fiches pédagogiques du département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille). Ce modèle de dent 16, intégrable à un modèle pédagogique standard, présente deux lésions carieuses (une mésiale et une distale) (Fig. 24.A). Les étudiants, avec l'aide de la radiographie correspondante, ont pu réaliser une séquence complète de curetage carieux et d'obturation coronaire sur ce modèle. En effet, après avoir réalisé l'accès aux lésions carieuses, ils ont réalisé le curetage complet de la dentine cariée infectée (Fig. 24.B). Après mise en place du champ opératoire et des matrices, ils ont effectué une obturation coronaire par résine composite, par incrémentations successives (Fig. 24.C). Après dépose du champ opératoire, les étapes de finitions et de polissage ont pu être effectuées (Fig. 24.D) (Fiches pédagogiques du département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille).

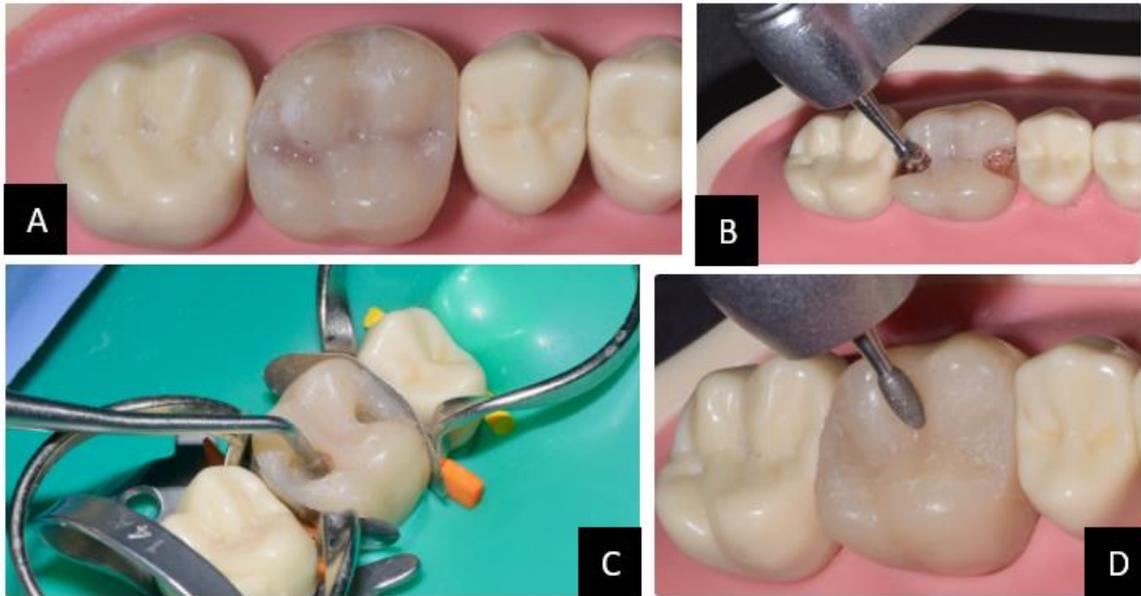


Figure 24 : Photographies présentant le modèle imprimé en 3D de la dent 16, développé par le département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille et la société RightNao, mis en place dans un modèle pédagogique classique avant curetage carieux (A) ; lors de la réalisation du curetage carieux (B) ; lors de la réalisation de l'obturation coronaire par résine composite (C) ; lors des étapes de finitions (D) (Fiches pédagogiques du département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille).

3.4 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en implantologie

Les édentements, qu'ils soient unitaires ou pluraux, encastrés ou terminaux, sont traités de manière croissante par des solutions implantaires. En effet, cette discipline représente une part de plus en plus importante des options thérapeutiques présentées dans les bagages du CD aujourd'hui. La pose d'implant reste malgré tout un acte relativement complexe, et la formation pré-clinique est à ce jour plus théorique que pratique. Or pour continuer d'augmenter le nombre de praticiens réalisant ce genre d'actes, il est important de développer les possibilités d'entraînements pré-cliniques pratiques afin d'améliorer l'apprentissage de la pose d'implants. Le but étant de commencer à appréhender l'utilisation de cassettes d'outils et guides chirurgicaux, ainsi que la chronologie des étapes de la pose implantaire (66).

Afin de suivre cette logique, Hu *et al.* ont développé un modèle imprimé en 3D de simulation d'implantation immédiate (67). Pour fabriquer ce modèle, l'équipe s'est basée sur le CBCT ainsi que le scan intra-oral de la situation buccale d'un patient présentant une dent 11 avec une fracture coronaire horizontale au niveau du tiers cervical. Ainsi, ils ont créé trois fichiers .stl distincts : le fichier pour la dent 11 isolée via le logiciel InVesalius (Centre des Technologies de l'Information Renato Archer, Amarais, Brésil) ; le fichier de l'arcade maxillaire sans la dent 11 via le logiciel OrthoAnalyser (3 Shape, Copenhague, Danemark) ; et le fichier du guide chirurgical via le logiciel DentalCAD (Exocad GmbH, Darmstadt, Allemagne). L'arcade, la dent et le guide ont ensuite été imprimés en technique DLP via l'imprimante Shape 1 Dental (Rayshape, Suzhou, Chine) avec une résine Dental Series (Rayshape). L'arcade et la dent sont en résine opaque, quant au guide, il est lui en résine transparente (Fig. 25). Parallèlement, une restauration provisoire sous forme de bridge à ailettes a été usinée. Ainsi, après une analyse du CBCT du patient, des étudiants de 3^{ème} année en stomatologie de l'Université de Wuhan ont pu réaliser l'extraction de la dent sur le modèle, mettre en place le guide chirurgical, réaliser les étapes de forage avec un kit de chirurgie guidée (Nobel Biocare, Zurich, Suisse), la mise en place de la restauration provisoire, avant de remplir un questionnaire pour avoir leurs avis sur ce type de modèle (Fig. 25). Nous pouvons toutefois noter que toutes les étapes de forage ont été réalisées, mais pas la mise en place de l'implant, ce qui est pourtant le but final de la réalisation de ces étapes (67). Ce modèle a un intérêt particulier, celui de pouvoir s'entraîner à la réalisation d'une séquence opératoire complète d'implantation immédiate pré-

clinique. Mais il ne reflète pas encore suffisamment une réalité clinique, en effet les structures anatomiques adjacentes (nerveuses, sinusales, jugales, labiales) et les muqueuses gingivales, palatines ne sont pas simulées. Il n'est aussi pas possible de l'intégrer sur une tête fantôme. Or, ces derniers éléments font parties intégrantes des difficultés rencontrées en implantologie. De plus, il pourrait être intéressant de développer ce genre de modèle similaire pour des cas d'implantations « classiques » sur d'autres sites et avec diverses situations d'édentements.

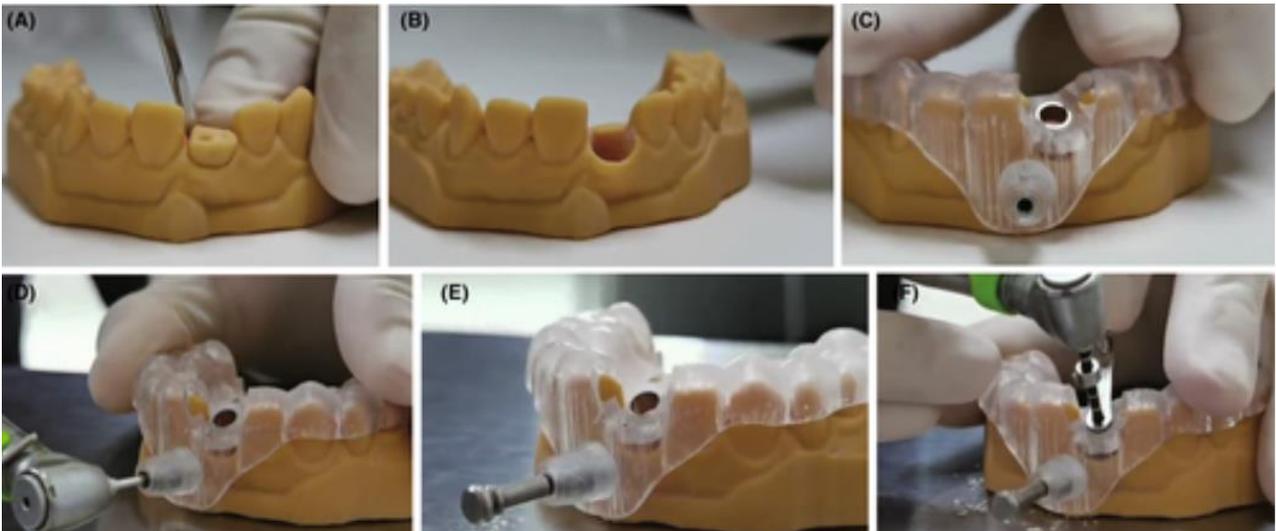


Figure 25 : Photographies représentant les différentes étapes de l'implantation immédiate sur le site d'une 11 (extraction (A et B) ; mise en place et fixation d'un guide chirurgical (C à E) ; forage implantaire immédiat (F)) sur le modèle de simulation 3D (67).

3.5 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en pédodontie

Les soins pédodontiques sont aujourd'hui au cœur de la formation pré-clinique, afin de pouvoir mieux les appréhender pour l'activité clinique future. Les enfants sont des patients particuliers au cabinet du fait de leur jeune âge, de leur appréhension, de leur peur des soins dentaires chez la majorité d'entre eux. Une maîtrise de la partie technique de ces soins est évidemment importante pour le praticien, pour mieux gérer la partie « psychologique » dans le contexte global du soin pédodontique.

C'est ainsi que Marty *et al.* ont cherché à développer un modèle imprimé en 3D permettant de s'entraîner à la réalisation de la pulpotomie, afin de le comparer aux modèles classiques (43). Ils sont ainsi partis du scan d'une molaire lactéale cariée naturelle, puis le fichier .stl en découlant a été modifié sur le logiciel Amira (Thermo Fisher Scientific, Waltham, États-Unis), pour « agrandir » la lésion carieuse. Une arcade mandibulaire complète avec la dent 85 spécifique a ensuite été imprimée en technique DLP via une imprimante Solflex 350 3D (VOCO) avec la résine V-Print model (VOCO). Ainsi, des étudiants de 5^{ème} année, de la faculté de chirurgie-dentaire de Toulouse, ont pu réaliser la pulpotomie de la dent, ainsi que la réalisation d'une coiffe pédiatrique préformée (CPP) sur cette dernière. Le même traitement a été réalisé sur une dent lactéale avec une chambre pulpaire Frasaco. Ils ont ensuite rempli un questionnaire afin de recueillir leurs ressentis (43). Ainsi, selon les étudiants, les deux modèles sont intéressants mais le modèle imprimé en 3D semble être plus réaliste, du fait de la présence d'une cavité carieuse et d'une pulpe plus rétractée (Fig. 26). Toutefois, il faudrait améliorer le modèle en utilisant une autre résine avec une couleur et dureté plus similaire aux substances dentaires. De plus, afin d'améliorer le côté réaliste, il serait pertinent d'utiliser une résine spécifique pour simuler la lésion carieuse et de remplir la chambre pulpaire avec un matériau pour éviter ce vide pulpaire. L'étude pourrait aussi être plus poussée en réalisant une obturation pulpaire et coronaire, comme c'est le cas en bouche, avant la réalisation de la CPP.



Figure 26 : Photographie présentant la coupe longitudinale d'une dent 85 Frasaco standard (à gauche) et de la dent développée imprimée en 3D (à droite) (43).

3.6 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en traumatologie

Au sein du cabinet dentaire, le CD peut être confronté, à n'importe quel moment, à un patient se présentant avec un traumatisme dentaire. Ces traumatismes peuvent toucher les dents lactéales, les dents permanentes, les enfants ou les adultes. Ils se présentent sous de nombreuses formes comme les fractures dentaires, radiculaires, alvéolaires, ou encore des chocs avec modification de position des dents^{12,13}. Même si une formation théorique pré-clinique complète est réalisée, il est quasi impossible de pouvoir s'entraîner au niveau pratique à gérer ces traumatismes. C'est pour cette raison que certains cliniciens essaient de développer des modèles de simulation de différents traumatismes afin de pouvoir mieux appréhender et gérer ce genre de situation en pratique clinique quotidienne.

Ainsi, Reymus *et al.* ont cherché à développer un modèle imprimé en 3D d'arcade maxillaire avec différents traumatismes, afin d'améliorer la qualité diagnostique et thérapeutique du clinicien en cas de rencontre avec une situation de traumatisme (42). Pour ce faire, ils sont partis des données CBCT d'une arcade maxillaire d'un patient. Le fichier .stl résultant a été modifié sur le logiciel MeshMixer (AutoDesk) afin de conserver l'arcade seulement de la dent 14 à 24. Ensuite, plusieurs traumatismes ont été simulés : une fracture amélo-dentinaire complexe sur la 11, une luxation latérale en direction palatine de la 12, une expulsion complète de la 21 et une fracture horizontale radiculaire au tiers apical de la 22. Après importation dans le logiciel PreForm (FormLabs), le modèle a pu être imprimé en technique SLA avec l'imprimante Form2 (FormLabs) avec la résine Grey Resin (FormLabs) mélangée avec une poudre de sulfate de Baryum, permettant de rendre le modèle radio-opaque pour la réalisation de radiographies. A noter que le modèle est intégrable à une tête fantôme, et qu'un masque gingival a aussi été imprimé avec une résine Gingiva Mask (Nextdent, Soesterberg,

¹² Primary teeth – Dental Trauma Guide [Internet]. [cité 12 juin 2024]. Disponible sur: <https://dentaltraumaguide.org/injury-groups/primary-teeth/>

¹³ Permanent teeth – Dental Trauma Guide [Internet]. [cité 12 juin 2024]. Disponible sur: <https://dentaltraumaguide.org/injury-groups/permanent-teeth/>

Pays-Bas) pour l'ajouter sur le modèle (Fig. 27). Ainsi, des étudiants de premier cycle ont pu, à l'aide du modèle, établir les diagnostics des différents traumatismes avant de réaliser les thérapeutiques correspondantes. Toutefois, nous n'avons pas d'informations sur les traitements précis réalisés même si la réalisation de traitements sur ce modèle sont possibles. Les étudiants ont finalement répondu à un questionnaire afin d'analyser la pertinence du modèle (42). Ce modèle, même s'il pourrait être amélioré en utilisant une arcade complète et en réalisant le même principe à la mandibule, a le mérite d'être un vrai modèle de simulation de traumatismes. Car jusqu'à ce modèle, avant de rencontrer le cas en clinique, le praticien n'avait l'occasion de s'entraîner à la gestion de traumatismes bucco-dentaires que de manière théorique. De plus, la technique utilisée pour créer le modèle permet de réaliser d'autres modèles avec divers traumatismes. Le modèle pourrait toutefois être amélioré en utilisant une résine avec une couleur dentaire plus réaliste.



Figure 27 : Image présentant le fichier .stl du modèle de l'arcade maxillaire (de 14 à 24) d'un patient présentant une fracture amélo-dentinaire complexe sur sa 11, d'une expulsion de la 21. Le modèle simule également une luxation latérale en direction palatine de la 12 ainsi qu'une fracture horizontale radiculaire au tiers apicale de la 22, mais ne sont pas visibles sur cette image (42).

3.7 Les modèles pédagogiques imprimés en 3D utilisés en anatomie externe des dents

Au tout début du cursus d'études en odontologie, l'étudiant va devoir apprendre à maîtriser l'anatomie, la morphologie des différentes dents afin de savoir les reconnaître en fonction de ses caractéristiques anatomiques externes (coronaires et radiculaires). Mais une maîtrise de cette morphologie doit aussi permettre au praticien d'être capable de reproduire l'anatomie d'une dent lors de reconstitutions directes ou de cires de diagnostics (wax-up), ainsi que de savoir juger de la bonne réalisation anatomique d'une dent prothétique.

Précédemment, les étudiants apprenaient cette anatomie par le biais de planches anatomiques, avant de réaliser des sculptures de dents en plâtre ou en cire. Toutefois, il n'est pas toujours aisé de deviner des caractéristiques 3D d'une dent à partir de plans en 2D. Une autre manière était d'apprendre ces caractéristiques par le biais de dents naturelles extraites, mais ici se pose la question de la contamination ainsi que de la possibilité d'obtenir tous les types de dents (46). Avec l'impression 3D, il est ainsi possible d'acquérir des données numériques d'une infinité de dents et par la suite de les imprimer. Ces dents imprimées en 3D vont permettre de faciliter la compréhension des différentes caractéristiques dentaires pour les étudiants.

Ainsi, Wang *et al.* ont essayé de développer différents modèles de dents imprimés en 3D (41). Un enseignant de l'école de stomatologie en Chine avait commencé par sculpter quatorze modèles de dents en plâtre, ensuite ces modèles ont été scannés puis imprimés avec une imprimante Shaanxi Hengtong et du plastique Acide Polylactique (PLA). Ainsi deux groupes d'étudiants de 4^{ème} année ont eu un examen d'anatomie dentaire, théorique et de sculpture sur plâtre. Un groupe avait des dents naturelles extraites, et l'autre les dents imprimées. Selon l'étude, il n'a pas de différences significatives de résultats entre les deux groupes (41). Toutefois, même s'ils permettent d'éviter certains inconvénients des dents naturelles que nous avons pu voir, ces modèles possèdent plusieurs défauts majeurs : les modèles imprimés en 3D se basent sur des sculptures de dents en plâtre. Il serait bien plus intéressant de se baser sur des données de dents naturelles afin d'améliorer le réalisme et la diversité des modèles. De plus, nous n'avons pas d'information sur la technique d'impression utilisée, et l'utilisation de résines plus ressemblantes aux tissus dentaires serait beaucoup plus pertinente.

Cantín *et al.* ont ainsi cherché à développer des modèles de dents unitaires plus réalistes (68). Ils se sont basés sur des dents naturelles saines extraites d'individus chiliens, puis les ont scannés. Grâce au logiciel ReplicatorG (MakerBot, Brooklyn, Etats-Unis), les fichiers .stl des dents prêtes à être imprimés ont été générés. Les modèles ont été imprimés en technique FFF avec une imprimante Mbot Grid II (Mbot 3D, Chine) (68). Même si nous n'avons pas d'informations sur le type de résine utilisé pour ces modèles, ils présentent un aspect très réaliste et pourrait éviter d'utiliser des dents naturelles, et donc leurs inconvénients associés (Fig. 28). De plus, au vu de la technique de création utilisée, il est possible de réaliser ce genre de modèle pour toutes les dents saines extraites. Toutefois, les modèles peuvent être améliorés en utilisant des résines distinctes pour la partie coronaire et radiculaire afin d'être plus réaliste. De même, les modèles sont issus initialement de scan de dents saines extraites, ce qui maintient donc la contrainte de posséder des dents saines avulsées.



Figure 28 : Photographies présentant le modèle imprimé en 3D développé par Cantín et al. d'une première prémolaire maxillaire (68).

Tableau récapitulatif

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des modèles pédagogiques imprimés en 3D (tableau personnel).

Modèles	Avantages	Inconvénients	Discipline(s)
Endo-block	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation canal pulpaire • Réalisation de traitements possible 	<ul style="list-style-type: none"> • Canal pulpaire trop simplifié • Résine transparente 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Dents Real-T Endo	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie externe réaliste • Système pulpaire un peu plus réaliste • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique • Modèles mono- et pluri-radiculés • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie radiculaire en résine transparente • Réalisme du système canalaire à améliorer • Propriétés mécaniques de la résine ≠ email/dentine 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Meglioli <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie externe réaliste • Résine opaque • Entraînement à la réalisation de cavités d'accès • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Seulement modèles de dents 11 et 36 • Pas de simulation canalaire • Sensations tactiles ≠ dents naturelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Kustra <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie externe réaliste • Résine opaque • Entraînement à la réalisation de cavités d'accès • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de simulation canalaire • Propriétés mécaniques de la résine ≠ email/dentine 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Reymus <i>et al.</i> N° 1 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Système pulpaire un peu plus réaliste • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique • Résine opaque • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques de la résine ≠ email/dentine • Possibilité d'améliorer le réalisme du complexe pulpaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie

Modèle Robberecht <i>et al.</i> N°1 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • 2 RCS avec une phase minérale • Système pulpaire plus réaliste • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique • Résine opaque • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie externe • Propriétés mécaniques et sensations tactiles encore à améliorer ≠ dents naturelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Robberecht <i>et al.</i> N°2 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • RCS avec une phase minérale et organique • Sensations tactiles vs. dents naturelles • Système pulpaire plus réaliste • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique • Résine opaque • Modèles standardisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Anatomie externe • Réalisme du complexe canalaire encore à améliorer 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Vasudevan <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique sur canal calcifié • Anatomie externe 	<ul style="list-style-type: none"> • Résine semi-transparente • Propriétés mécaniques et sensations tactiles ≠ dents naturelles • Exclusivement des modèles monoradiculés 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Hanafi <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'arcade complète avec sextants amovibles • Utilisation d'EAL possible • Entraînement à la réalisation de traitement endodontique complet • Résine opaque 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de dents naturelles nécessaires • Dents imprimées « non exploitables » 	<ul style="list-style-type: none"> • Endodontie
Modèle Höhne <i>et al.</i> N°1 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle pluridisciplinaire unitaire intégrable à des modèles d'arcade • Entraînement au curetage carieux, obturation coronaire et à la préparation de couronne • Modèle réaliste : résine opaque, simulation de lésions carieuses et de la chambre pulpaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Une seule résine utilisée • Propriétés mécaniques et sensations haptiques à améliorer • Modèle uniquement de dent 36 	<ul style="list-style-type: none"> • Prothèse fixée • Dentisterie restauratrice
Modèle Höhne <i>et al.</i> N°2 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle unitaire intégrable à des modèles d'arcade • Entraînement à la préparation de couronne • Modèle réaliste : résines opaques distinctes émail/dentine 	<ul style="list-style-type: none"> • Propriétés mécaniques et sensations haptiques encore à améliorer • Pas de simulations de lésions carieuses • Modèle uniquement de dent 36 	<ul style="list-style-type: none"> • Prothèse fixée

Modèle Höhne <i>et al.</i> N°3 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle unitaire intégrable à des modèles d'arcade • Entraînement à la préparation de tenon radiculaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle uniquement de dent 36 • Partie coronaire coupée • Une seule résine utilisée • Obturation canalaire réalisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Prothèse fixée
Modèles Kröger <i>et al.</i> (PJ)	<ul style="list-style-type: none"> • Plusieurs modèles développés pour un usage pluridisciplinaire (préparation de facettes, dépose de couronne, curetage carieux et obturation, analyse des édentements, projection des traitements • Modèles d'arcades complètes 	<ul style="list-style-type: none"> • Seulement arcade maxillaire • Une seule résine utilisée pour la simulation des « tissus sains » et des lésions carieuses • Propriétés mécaniques de la résine à améliorer • Pas de masque gingival 	<ul style="list-style-type: none"> • Prothèse fixée • Prothèse amovible • Dentisterie restauratrice
Modèle Petre <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'arcades complètes pouvant simuler n'importe quel édentement • Possibilité de simuler une résorption osseuse afin d'améliorer le réalisme • Modèles intégrables têtes fantômes • Possibilité de l'utiliser en prothèse fixée 	<ul style="list-style-type: none"> • Une seule résine utilisée • Propriétés mécaniques de la résine à améliorer • Pas de masque gingival 	<ul style="list-style-type: none"> • Prothèse amovible
Modèle Sinha <i>et al.</i> (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle simulant une lésion carieuse pour s'entraîner au curetage 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle uniquement de dent 16 • Une seule résine utilisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Dentisterie restauratrice

<p>Modèle Ballester <i>et al.</i> (SLA)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle réaliste : résines opaques distinctes émail/dentine avec teintes et duretés différentes • Simulation carieuse avec une résine spécifique pour entraînement au curetage carieux • Simulation pulpe camérale • Modèles adaptables sur des arcades Frasaco standards 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles uniquement de dents 35 & 36 • Différence de teinte émail/dentine à améliorer • Dureté de la résine amélaire à augmenter • Fabrication du modèle chronophage 	<ul style="list-style-type: none"> • Dentisterie restauratrice
<p>Modèle Panpisut <i>et al.</i> (DLP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'entraînement au SCR • Modèle unitaire intégrable dans des arcades de modèles pédagogiques classiques • Matériaux distincts « tissu » sains et lésions carieuses • Simulation pulpe camérale 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle uniquement de dent 36 • Pas de matériaux distincts pour dentine infectée et dentine affectée • Simulation carieuse en CVIMAR ne représentant pas les sensations tactiles ressenties lors d'un vrai curetage • Une seule résine pour l'émail et la dentine 	<ul style="list-style-type: none"> • Dentisterie restauratrice
<p>Modèle département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille & société RightNao</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle simulant des lésions carieuses pour s'entraîner au curetage et la réalisations d'obturations coronaires • Modèle unitaire intégrable dans des arcades de modèles pédagogiques classiques • Matériaux distincts « tissu » sains et lésions carieuses 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de simulation de la pulpe camérale • Une seule résine pour l'émail et la dentine • Modèle uniquement de 16 • Pas d'information sur la technique d'impression et les matériaux utilisés 	<ul style="list-style-type: none"> • Dentisterie restauratrice
<p>Modèle Hu <i>et al.</i> (DLP)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'arcade complète pour entraînement à l'implantation immédiate • Possibilité de réaliser une séquence opératoire complète • Existence d'un guide chirurgical et d'une restauration provisoire 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de mise en place de l'implant • Modèle non intégrable sur une tête fantôme • Modèle à développer pour une implantation standard et d'autres situations d'édentements • Pas de représentation des muqueuses et structures anatomiques environnantes 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantologie

Modèle Marty <i>et al.</i> (DLP)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'entraînement à la réalisation de pulpotomies sur dents lactéales • Entraînement à la réalisation d'une CPP • Simulation carieuse • Simulation pulpaire plus réaliste vs. dent Frasaco spécifique 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle uniquement de dent 85 • Pas de résines distinctes émail/dentine • Pas de matériau distinct pour la simulation carieuse • Pas de réalisation d'obturation pulpaire et coronaire 	<ul style="list-style-type: none"> • Pédiodontie
Modèle Reymus <i>et al.</i> N° 2 (SLA)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèle d'entraînement à la gestion de traumatismes dentaires • Diversité des traumatismes • Possibilité de réflexions sur les diagnostics et thérapeutiques • Présence masque gingival • Technique de création du modèle utilisable pour créer d'autres modèles 	<ul style="list-style-type: none"> • Uniquement arcade maxillaire • Pas de réalisation des traitements adéquats • Réalisme à améliorer : utilisation d'une seule résine dentaire grise 	<ul style="list-style-type: none"> • Traumatologie
Modèle Wang <i>et al.</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles dentaires permettant d'éviter les contraintes des dents naturelles 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles basés sur des sculptures de dents en plâtre • Pas d'information sur la technique d'impression utilisée • Matériau d'impression peu réaliste 	<ul style="list-style-type: none"> • Morphologie dentaire
Modèle Cantín <i>et al.</i> (FFF)	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles dentaires permettant d'éviter les contraintes des dents naturelles • Technique utilisable pour l'impression de toutes les dents saines extraites 	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'information sur la résine utilisée • Technique requérante de dents saines extraites • Une seule résine utilisée 	<ul style="list-style-type: none"> • Morphologie dentaire

Conclusion

L'essor de l'impression 3D, ces dernières années, permet d'offrir de nouveaux outils aux différents acteurs en chirurgie-dentaire. Pour les instituts formateurs, l'impression 3D permet de créer des modèles pédagogiques de plus en plus réalistes, en plus grand nombre, tout en baissant les coûts de production par rapport aux modèles classiques existant.

Néanmoins, ces modèles ne sont pas encore exempts de tout défaut et nécessitent d'être améliorés. Le but ultime étant de créer un modèle se rapprochant des réalités cliniques rencontrées avec les patients, que ce soit au niveau visuel, anatomique, haptique et mécanique.

A ce jour, la majorité des modèles imprimés en 3D créés se consacrent à une discipline unique (Tabl. 1). Dans l'objectif constant de se rapprocher du réalisme clinique, il pourrait être intéressant dans l'avenir de créer un modèle pluridisciplinaire dit « idéal ». Ce modèle pourrait présenter certaines caractéristiques :

- Arcades bimaxillaires montables sur une tête fantôme ;
- Utilisation de résines distinctes avec des propriétés visuelles, physiques et mécaniques se rapprochant de l'émail et de la dentine ;
- Simulation de divers systèmes pulpaire : canal simple ou canaux multiples, avec différentes configurations anatomiques ;
- Simulation de lésions carieuses de différents sites et stades avec un matériau spécifique ;
- Simulation de différents édentements ;
- Présence d'un masque gingival.

Bibliographie

1. Adams NE. Bloom's taxonomy of cognitive learning objectives. *J Med Libr Assoc.* juill 2015;103(3):152-3.
2. Keim RG. The rise of 3D printers. *J Clin Orthod.* juill 2021;55(7):383.
3. Brumpt E, Bertin E, Tatu L, Louvrier A. 3D printing as a pedagogical tool for teaching normal human anatomy: a systematic review. *BMC Med Educ.* 20 oct 2023;23(1):783.
4. Sauveur G, Boucher Y. A teaching model for endodontic surgery. *Int Endod J.* mars 1998;31(2):133-6.
5. Ries JM, Grünler C, Wichmann M, Matta RE. Three-dimensional analysis of the accuracy of conventional and completely digital interocclusal registration methods. *J Prosthet Dent.* nov 2022;128(5):994-1000.
6. Chen PH, Fu CC, Givan D, Wagner S. Novel typodonts for teeth arrangement practice at a preclinical level. *J Dent Educ.* 19 oct 2023;
7. Decurcio DA, Lim E, Chaves GS, Nagendrababu V, Estrela C, Rossi-Fedele G. Pre-clinical endodontic education outcomes between artificial versus extracted natural teeth: a systematic review. *Int Endod J.* août 2019;52(8):1153-61.
8. Kumar AA, Phillip A, Kumar S, Rawat A, Priya S, Kumaran V. Digital model as an alternative to plaster model in assessment of space analysis. *J Pharm Bioallied Sci.* août 2015;7(Suppl 2):S465-469.
9. De Luca Canto G, Pachêco-Pereira C, Lagravere MO, Flores-Mir C, Major PW. Intra-arch dimensional measurement validity of laser-scanned digital dental models compared with the original plaster models: a systematic review. *Orthod Craniofac Res.* mai 2015;18(2):65-76.
10. Robberecht L, Hornez JC, Dehurtevent M, Dufour T, Labreuche J, Deveaux E, et al. Optimization and Preclinical Perception of an Artificial Simulator for Endodontic Training: A Preliminary Study. *J Dent Educ.* mars 2017;81(3):326-32.
11. Decurcio DA, Lim E, Nagendrababu V, Estrela C, Rossi-Fedele G. Difficulty levels of extracted human teeth used for pre-clinical training in endodontics in an Australian dental school. *Aust Endod J.* avr 2020;46(1):47-51.
12. Reis T, Barbosa C, Franco M, Baptista C, Alves N, Castelo-Baz P, et al. 3D-Printed Teeth in Endodontics: Why, How, Problems and Future-A Narrative Review. *Int J Environ Res Public Health.* 29 juin 2022;19(13):7966.
13. Rafiei E, Haerian A, Fadaei Tehrani P, Shokrollahi M. Agreement of in vitro orthodontic measurements on dental plaster casts and digital models using Maestro 3D ortho studio software. *Clin Exp Dent Res.* oct 2022;8(5):1149-57.

14. El-Zanaty HM, El-Beialy AR, Abou El-Ezz AM, Attia KH, El-Bialy AR, Mostafa YA. Three-dimensional dental measurements: An alternative to plaster models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* févr 2010;137(2):259-65.
15. Reymus M, Fotiadou C, Kessler A, Heck K, Hickel R, Diegritz C. 3D printed replicas for endodontic education. *Int Endod J.* janv 2019;52(1):123-30.
16. Garcia J, Yang Z, Mongrain R, Leask RL, Lachapelle K. 3D printing materials and their use in medical education: a review of current technology and trends for the future. *BMJ STEL.* janv 2018;4(1):27-40.
17. Tack P, Victor J, Gemmel P, Annemans L. 3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review. *Biomed Eng Online.* 21 oct 2016;15(1):115.
18. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* déc 2015;219(11):521-9.
19. Van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dental Materials.* janv 2012;28(1):3-12.
20. Kröger E, Dekiff M, Dirksen D. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. *Eur J Dent Educ.* nov 2017;21(4):e119-25.
21. Nayar S, Bhuminathan S, Bhat WM. Rapid prototyping and stereolithography in dentistry. *J Pharm Bioallied Sci.* avr 2015;7(Suppl 1):S216-9.
22. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent.* 2020;45(1):30-40.
23. Robberecht L, Chai F, Dehurtevent M, Marchandise P, Bécavin T, Hornez JC, et al. A novel anatomical ceramic root canal simulator for endodontic training. *Eur J Dent Educ.* nov 2017;21(4):e1-6.
24. 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.* févr 2020;29(2):124-8.
25. Dong T, Wang X, Xia L, Yuan L, Ye N, Fang B. Accuracy of different tooth surfaces on 3D printed dental models: orthodontic perspective. *BMC Oral Health.* 25 nov 2020;20(1):340.
26. Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J.* janv 2009;28(1):44-56.
27. Höhne C, Dickhaut N, Schmitter M. Introduction of a new teaching concept for dentin post preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ.* août 2020;24(3):499-506.
28. Petre AE, Pantea M, Drafta S, Imre M, Țâncu AMC, Liciu EM, et al. Modular Digital and 3D-Printed Dental Models with Applicability in Dental Education. *Medicina.* 6 janv 2023;59(1):116.

29. Hanafi A, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S. Perception of a modular 3D print model in undergraduate endodontic education. *Int Endodontic J.* juill 2020;53(7):1007-16.
30. Li F, Macdonald NP, Guijt RM, Breadmore MC. Increasing the functionalities of 3D printed microchemical devices by single material, multimaterial, and print-pause-print 3D printing. *Lab Chip.* 18 déc 2018;19(1):35-49.
31. Tian Y, Chen C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K, et al. A Review of 3D Printing in Dentistry: Technologies, Affecting Factors, and Applications. *Scanning.* 2021;2021:9950131.
32. Deshmane S, Kendre P, Mahajan H, Jain S. Stereolithography 3D printing technology in pharmaceuticals: a review. *Drug Dev Ind Pharm.* sept 2021;47(9):1362-72.
33. Wilhite R, Wölfel I. 3D Printing for veterinary anatomy: An overview. *Anat Histol Embryol.* nov 2019;48(6):609-20.
34. Monia Kabandana GK, Zhang T, Chen C. Emerging 3D printing technologies and methodologies for microfluidic development. *Anal Methods.* 4 août 2022;14(30):2885-906.
35. Pelevin IA, Nalivaiko AY, Ozherelkov DY, Shinkaryov AS, Chernyshikhin SV, Arnautov AN, et al. Selective Laser Melting of Al-Based Matrix Composites with Al₂O₃ Reinforcement: Features and Advantages. *Materials (Basel).* 18 mai 2021;14(10):2648.
36. Mazzoli A. Selective laser sintering in biomedical engineering. *Med Biol Eng Comput.* mars 2013;51(3):245-56.
37. Wang Y, Genina N, Müllertz A, Rantanen J. Binder jetting 3D printing in fabricating pharmaceutical solid products for precision medicine. *Basic Clin Pharmacol Toxicol.* mars 2024;134(3):325-32.
38. Gokuldoss PK, Kolla S, Eckert J. Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting-Selection Guidelines. *Materials (Basel).* 19 juin 2017;10(6):672.
39. Zhou L, Miller J, Vezza J, Mayster M, Raffay M, Justice Q, et al. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors (Basel).* 23 avr 2024;24(9):2668.
40. Lee B, Kim JE, Shin SH, Kim JH, Park JM, Kim KY, et al. Dental students' perceptions on a simulated practice using patient-based customised typodonts during the transition from preclinical to clinical education. *Eur J Dent Educ.* févr 2022;26(1):55-65.
41. Wang H, Xu H, Zhang J, Yu S, Wang M, Qiu J, et al. The effect of 3D-printed plastic teeth on scores in a tooth morphology course in a Chinese university. *BMC Med Educ.* 25 nov 2020;20(1):469.
42. Reymus M, Fotiadou C, Hickel R, Diegritz C. 3D-printed model for hands-on training in dental traumatology. *Int Endod J.* nov 2018;51(11):1313-9.

43. Marty M, Broutin A, Vergnes JN, Vaysse F. Comparison of student's perceptions between 3D printed models versus series models in paediatric dentistry hands-on session. *Eur J Dent Educ.* févr 2019;23(1):68-72.
44. Chaabnia F. Préparation canalaire : Différentes techniques.
45. Kustra P, Dobroś K, Zarzecka J. Making use of three-dimensional models of teeth, manufactured by stereolithographic technology, in practical teaching of endodontics. *Eur J Dent Educ.* mai 2021;25(2):299-304.
46. Meglioli M, Mergoni G, Artioli F, Ghezzi B, Manfredi M, Macaluso GM, et al. A Novel Self-Assessment Method for Training Access Cavity on 3D Printed Endodontic Models. *Dent J (Basel).* 13 juin 2023;11(6):152.
47. Tchorz JP, Hellwig E, Altenburger MJ. Teaching Model for Artificial Teeth and Endodontic Apex Locators. *Journal of Dental Education.* mai 2013;77(5):626-9.
48. Wolgin M, Wiedemann P, Frank W, Wrbas KT, Kielbassa AM. Development and Evaluation of an Endodontic Simulation Model for Dental Students. *Journal of Dental Education.* nov 2015;79(11):1363-72.
49. Vasudevan A, Sundar S, Surendran S, Natanasabapathy V. Tooth substance loss after incisal endodontic access and novel single-tooth template-guided endodontic access in three-dimensional printed resin incisors with simulated pulp canal calcification: A comparative in vitro study. *J Conserv Dent.* 2023;26(3):258-64.
50. dos S Luz D, de S Ourique F, Scarparo RK, Vier-Pelisser FV, Morgental RD, Waltrick SBG, et al. Preparation time and perceptions of Brazilian specialists and dental students regarding simulated root canals for endodontic teaching: a preliminary study. *J Dent Educ.* janv 2015;79(1):56-63.
51. Spent A, Kahn H. The use of a plastic block for teaching root canal instrumentation and obturation. *Journal of Endodontics.* sept 1979;5(9):282-4.
52. Dummer PMH, Alodeh MHA, Al-Omari MAO. A method for the construction of simulated root canals in clear resin blocks. *Int Endod J.* mars 1991;24(2):63-6.
53. Tchorz JP, Brandl M, Ganter PA, Karygianni L, Polydorou O, Vach K, et al. Pre-clinical endodontic training with artificial instead of extracted human teeth: does the type of exercise have an influence on clinical endodontic outcomes? *Int Endod J.* sept 2015;48(9):888-93.
54. Al-Sudani DI, Basudan SO. Students' perceptions of pre-clinical endodontic training with artificial teeth compared to extracted human teeth. *Eur J Dent Educ.* nov 2017;21(4):e72-5.
55. Kadoch N. Adhésion à la dentine altérée par les biomatériaux et les produits chimiques. 2022;

56. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ.* sept 2019;83(9):1100-6.
57. Höhne C, Schwarzbauer R, Schmitter M. 3D Printed Teeth with Enamel and Dentin Layer for Educating Dental Students in Crown Preparation. *J Dent Educ.* déc 2019;83(12):1457-63.
58. Balakrishnan M, Simmonds RS, Tagg JR. Dental caries is a preventable infectious disease. *Aust Dent J.* déc 2000;45(4):235-45.
59. Ismail AI, Sohn W, Tellez M, Amaya A, Sen A, Hasson H, et al. The International Caries Detection and Assessment System (ICDAS): an integrated system for measuring dental caries. *Community Dent Oral Epidemiol.* juin 2007;35(3):170-8.
60. Sinha A, Osnes C, Keeling AJ. Pilot study assessing 3D-printed teeth as a caries removal teaching tool. *Eur J Dent Educ.* mai 2022;26(2):329-36.
61. Ballester B, Pilliol V, Allaerd P, Jacquot B, Guivarc'h M. Evaluation of a new 3D-printed tooth model allowing preoperative ICDAS assessment and caries removal. *Eur J Dent Educ.* févr 2024;28(1):161-9.
62. Panpisut P, Doungkom P, Padunglappisit C, Romalee W, Suksudaj N. Assessment of 3D-Printed Tooth Containing Simulated Deep Caries Lesions for Practicing Selective Caries Removal: A Pilot Study. *Int J Environ Res Public Health.* 21 déc 2022;20(1):90.
63. Joves GJ, Inoue G, Sadr A, Nikaido T, Tagami J. Nanoindentation hardness of intertubular dentin in sound, demineralized and natural caries-affected dentin. *J Mech Behav Biomed Mater.* avr 2014;32:39-45.
64. Bjørndal L, Simon S, Tomson PL, Duncan HF. Management of deep caries and the exposed pulp. *Int Endod J.* juill 2019;52(7):949-73.
65. Clarkson JE, Ramsay CR, Ricketts D, Banerjee A, Deery C, Lamont T, et al. Selective Caries Removal in Permanent Teeth (SCRiPT) for the treatment of deep carious lesions: a randomised controlled clinical trial in primary care. *BMC Oral Health.* 9 juill 2021;21(1):336.
66. Alghamdi HS, Jansen JA. The development and future of dental implants. *Dent Mater J.* 31 mars 2020;39(2):167-72.
67. Hu L, Rong R, Song W, Wu H, Jia S, He Z, et al. Patient-specific 3D printed models for enhanced learning of immediate implant procedures and provisionalization. *Eur J Dent Educ.* août 2023;27(3):765-72.
68. Cantín M, Muñoz M, Olate S. Generation of 3D Tooth Models Based on Three-dimensional Scanning to Study the Morphology of Permanent Teeth. *International Journal of Morphology.* juin 2015;33(2):782-7.

Webographie :

- ¹ BienEnseigner É de. Le guide complet de la taxonomie de Bloom [Internet]. Bien Enseigner. 2021 [consulté le 30 juill 2024]. Disponible sur : <https://www.bienenseigner.com/taxonomie-de-bloom/>
- ² Larousse É. Définitions : modèle - Dictionnaire de français Larousse [Internet]. [consulté le 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mod%C3%A8le/51916>
- ³ PÉDAGOGIE : Définition de PÉDAGOGIE [Internet]. [consulté le 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.cnrtl.fr/definition/p%C3%A9dagogie>
- ⁴ Drecq juliette. Outils pédagogiques pour faciliter l'apprentissage - Interstis [Internet]. 2023 [consulté le 3 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.interstis.fr/blog/outils-pedagogiques-faciliter-apprentissage>
- ⁵ Typodont | Dental-Dictionary.com [Internet]. [consulté le 3 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.dental-dictionary.eu/en/english-dictionary/84637/typodont>
- ⁶ Moules en silicone KaVo pour modèles de dent | KaVo Dental [Internet]. [consulté le 5 juill 2024]. Disponible sur: <https://www.kavo.com/fr-fr/produits/formation-dentaire/modeles-detudes-et-dents/moules-en-silicone>
- ⁷ Cours : Modélisation et impression 3D | Campus RÉCIT [Internet]. [consulté le 13 juin 2024]. Disponible sur: <https://campus.recit.qc.ca/course/view.php?id=311#section-0>
- ⁸ Digital Light Processing (DLP) [Internet]. [consulté le 13 juin 2024]. Disponible sur: https://www.amf.uzh.ch/en/additive-manufacturing/our_technologies/dlp.html
- ⁹ Fused Filament Fabrication (FFF) : impression 3D industrielle avec OMNI | Polyvia [Internet]. [consulté le 13 juin 2024]. Fused Filament Fabrication (FFF) : impression 3D industrielle avec OMNI | Polyvia. Disponible sur: <https://www.polyvia.fr/fr/fabrication-additive/fused-filament-fabrication-fff-impression-3d-industrielle-avec-omni>
- ¹⁰ Dassault Systèmes [Internet]. 2021 [consulté le 13 juin 2024]. Fusion sur lit de poudre DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM. Disponible sur: <https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/powder-bed-fusion>
- ¹¹ Dassault Systèmes [Internet]. 2021 [consulté le 14 juin 2024]. Projection de liant - BJ. Disponible sur: <https://www.3ds.com/fr/make/guide/process/binder-jetting>
- ¹² Primary teeth – Dental Trauma Guide [Internet]. [consulté le 12 juin 2024]. Disponible sur: <https://dentaltraumaguide.org/injury-groups/primary-teeth/>
- ¹³ Permanent teeth – Dental Trauma Guide [Internet]. [consulté le 12 juin 2024]. Disponible sur: <https://dentaltraumaguide.org/injury-groups/permanent-teeth/>

Table des figures :

Figure 1 : Schéma représentant le principe pyramidal de la taxonomie de Bloom.	17
Figure 2 : Photographie d'un modèle pédagogique bi-maxillaire développé par la société Frasco GmbH (Tettngang, Allemagne).....	20
Figure 3 : Photographie montrant un exemple de modèle pédagogique d'aorte simulant un anévrisme (16).....	22
Figure 4 : Image représentant un exemple de fichier .stl d'une arcade mandibulaire (obtenue sur le logiciel Ceramill Mind (Amann Girrbach AG, Koblach, Autriche)) (28).	25
Figure 5 : Photographie d'une d'imprimante 3D Form2 (FormLabs Inc., Somerville, États-Unis).....	25
Figure 6 : Schéma simplifié représentant le principe de la SLA (19).	26
Figure 7 : Schéma simplifié représentant le principe de la DLP.....	27
Figure 8 : Schéma simplifié représentant le principe de la FFF ⁹	28
Figure 9 : Schéma simplifié représentant le principe du PJ (22).	30
Figure 10 : Schéma simplifié représentant le principe du SLS (Schéma du Dr Kellomäki de l'Université de Tampere en Finlande).	31
Figure 11 : Schéma simplifié représentant le principe du BJ.	32
Figure 12 : Photographie de plusieurs Endo-Block (50).	36
Figure 13 : Exemple de dent Real-T Endo (ici une 11) développée par Acadental (47).	37
Figure 14 : Photographie présentant une réplique d'incisive centrale 11 imprimée en technique SLA suite aux travaux de Meglioli et al. (46).	38
Figure 15 : Photographie présentant le simulateur canalaire en céramique développé par Robberecht et al. après préparation et obturation à l'aide de gutta-percha (23).....	40
Figure 16 : Photographie présentant le simulateur de calcification pulpaire, développé par Vasudevan et al., monté sur arcade avec mise en place de la digue (49).....	42
Figure 17 : Photographie présentant l'arcade mandibulaire, avec des sextants mêlant dents imprimées et dents naturelles, du modèle développé par Hanafi et al. (29).	43
Figure 18 : Photographies présentant le modèle dentaire de la dent 36 préparé en vestibulaire mettant en évidence les différences de couleur entre les deux résines (A) ; modèle avec la préparation coronaire périphérique totale (B) (57).	46
Figure 19 : Photographie présentant le modèle de la 36 avec l'obturation canalaire réalisée et intégrée dans un modèle KaVo (27).	47
Figure 20 : Photographies présentant un modèle maxillaire avec des wax-ups de futures facettes avec une clé en silicone (A) ; un modèle pluridisciplinaire, simulant un édentement partiel de classe III modification 1 de Kennedy, une couronne coulée sur 16 à déposer et des lésions carieuses sur les dents 25/26 (B) (20).	48
Figure 21 : Image représentant un fichier .stl de modèles maxillaire et mandibulaire avec des édentements partiels mis en occlusion, prêts à être imprimés (28).	50
Figure 22 : Photographie représentant des modèles de dents 35 et 36 imprimés en 3D présentant des lésions carieuses amélo-dentinaire ICDAS 4-5 (à gauche) et schéma représentant la radiographie rétro-coronaire correspondante à ces deux dents (à droite) (61).	53
Figure 23 : Photographie présentant le modèle imprimé en 3D de la dent 36 mise en place dans un modèle pédagogique classique, avec le CVIMAR simulant la lésion carieuse occlusale (à gauche) et recouverte de composite simulant l'émail sain (à droite) (65).	55
Figure 24 : Photographies présentant le modèle imprimé en 3D de la dent 16, développé par le département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille et la société RightNao, mis en place	

dans un modèle pédagogique classique avant curetage carieux (A) ; lors de la réalisation du curetage carieux (B) ; lors de la réalisation de l'obturation coronaire par résine composite (C) ; lors des étapes de finitions (D) (Fiches pédagogiques du département facultaire de chirurgie-dentaire de Lille).	56
Figure 25 : Photographies représentant les différentes étapes de l'implantation immédiate sur le site d'une 11 (extraction (A et B) ; mise en place et fixation d'un guide chirurgical (C à E) ; forage implantaire immédiat (F)) sur le modèle de simulation 3D (67).....	58
Figure 26 : Photographie présentant la coupe longitudinale d'une dent 85 Frasco standard (à gauche) et de la dent développée imprimée en 3D (à droite) (43).....	60
Figure 27 : Image présentant le fichier .stl du modèle de l'arcade maxillaire (de 14 à 24) d'un patient présentant une fracture amélo-dentinaire complexe sur sa 11, d'une expulsion de la 21. Le modèle simule également une luxation latérale en direction palatine de la 12 ainsi qu'une fracture horizontale radiculaire au tiers apicale de la 22, mais ne sont pas visibles sur cette image (42).....	62
Figure 28 : Photographies présentant le modèle imprimé en 3D développé par Cantín et al. d'une première prémolaire maxillaire (68).	64

Table des tableaux :

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des modèles pédagogiques imprimés en 3D (tableau personnel).	65
------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille : Année 2025 – 5 mars

Les modèles pédagogiques imprimés en 3D en chirurgie-dentaire, intérêts, limites : une revue de la littérature / **Bastien HAUCHECORNE**. - p. 80 : ill. 28 ; réf. 68 .

Domaines : Enseignement

Mots clés Libres : Modèle pédagogique, Impression 3D, Revue de Littérature.

La formation initiale des étudiants en chirurgie-dentaire pendant leur cursus universitaire est la base essentielle à leur future activité, il est donc nécessaire de leur offrir les meilleurs outils de formation.

Les modèles pédagogiques existants présentent de nombreux inconvénients. L'essor récent des imprimantes 3D a conduit à l'émergence de nouveaux modèles pédagogiques imprimés dans de nombreuses disciplines.

L'objectif de cette thèse est de recenser les nombreux modèles pédagogiques imprimés en 3D actuels existants dans les études de chirurgie-dentaire afin de voir leurs intérêts et leurs limites.

Ce travail permet d'imaginer de nouveaux modèles pédagogiques imprimés en 3D répondant aux exigences nécessaires afin de remplacer les modèles actuels.

JURY :

Président : Professeur Lieven ROBBERECHT

Assesseurs : Docteur Marion DEHURTEVENT

Docteur Corentin DENIS

Docteur Marine HENAUT