



HAL
open science

Amélioration et évaluation des modèles dentaires anatomiques réalisés par impression 3D en odontologie conservatrice

Perrine Allaerd

► **To cite this version:**

Perrine Allaerd. Amélioration et évaluation des modèles dentaires anatomiques réalisés par impression 3D en odontologie conservatrice. Chirurgie. 2022. dumas-03715800

HAL Id: dumas-03715800

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03715800>

Submitted on 16 Nov 2022

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

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



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

THESE

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

Présentée et publiquement soutenue devant

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

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

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

***Amélioration et évaluation des modèles dentaires
anatomiques réalisés par impression 3D en Odontologie
Conservatrice***

Présentée par

ALLAERD Perrine

Né(e) le 07/12/1996

A Marseille

Thèse soutenue le **VENDREDI 11 MARS 2022**

Devant le jury composé de

Président : Professeur RASKIN Anne

Assesseurs : Docteur JACQUOT Bruno

Docteur GUIVARC'H Maud

Docteur BALLESTER Benoit

THESE

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

Présentée et publiquement soutenue devant

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

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

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

***Amélioration et évaluation des modèles dentaires
anatomiques réalisés par impression 3D en Odontologie
Conservatrice***

Présentée par

ALLAERD Perrine

Né(e) le 07/12/1996

A Marseille

Thèse soutenue le **VENDREDI 11 MARS 2022**

Devant le jury composé de

Président : Professeur RASKIN Anne

Assesseurs : Docteur JACQUOT Bruno

Docteur GUIVARC'H Maud

Docteur BALLESTER Benoit

ADMINISTRATION

Doyens Honoraires

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

Directeur

Professeur	Bruno FOTI
------------	------------

Directeurs adjoints

Professeur	Michel RUQUET
Professeur	Anne RASKIN

Chargés de missions

Formation Initiale

Professeur	Michel RUQUET
------------	---------------

Recherche

Professeur	Anne RASKIN
------------	-------------

Formation Continue

Professeur	Frédéric BUKIET
------------	-----------------

Relations Internationales

Professeur	Hervé TASSERY
------------	---------------

Internat et Diplômes d'études spécialisées

Professeur	Virginie MONNET-CORTI
------------	-----------------------

Affaires générales

Docteur	Patrick TAVITIAN
---------	------------------

Responsable Administrative

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

PROMOTIONS :

2019 Raymond SANGIUOLO

2020 Gaston BERGER

2021 Joseph MIGOZZI

LISTE DES ENSEIGNANTS

PROFESSEURS DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

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

PROFESSEUR DES UNIVERSITES

ABOUT Imad (65)

PROFESSEURS EMERITES

DEJOU Jacques (58-01)
HUE Olivier (58-01)

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES – PRATICIENS HOSPITALIERS DES CSERD

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

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES ASSOCIES

BALLESTER Benoît (58-01)

BLANCHET Isabelle (58-01)

CASAZZA Estelle (58-01)

ASSISTANTS HOSPITALIERS ET UNIVERSITAIRES

ANTEZACK Angeline (57-01)

ARNIER Canelle (56-01)

BAUDINET Thomas (58-01)

BRINCAT Arthur (57-01)

BROS Agnès (56-01)

CHIARINI Thomas (58-01)

DUPRAT Florence (56-01)

FAURE-BRAC Mathias (57-01)

FERRE Enzo (58-01)

FOUQUES Agathe (56-01)

HAMMOUTENE Stéphane (57-01)

LAFONT Jacinthe (57-01)

LAURENT Camille (58-01)

LIOTARD Alicia (58-01)

MADENIAN Pauline (58-01)

MANSUY Charlotte (58-01)

MARCHAL Paul (58-01)

MARTIN William (56-01)

ONGHENA Tom (56-01)

PASCHEL Laura (58-01)

PILLIOL Virginie (58-01)

PRINCE Fanny (57-01)

RAYNAUD Camille (58-01)

REYNAL Florence (56-01)

ROMAO Vincent (57-01)

ROUSCOFF Eva (57-01)

SADOWSKI Camille (57-01)

VEILLARD Pierre (56-01)

ASSISTANT DES UNIVERSITES ASSOCIE

GRINE Ghilès (57-01)

Intitulés des sections CNU :

56^{ème} section : Développement, croissance et prévention

56-01 Odontologie pédiatrique et orthopédie dento-faciale

56-02 : Prévention – Epidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale

57^{ème} section : Chirurgie orale, Parodontologie, Biologie Orale

57-01 : Chirurgie orale – Parodontologie – Biologie orale

58^{ème} section : Réhabilitation orale

58-01 : Dentisterie restauratrice – Endodontie – Prothèses – Fonction-Dysfonction – Imagerie – Biomatériaux

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

A la Présidente du Jury,
Madame le Professeur Anne RASKIN,

C'est un immense honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je vous suis reconnaissante pour tout ce que vous avez pu m'enseigner durant ma 6^{ième} année en Odontologie Hospitalière. Travailler avec vous dans ce service fut très enrichissant. Votre bonne humeur au quotidien, votre gentillesse, votre patience et vos précieux conseils m'ont permis d'évoluer durant cette année.

Veillez recevoir ici la marque de mon profond respect et de ma sincère gratitude.

A Monsieur le Docteur Bruno JACQUOT,

Je tiens à vous exprimer tout ma gratitude pour avoir accepté de faire partie de ce jury.

Durant ces 3 années de clinique et les sessions d'ARC vous m'avez transmis avec passion vos connaissances en ce qui concerne les biomatériaux et la prise en charge des patients. Ainsi vous m'avez permis de prendre conscience de l'importance du choix des matériaux dans ce métier. Je vous remercie pour vos conseils et votre investissement dans ma thèse.

Veillez trouver dans ce travail le témoignage de ma sincère considération.

A Madame le Docteur Maud GUIVARC'H,

Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de siéger dans ce jury de thèse.

Je vous remercie également pour la qualité de votre enseignement et votre gentillesse. Grâce à vous j'ai pu acquérir de la rigueur dans la prise en charge des patients notamment en endodontie. J'ai eu la chance de pouvoir vous assister et de vous voir travailler sous microscope. Je vous remercie également pour votre disponibilité et l'intérêt que vous avez porté à ma thèse.

Veillez accepter le témoignage de mon profond respect.

A mon directeur de Thèse,
Monsieur le Docteur Benoit BALLESTER,

Je vous remercie pour l'honneur que vous m'avez fait en acceptant la direction de cette thèse.

Je vous suis extrêmement reconnaissante pour la confiance que vous m'avait fait en me proposant ce sujet qui vous tient à cœur. J'espère avoir été à la hauteur de vos attentes. Je vous remercie pour votre patience, votre disponibilité, votre réactivité et votre bienveillance mais surtout tout le travail et l'investissement que vous avez pu apporter à cette thèse. Ce fut un réel plaisir de travailler avec vous. Mon seul regret est ne pas vous avoir eu au sein de mes vacances cliniques et de ne pas avoir pu profiter de la richesse de votre enseignement.

Veillez trouver dans ce travail l'image de ma sincère reconnaissance.

Table des matières

Introduction	1
1. État actuel des modèles dentaires réalisés par SLA à l'École de Médecine Dentaire de Marseille	3
1.1. Méthode d'acquisition	4
1.2. Logiciels de modélisation	4
1.3. Contraintes d'impression du modèle final	5
2. Axes d'amélioration des modèles dentaires	7
2.1. Création de modèles avec une zone dentinaire et une zone amélaire	7
2.2. Gestion de la teinte dentinaire	7
2.3. Gestion de la dureté de l'émail	8
2.3. Simulation de la carie	9
3. Modèles dentaires anatomiques réalisés par impression 3D et leur évaluation : Revue de la littérature	10
3.1. Introduction	10
3.2. Matériels et méthodes	10
3.3. Résultats	11
3.4. Discussion	18
4. Évaluation de nouveaux modèles dentaires réalisés par SLA	20
4.1. Introduction	20
4.2. Matériel et méthode	20
4.2.1. Conception et impression des modèles dentaire	20
4.2.2. Evaluation des modèles imprimés	27
4.3. Résultats	30
4.3.1. Evaluation des lésions carieuses sur 35 et 36	30
4.3.2. Évaluation de la simulation de la carie	32
4.3.3. Évaluation du modèle dentaire imprimé	33
4.3.4. Évaluation du résultat d'apprentissage	34
4.3.5. Évaluation du processus d'apprentissage de la dent imprimée	34
4.4. Discussion	35
Conclusion	39
Bibliographie	I
Liste des tableaux	III
Liste des illustrations	IV

Introduction

La maladie carieuse est toujours considérée comme la pathologie chronique évitable la plus répandue dans le monde (1). Cette pathologie entraîne le développement de lésions carieuses qui peuvent avoir des conséquences négatives importantes sur la santé et l'état fonctionnel des patients lorsqu'elles ne sont pas traitées (2). Le traitement des lésions carieuses constitue donc l'une des compétences les plus fondamentales de la pratique dentaire quotidienne (3).

Au cours des 20 dernières années, des progrès majeurs ont été réalisés dans la détection et la gestion des lésions carieuses, ainsi que dans la prise en charge globale de la maladie carieuse (4). L'approche traditionnelle du "drill and fill" menant à une spirale destructrice de l'organe dentaire a cédé la place à une approche plus codifiée basée sur des preuves. Ces avancées ont abouti aujourd'hui au consensus international Caries Care 4D (5). Ce système est organisé en quatre étapes : les 4D pour Déterminer, Détecter, Décider et Faire (Do). Après avoir Déterminé le risque carieux du patient, il est nécessaire de Détecter les lésions carieuses en prenant soins d'évaluer leur activité et leur gravité avec la classification ICDAS (International Caries Detection and Assessment System) (6). Cela nécessite une évaluation visuelle et radiologique des dents, ainsi qu'une évaluation tactile de la consistance des tissus dentaires. Les deux premières étapes conduisent à un plan de traitement personnalisé à l'échelle du patient et de la dent (3^{ième} D : Décider). La planification et la mise en œuvre de ce plan de traitement correspondent au 4^{ième} D : Faire (Do).

Au cours de la formation préclinique, le développement des compétences théoriques et procédurales complexes sont acquises par les étudiants à l'aide de simulations réalisées au travers de travaux pratiques (3). Concernant l'odontologie restauratrice, les modèles de dents en plastique monoblocs traditionnellement utilisés (7,8) ne permettent pas de soutenir la formation des étudiants à la prise en charge actuelle des lésions carieuses. Ces dents artificielles représentent le plus souvent des dents intactes sans aucune pathologie et sans simulation de la pulpe. On demande aux étudiants de réaliser des préparations de cavités de dimensions spécifiques (7), qu'ils doivent ensuite restaurer selon la procédure imposée. L'étudiant n'a pas la possibilité d'effectuer une évaluation ICDAS de la lésion carieuse et de choisir la procédure de traitement appropriée. Il n'a pas non plus l'occasion de distinguer les variations entre les couches d'émail et de dentine saines et le tissu carieux (7) et de comprendre que l'extension de la lésion imposera parfois la suppression de l'émail non soutenu ou un recouvrement cuspidien. Avec de tels modèles, la mise en œuvre simulée de l'éviction sélective (9) est tout simplement éludée lors de la pratique préclinique, obligeant l'étudiant à la pratiquer pour la première fois en situation clinique. Il en va de même pour la gestion de la proximité pulpaire dans le cas de lésions carieuses profondes. Cette situation affecte la confiance en eux des étudiants en clinique, en particulier lorsqu'ils doivent traiter des lésions carieuses profondes. Elle est également génératrice d'un stress élevé lorsque l'exposition de la pulpe se produit en clinique (10).

Certains modèles commerciaux de dents artificielles plus réalistes tentent de compenser les déficiences des modèles monoblocs. Mais leur coût très élevé limite les possibilités de pratique des étudiants en raison du nombre limité de dents allouées pour chaque étudiant (7). De plus, ces modèles ne simulent pas toujours la sensation tactile du tissu carieux (7).

Pour pallier les inconvénients des dents artificielles commerciales, d'importantes recherches ont été menées dans le domaine de l'impression 3D afin de développer des modèles plus adaptés à la formation préclinique (3,7,11–18). En effet, la démocratisation des outils numériques tels que les scanners 3D, les cone-beams et les imprimantes 3D ouvrent la voie au développement de modèles de dents personnalisées plus réalistes et accessibles pour l'enseignement dentaire.

Dans ce travail de thèse, nous chercherons à améliorer et à évaluer de nouveaux modèles de dents artificielles imprimés en 3D.

Après avoir présenté les modèles et avancées précédemment réalisés par le Dr Gattoni durant son travail de thèse d'exercice, nous présenterons les différents axes d'amélioration que nous pourrions réaliser.

Dans une troisième partie, nous réaliserons une revue systématique de la littérature afin de recenser les propositions de modèles pédagogiques imprimés en 3D qui ont été évalués.

Enfin, nous présenterons le développement de nouveaux modèles de dents artificielles améliorés et les résultats de leur évaluation par des étudiants de l'École de Médecine Dentaire de Marseille.

1. État actuel des modèles dentaires réalisés par SLA à l'École de Médecine Dentaire de Marseille

Les progrès de l'impression 3D dans le domaine du prototypage rapide ouvrent la voie vers l'élaboration de modèles pédagogiques sur mesure et accessibles. Dès 2019, l'École de Médecine Dentaire de Marseille a investi dans l'acquisition d'une imprimante 3D Form3 (Formlabs) dans le but d'acquérir et de maîtriser la chaîne technique et technologique nécessaire à l'impression de tels modèles.

Les travaux réalisés dans le cadre de l'Odontologie Conservatrice ont fait l'objet d'un travail de thèse d'exercice réalisé par le Dr Gattoni Clément (19). Ils ont porté sur l'amélioration d'un modèle de dent artificielle du commerce (modèle AG-3, dent n°46, Frasco®) en recréant une chambre pulpaire et en simulant différentes sévérités de lésions carieuses correspondant à la classification ICDAS (figure 1).



Figure 1 : Photographies des premiers modèles obtenus par impression 3D

Afin d'obtenir ces modèles, il a fallu déterminer :

1. La méthode d'acquisition afin de numériser le modèle de référence.
2. Les logiciels à utiliser pour pouvoir éditer le modèle numérisé et réaliser les améliorations à apporter.
3. Les contraintes d'impression du modèle final.

Afin d'améliorer ces premiers modèles obtenus par impression 3D, nous serons amenés, dans ce travail de thèse, à repartir de ces acquis. Ils sont donc brièvement décrits ci-dessous.

1.1. Méthode d'acquisition

Afin de numériser le modèle de référence, le choix s'est porté sur l'utilisation d'un scanner intra-oral (Trios3, 3Shapes). Une fois le modèle acquis, le fichier au format 3OXZ est converti au format STL afin de pouvoir être importé dans les logiciels de modélisation (Figure 2).

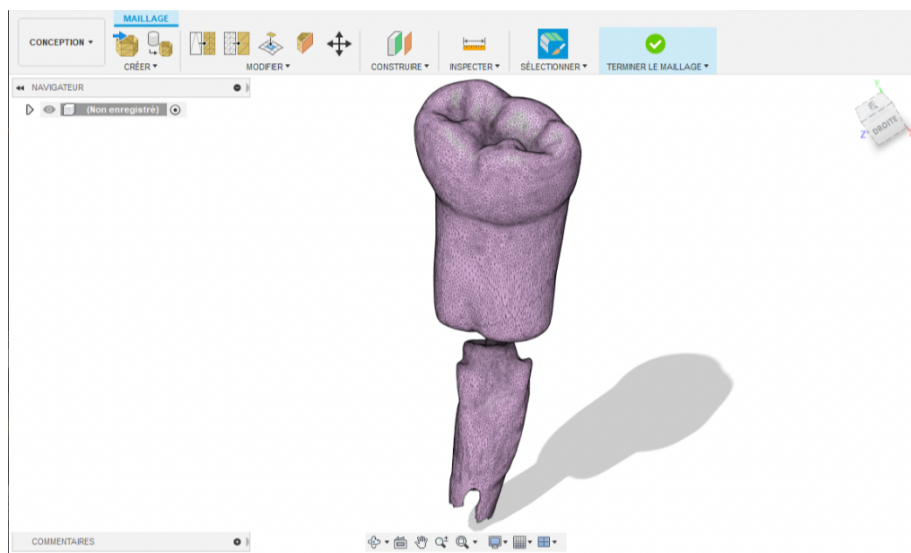


Figure 2 : Capture d'écran du modèle « brut » sur son support dans le logiciel Fusion360

1.2. Logiciels de modélisation

Deux logiciels ont été utilisés pour nettoyer et modifier le modèle numérisé : Meshmixer (Autodesk) et Fusion360 (Autodesk).

Les étapes de modification comprennent :

1. La suppression du support de numérisation.
2. La modélisation d'un volume simulant la chambre pulpaire (Figure 3).
3. La création du puits de vis (Figure 3).
4. La création d'une cheminée de drainage.
5. La modélisation de la lésion carieuse.

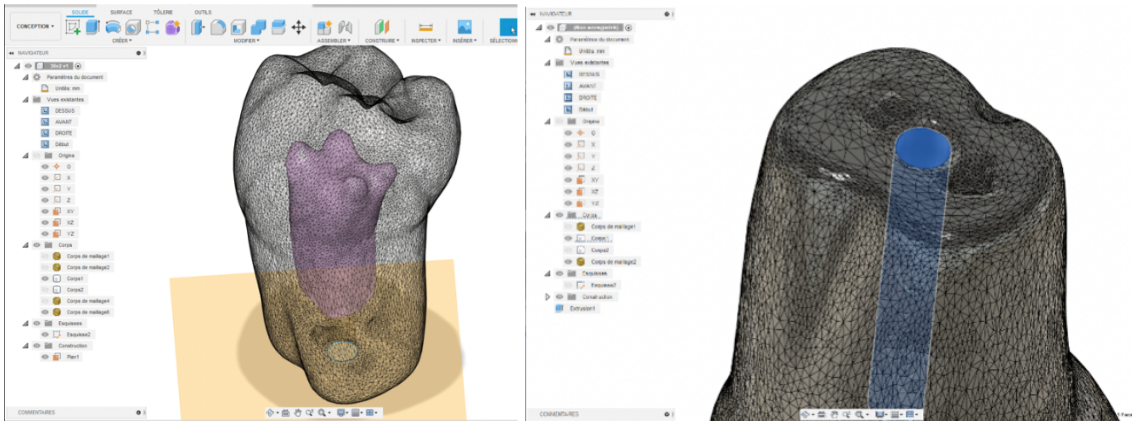


Figure 3 : Modélisation de la chambre pulpaire et du puits de vis

Une fois ces étapes réalisées, le modèle pédagogique est prêt à être imprimé.

1.3. Contraintes d'impression du modèle final

L'imprimante Form3 utilise une technique d'impression par stéréolithographie (ou SLA pour StereoLithography Apparatus). Elle est pourvue d'un bac de résine liquide photosensible dans lequel est immergé le plateau d'impression. Un laser photopolymérise la résine couche après couche, au fur et à mesure que le plateau remonte (Figure 4). (20)

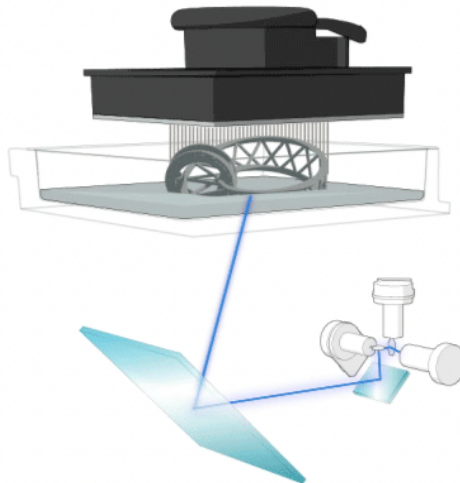


Figure 4 : Fonctionnement de l'impression par SLA

La réalisation des objets se faisant dans la résine fluide, une cheminée de drainage est nécessaire pour pouvoir évacuer facilement la résine non polymérisée emprisonnée dans les parties closes de la dent (chambre pulpaire).

En ce qui concerne les paramètres d'impression, l'ensemble est géré via le logiciel Preform (Formlabs).

Une fois les modèles imprimés, une étape de post-traitement de 15 à 20 minutes à l'alcool isopropylique à 99,9% est nécessaire afin d'éliminer tout résidu de résine non polymérisée de la surface du modèle.

Sur une imprimante SLA, les modèles d'impression 3D sont imprimés à partir d'une seule résine. Il ne peut donc pas avoir de différence de teinte ou de dureté entre la partie normalement dévolue à l'émail et à la dentine sur un modèle imprimé en un temps. Une voie d'amélioration consisterait donc à imprimer des modèles en plusieurs parties pour ensuite les assembler. C'est ce que nous allons voir dans la prochaine partie de ce document.

2. Axes d'amélioration des modèles dentaires

2.1. Création de modèles avec une zone dentinaire et une zone amélaire

La méthode la plus intuitive pour réaliser un modèle avec une partie dévolue à l'émail et une autre dévolue à la dentine consiste à (figure 5) :

1. Scanner un modèle intact,
2. Scanner le même modèle sur lequel la partie amélaire a été supprimée
3. Soustraire le modèle numérique du modèle préparé au modèle numérique du modèle intact afin d'obtenir le modèle numérique de la coque amélaire.

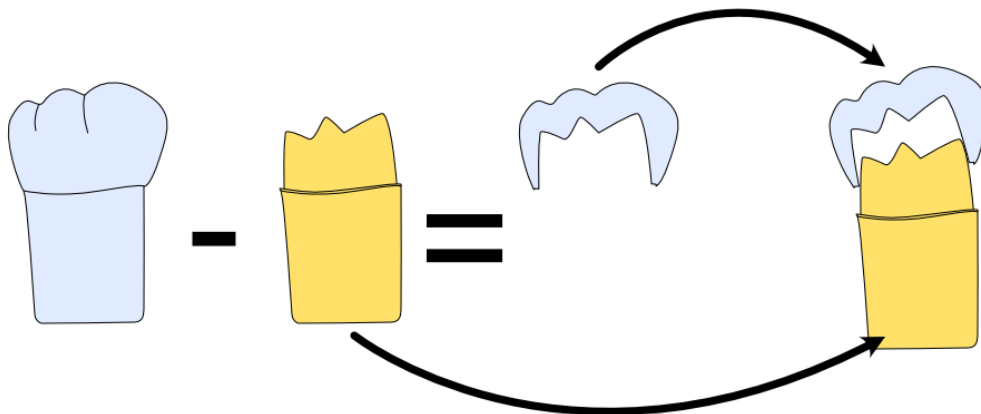


Figure 5 : Schéma de la méthode de réalisation des modèles dentaires

Cette méthode permet d'éviter d'avoir à modéliser intégralement les différentes parties du modèle, ce qui serait particulièrement complexe mais permettrait cependant de mieux gérer l'ajustement des différentes parties.

2.2. Gestion de la teinte dentinaire

Les dents naturelles présentent un émail plus clair que la dentine, or les premiers modèles obtenus ont été imprimés avec une seule et même résine. Ces modèles ne présentent donc aucune différence de teinte entre l'émail et la dentine.

En divisant le modèle en deux parties distinctes, il serait possible d'utiliser le color Kit (21) proposé par Formlabs (figure 6) pour imprimer la partie dévolue à la dentine avec une résine présentant une teinte spécifique. Sur le site Formlabs (22), il est possible de connaître la formule des pigments à utiliser pour obtenir la teinte désirée (figure 7).



Figure 6 : Color Kit (Formlabs) (23)

Custom Color Picker

Selected			Achievable		
R	G	B	RGB		
242	214	175	231, 206, 168		
HEX	G	B	HEX		
#F2D6AF			#E7CEA8		
HEX					

PIGMENT RECIPE

CYAN	0mL	BLACK	0mL
MAGENTA	1mL	WHITE	96mL
YELLOW	3mL		

Figure 7 : Capture d'écran de la couleur choisie pour la dentine ainsi que la formule des pigments qui y est associée

2.3. Gestion de la dureté de l'émail

Les dents naturelles présentent une différence de dureté entre l'émail et la dentine. En effet, l'émail est nettement plus dur que la dentine. Avec des modèles monoblocs, nous rencontrons le même problème que pour la teinte, il est impossible de réaliser une différence de dureté entre l'émail et la dentine.

Comme pour la gestion de la teinte dentinaire, la solution consiste à utiliser une résine spécifique pour la réalisation de la partie amélaire. La Rigid 10K résine (24) de chez Formlabs (figure 8) présente une charge élevée en verre et reproduit ainsi la rigidité des thermoplastiques à charges de verre et de fibre. C'est la résine la plus rigide de la gamme. Elle est de couleur blanche, et pourrait être utilisée pour produire les coques d'émail.



Figure 8 : Résine 10K Rigide (Formlabs) (25)

2.3. Simulation de la carie

La simulation de la lésion carieuse constitue un double challenge :

- Il faut pouvoir simuler les différentes localisations et sévérités basées sur la classification ICDAS (26).
- Il faut pouvoir simuler le tissu carieux à la fois en termes de consistance et de teinte.

Afin de simuler des lésions carieuses, nous créons des lacunes vides de tailles et de positions variables au sein du modèle imprimé. Jusqu'à présent, ces lésions étaient toujours ouvertes pour faciliter le nettoyage de la résine non polymérisée présente à l'intérieur des lacunes. Le développement d'un modèle en deux parties (émail et dentine) nous permettra d'éviter cette difficulté et de mieux simuler les lésions ampullaires où l'émail, quasi intact, recouvre une dentine sévèrement atteinte.

Concernant la simulation du tissu carieux, il sera nécessaire de tester différents matériaux à base de plâtre, d'élastomère ou de polymère afin de déterminer le matériau le plus approprié.

3. Modèles dentaires anatomiques réalisés par impression 3D et leur évaluation : revue de la littérature

3.1. Introduction

La dentisterie numérique est de plus en plus présente dans les cabinets dentaires ainsi que dans l'enseignement dentaire. Au cours des dernières années, de plus en plus d'articles sont publiés concernant la fabrication 3D de modèles dentaires pour l'enseignement. Ces modèles ont pour objectif de permettre aux étudiants une approche préclinique plus réaliste et plus didactique que les modèles standards tout en limitant les coûts.

Dans cette revue de la littérature, nous allons relever les articles proposant et évaluant des modèles pédagogiques réalisés par impression 3D dans le but d'observer leurs avantages et inconvénients.

Cette revue nous permettra également d'élaborer un questionnaire dans le but d'évaluer nos propres modèles pédagogiques réalisés par impression 3D.

3.2. Matériels et méthodes

La revue systématique de la littérature a été menée en vue d'identifier tous les articles susceptibles de décrire l'évaluation de modèles pédagogiques dentaires réalisés par impression 3D. Seuls les articles relatifs à l'Odontologie restauratrice, pédiatrique et prothétique ont été retenus. Les articles concernant d'autres disciplines, telles que l'Endodontie ou la Chirurgie Maxillo-Faciale ont été exclus.

Pour réaliser cette revue de la littérature, nous avons utilisé les critères de recherche bibliographique PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses). La base de données bibliographiques PUBMED a été utilisée avec la requête suivante, sans limite temporelle :

("rapid prototyping"[All Fields] OR "Printing, Three-Dimensional"[Mesh]) AND ("Dentistry/education"[Mesh] OR "Education, Dental"[Mesh] OR "Students, Dental"[MESH])

Le 01/10/2021, cette recherche retournait 25 articles. Les articles ont d'abord été sélectionnés en fonction de leur titre, puis en fonction du résumé. Si un doute persistait après lecture du résumé, l'article était alors lu dans son ensemble. Toutes les étapes de la recherche ont été effectuées par deux examinateurs, puis soigneusement vérifiées afin de minimiser les biais lors du processus d'examen. En cas de désaccord, la décision a été prise par consensus.

Au terme de ce processus, sept articles ont été sélectionnés. La recherche ascendante d'article n'a pas permis d'identifier d'article supplémentaire.

Les étapes de la recherche bibliographique sont résumées dans la figure 9.

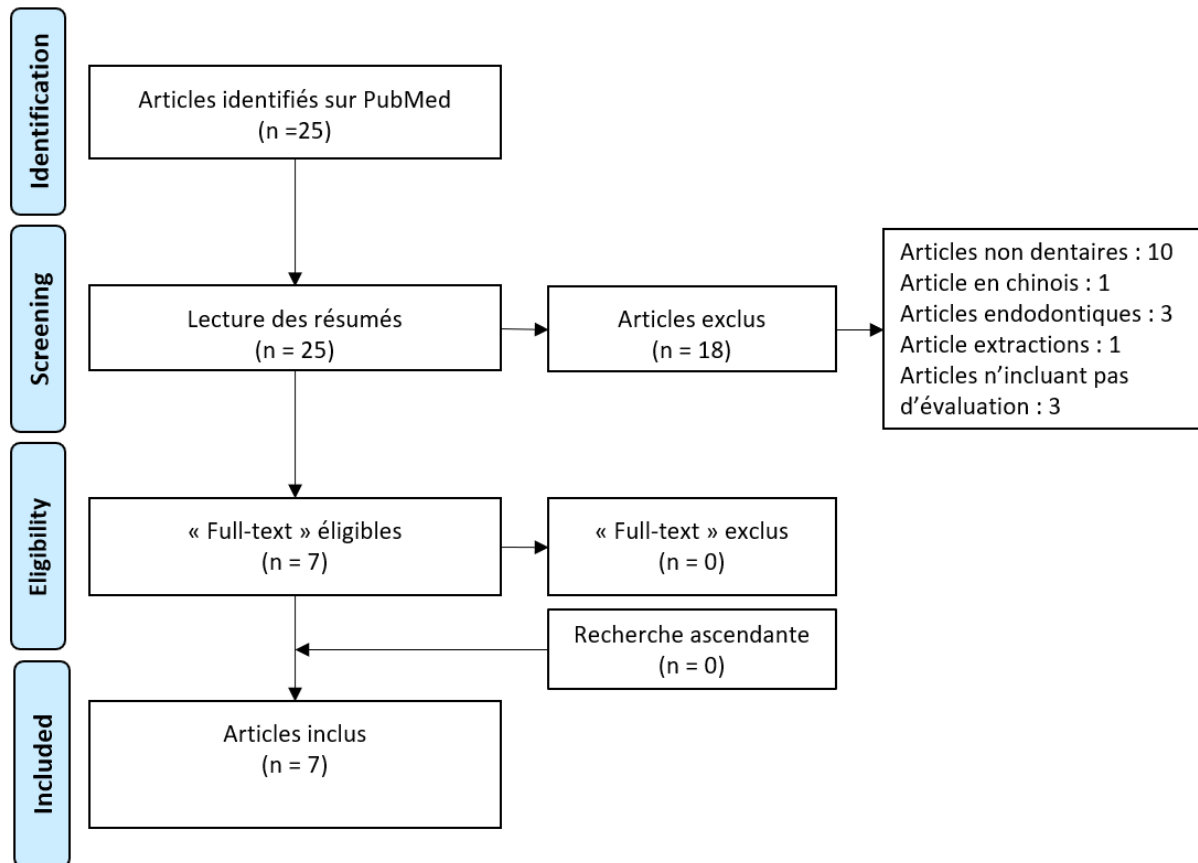


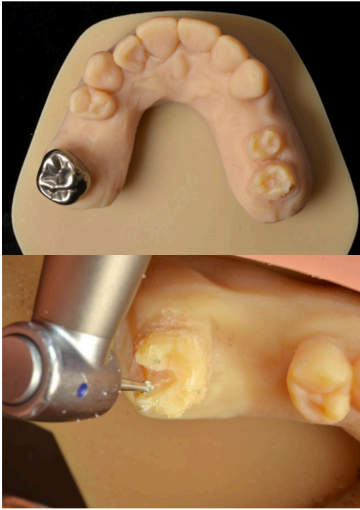

Figure 9 : Recherche bibliographique

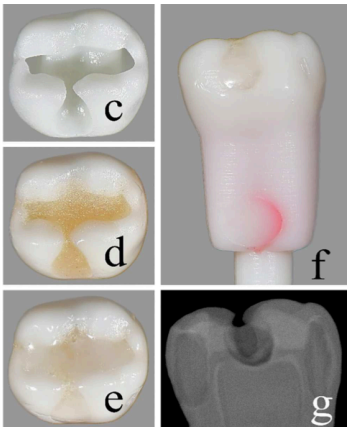
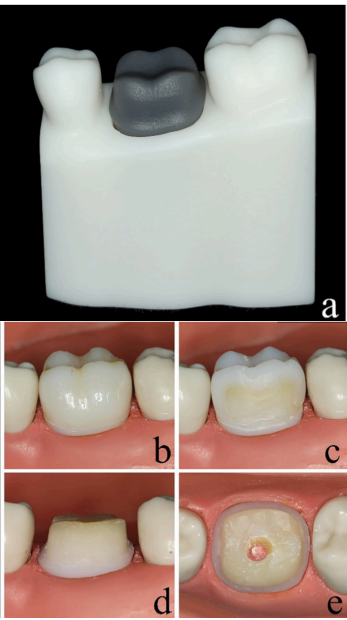
3.3. Résultats

Au terme de la recherche bibliographique, sept articles publiés entre 2016 et 2021 ont été retenus (tableau 1). La majorité des articles proposent des modèles pédagogiques à destination des travaux pratiques d'Odontologie Prothétique (n=5). Dans les études sélectionnées, l'évaluation qualitative des modèles imprimés utilisait des questions fermées auxquelles il fallait répondre par une échelle numérique et des questions libres (tableau 2).

Les questions ont pu être classées en 7 grandes catégories. La première concerne des données personnelles telles que l'âge et le sexe des participants. La seconde catégorie de questions visait à comparer les dents imprimées avec des dents naturelles ou avec les dents du modèle standard. En effet, parmi les questions posées, on peut retenir les conditions d'examen réalistes, la différence de couleur et de dureté entre l'émail et la dentine, la situation et la simulation réaliste de la chambre pulpaire, et la simulation de la carie (consistance et proximité pulpaire entraînant un risque d'effraction pulpaire). Une troisième catégorie de questions portait sur les

caractéristiques anatomiques du modèle unitaire par impression 3D et une quatrième sur les caractéristiques anatomiques du modèle d'arcade complète par impression 3D. Il y avait ensuite une partie sur l'évaluation du résultat d'apprentissage avec la dent imprimée ainsi que des questions spécifiques à chaque étude en fonction de leurs objectifs spécifiques. Enfin, une dernière partie avec des questions ouvertes qui portaient sur les points à améliorer sur les modèles et les avantages des modèles imprimés dans l'apprentissage de la dentisterie.

1 ^{er} auteur & date	Discipline	Résumé	Illustration du modèle imprimé	Nombre de participants	Méthode d'évaluation
Kröger <i>et al.</i> , 2017 (11)	Prothèse et Restauratrice	<p>3 modèles dentaires d'arcade complète imprimés par PolyJet® :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Modèle prothétique pour la réalisation de facettes -Modèle conservateur pour le collage dentaire -Modèle interdisciplinaire présentant des dents cariées et des couronnes inadaptées : c'est ce modèle qui a été évalué : dépose d'une couronne, excavation carieuse, obturation, préparation coronaire. 		22 étudiants de 4 ^{ième} année	Questionnaire : Évaluation échelle numérique (1 à 10)
Marty <i>et al.</i> , 2019 (12)	Pédodontie	<p>Modèles dentaires imprimés par DLP (Digital Light Processing) via l'imprimante Solflex 350 3D® : les modèles ont été imprimés avec des lacunes pour simuler une carie juxta-pulpaire et une couche d'émail intacte pour simuler plus fidèlement la réalité clinique.</p> <p>Ces modèles ont été évalués en réalisant une pulpotomie et la préparation d'une couronne pédiatrique.</p>		34 étudiants de 5 ^{ième} année	Questionnaire : évaluation échelle numérique (1 à 10)

<p>Höhne <i>et al.</i>, 2019 (13)</p>	<p>Restauratrice</p>	<p>Modèles dentaires imprimés par SLA via une imprimante 3D Form2 : les modèles présentent une cavité de carie étendue, celle-ci a été obturée avec du Dentalon (Heraeus, Hanau, Allemagne) pour simuler le tissu carieux. L'évaluation a porté sur l'excavation de la carie, le coiffage direct de la pulpe, la reconstitution coronaire et la préparation de couronne.</p>	 <p>Figure showing six panels (c, d, e, f, g) illustrating dental models and restorations. Panels c, d, and e show cross-sections of teeth with cavities and restorations. Panels f and g show 3D models of teeth with restorations.</p>	<p>47 étudiants de 4^{ème} année</p>	<p>Questionnaire : Évaluation échelle numérique (1 à 5) + questions libres</p>
<p>Höhne <i>et al.</i>, 2019 (14)</p>	<p>Prothèse</p>	<p>2 modèles dentaires ont été réalisés via l'imprimante 3D Form2 (Formalabs) par SLA : - modèle de dent préparée en gris pour visualiser la préparation de la couronne - modèle présentant différentes résines pour l'émail et la dentine ainsi qu'une cavité pulpaire remplie d'Impregum Penta Duo Soft (3M Espe, Seefeld, Allemagne) L'évaluation a été faite sur la préparation de couronnes dentaires, les étudiants avaient la possibilité de s'auto-évaluer grâce aux modèles préparés et de réaliser une effraction pulpaire afin de se rendre compte de la proximité pulpaire après la préparation coronaire.</p>	 <p>Figure showing five panels (a, b, c, d, e) illustrating dental models and restorations. Panel a shows a 3D model of a tooth with a crown preparation. Panels b, c, d, and e show cross-sections of teeth with restorations and pulp chambers.</p>	<p>38 étudiants de 4^{ème} année et 30 chirurgiens-dentistes</p>	<p>Questionnaire : Évaluation échelle numérique (1 à 5) + Questions libres</p>

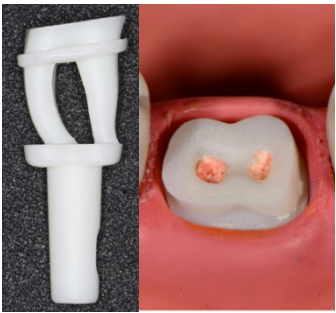
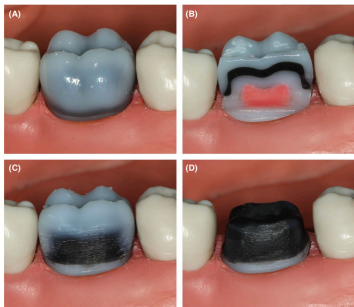

Höhne <i>et al.</i> , 2020 (16)	Prothèse	Modèles dentaires imprimés par SLA via une imprimante 3D Form2 : les modèles ont été conçus avec une préparation canalaire idéale puis remplis de gutta percha. L'évaluation portait sur la désobturation endodontique et la préparation d'un logement canalaire.		48 étudiants de 4 ^{ème} année	Questionnaire : Evaluation échelle numérique (1 à 6) + questions libres
Höhne <i>et al.</i> , 2020 (15)	Prothèse	Modèles dentaires imprimés par SLA via une imprimante 3D Form2 : les modèles dentaires présentent une préparation coronaire interne pour l'enseignement de la préparation corono-périphérique. Les étudiants ont dû réaliser des préparations corono-périphériques sur des modèles standards ainsi que sur les modèles imprimés.		38 étudiants de 4 ^{ème} année et 5 chirurgiens-dentistes	Questionnaire : Evaluation échelle numérique (1 à 6) + questions libres
Höhne <i>et al.</i> , 2021 (18)	Prothèse	Modèles dentaires imprimés par SLA via une imprimante 3D Form2 : ils présentent, en noir, la portion de couronne à éliminer pour aboutir à une préparation corono-périphérique idéale. Les étudiants ont dû réaliser des préparations corono-périphérique, ces préparations ont été scannées et la différence entre la première et la quatrième préparation a été mesurée.		35 étudiants de 2 ^{ème} année	Questionnaire : Evaluation échelle numérique (1 à 6) + questions libres

Tableau 1 : Résumé des articles inclus

Questions	Höhne <i>et al.</i> , 2021 (18)	Höhne <i>et al.</i> , 2020 (15)	Höhne <i>et al.</i> , 2020 (16)	Höhne <i>et al.</i> , 2019 (14)	Höhne <i>et al.</i> , 2019 (13)	Marty <i>et al.</i> , 2019 (12)	Kröger <i>et al.</i> , 2017 (11)
1. Données personnelles (âge, genre)							
2. Comparaison de la dent imprimée VS modèle standard / dent réelle							
L'exercice est approprié / plus approprié	Vs modèle	Vs modèle	Vs modèle		Vs modèle		
Les conditions d'examens sont adéquates / la simulation est réaliste	Vs modèle	Vs modèle	Vs modèle		Vs modèle	Le modèle provient d'une situation réelle	Le modèle provient d'une situation réelle
La dent imprimée est facile a utilisé / plus facile à utiliser	Vs modèle	Vs modèle	Vs modèle		Vs modèle		
Grande pertinence pratique		Vs dent réelle	Vs dent réelle		Vs modèle et dent réelle	L'idée de ce modèle est bonne	L'idée de ce modèle est bonne
La dent imprimée a une meilleure dureté		Vs dent réelle et modèle	Vs dent réelle et modèle	Vs dent réelle			
La dent imprimée a de bonnes propriétés haptiques (sensation de retour de force)		Vs dent réelle et modèle	Vs dent réelle et modèle		Vs modèle		
3. Caractéristiques anatomiques du modèle unitaire par impression 3D (différence de dureté et de couleur entre l'émail et la dentine, simulation de la pulpe, consistance de la carie...)							

4. Caractéristiques anatomiques du modèle d'arcade complète par impression 3D (masque gingival, simulation des points de contact)							
5. Évaluation du résultat d'apprentissage avec la dent imprimée							
Rétrospectivement, j'aurais aimé m'exercer avec les dents imprimées avant le traitement du patient.							
Le modèle imprimé me permet d'attendre plus facilement les objectifs du TP							
Mon apprentissage était meilleur avec le modèle standard ? une dent imprimée ? une vraie dent ?							
6. Questions libres							
7. Questions spécifiques							

Tableau 2 : Tableau récapitulant les questions posées lors de l'évaluation des modèles (les cases colorées correspondent aux études pour lesquelles les questions ont été posées)

3.4. Discussion

Cette revue de la littérature nous a permis d'énumérer les propositions de modèles pédagogiques réalisés par impression 3D qui ont été évalués qualitativement par des étudiants et/ou des praticiens diplômés. Nous avons retrouvé deux grands types de propositions : les modèles d'arcades complètes et les modèles de dents unitaires.

Les modèles d'arcades complètes ont le grand avantage de permettre de transposer directement des situations cliniques en modèles pédagogiques. Cependant, ces modèles ne présentent pas de points de contact entre les dents, ce qui est un problème pour la dentisterie restauratrice. En effet, ils ne permettent pas une mise en œuvre de la digue dentaire et des techniques de matricage car les dents sont soudées entre elles au niveau proximal. Cela a été évalué négativement par les étudiants ayant été confrontés à ce type de modèle. De plus, les modèles d'arcades complètes nécessitent une plus grande quantité de résine, ce qui demande un temps de fabrication beaucoup plus important que les modèles unitaires, sans compter le coût de la résine. Dans les études sélectionnées, ces modèles ne présentaient pas de masque gingival, mais cela n'a pas perturbé les étudiants (11,12).

Pour pallier ces inconvénients, des modèles unitaires qui s'insèrent dans des mâchoires issues du commerce de types Frasaco[®] ou KaVo[®] ont également été proposés. Ces modèles peuvent être utilisés pour des travaux pratiques en odontologie restauratrice (13), ainsi qu'en odontologie prothétique pour la réalisation de couronnes (14,15,18) et de tenons (16). Ces modèles unitaires offrent plus de flexibilité que les modèles d'arcade complète, mais demandent plus de travail pour simuler une situation clinique à l'échelle d'une arcade.

Dans toutes les études ayant intégré une chambre pulpaire à leurs modèles (12–14,18), les étudiants ont jugé que la simulation du coiffage pulpaire était bonne. Les chambres pulpaires ont été obturées avec de l'Impregum Penta DuoSoft (13,14,18) appliqué à l'aide d'un embout auto-mélangeur. Ce matériau permet une bonne simulation de la pulpe en termes de couleur et de consistance. Dans le cas de l'étude de Marty *et al.* (12), la chambre pulpaire n'a pas été obturée, ce qui est préjudiciable car en cas d'effraction pulpaire, les étudiants ne s'en rendaient pas forcément compte.

De nombreux points à améliorer reviennent régulièrement. C'est le cas de la dureté des résines utilisées. En effet, les modèles du commerce proposent des résines plus dures que celles des dents imprimées et les étudiants auraient aimé avoir des résines plus dures ou une meilleure distinction de dureté entre les couches d'émail et de dentine (13,14,16,18). Il existe aujourd'hui des résines plus dures que celles utilisées dans ces études. Il est également possible de baisser la vitesse des moteurs pour donner une impression de dent plus dure.

L'absence de différence de teinte entre la dent, la gencive, les caries (11), la couleur grise des modèles 3D de Marty *et al.* (12) et l'absence de différence de teinte entre la dentine et l'émail (13) ont perturbé les étudiants. Cependant, dans l'étude de Höhne *et al.* (14), les étudiants ont constaté un bon contraste de couleur entre l'émail et la dentine.

Une seule étude a utilisé des radiographies (réalisées via un logiciel de retouche photo) comme aide aux TP (13), et celles-ci ont été jugées satisfaisantes lors de cette étude. Il semble en effet intéressant de fournir des radiographies aux étudiants lors des TP, celles-ci permettent une approche plus clinique et donc de mieux préparer les étudiants.

D'autre part, certains modèles présentaient des défauts, comme les modèles dentaires 3D de l'étude de Höhne *et al.* de 2020 (16) qui avaient un défaut d'adaptation à la mâchoire ou ceux de son étude de 2021 (18), qui présentaient des problèmes de délamination, c'est-à-dire que lors de la préparation des dents, les parties émail et dentine se séparaient.

Dans toutes les études retenues, les étudiants ont jugé que les dents imprimées préparent mieux à la pratique clinique que les modèles de dents du commerce classiquement utilisés et souhaiteraient intégrer ces dents imprimées à leur formation préclinique. Aucun effet significatif de l'âge des étudiants n'a été détecté dans toutes les études. Seule l'étude de Höhne *et al.* de 2019 (14) a intégré des chirurgiens-dentistes expérimentés. Il aurait été plus pertinent de demander à des étudiants de 5^{ième} et 6^{ième} années de participer aux études, car ils ont davantage d'expérience clinique et pourraient donc avoir des avis plus objectifs dans la comparaison des modèles imprimés en 3D et des dents naturelles. De plus, il est intéressant d'avoir des avis de praticiens diplômés plus expérimentés. Enfin, il aurait été judicieux d'intégrer plus de participants dans les études afin de pouvoir séparer les résultats et voir s'il existe des différences en fonction de paramètres tels que le nombre d'année d'expérience des étudiants.

En plus de leurs intérêts pédagogiques, les modèles dentaires 3D présentent également un intérêt économique. Ils coûtent moins cher que les modèles du commerce, mais nécessitent cependant un temps de fabrication et d'assemblage très long. Dans une étude de Höhne *et al.* (15), ce sont les étudiants qui assemblent les modèles. En effet, l'assemblage pourrait être réalisé par les étudiants en début de TP, mais cela diminuerait le temps de pratique lors des séances. Il y aurait également la solution de rémunérer des étudiants qui viendraient en plus pour assembler les dents.

Toutes ces études nous ont permis de déterminer quels sont les points qui nécessitent le plus souvent des améliorations afin de réaliser des modèles dentaires les plus performants possibles.

4. Évaluation de nouveaux modèles dentaires réalisés par SLA

4.1. Introduction

Sur la base des travaux précédemment réalisés à l'École de Médecine Dentaire de Marseille et de la revue de la littérature précédemment exposée, nous allons développer et évaluer de nouveaux modèles dentaires réalisés par SLA.

4.2. Matériel et méthode

4.2.1. Conception et impression des modèles dentaires

4.2.1.1. Conception des modèles dentaires

Les dents du modèle AG-3 (Frasaco) ont été scannées une première fois à l'aide d'un scanner intra-oral Trios3 basic (3Shape).

Parallèlement, des dents extraites pour raisons orthodontiques ou parodontales ont été scannées. Ces scanners ont ensuite été traités via le logiciel 3DSlicer afin de supprimer l'émail des dents (figure 10, 11) et pouvoir voir quelle forme présentait leur dentine coronaire.

Les dents Frasco ont ensuite été préparées en suivant au mieux les indications obtenues pour supprimer les zones amélaire tout en évitant la formation de contre-dépouilles (figure 12). Une fois les dents préparées, elles ont à nouveau été scannées avec le scanner intra-oral Trios3 Basic.

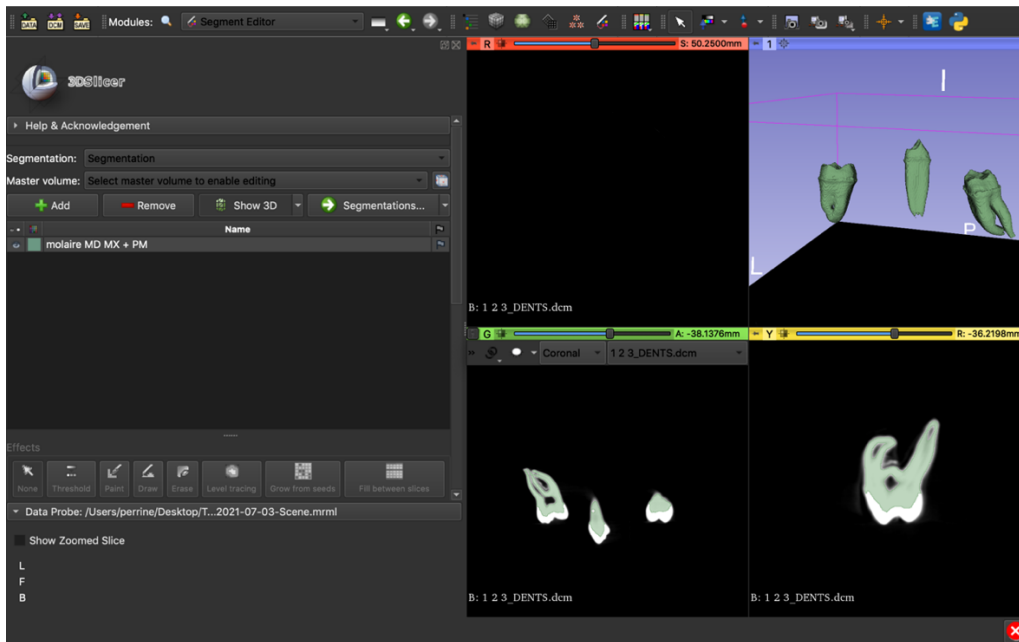


Figure 10 : Captures d'écran du logiciel 3DSlicer après avoir supprimé l'émail des dents 36, 35, 16.

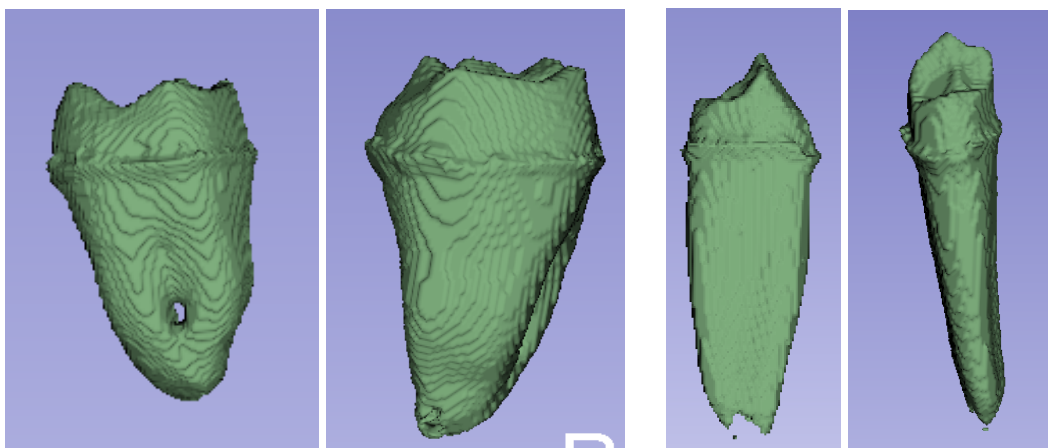


Figure 11 : Capture d'écran de 36 et 35 après suppression de l'émail



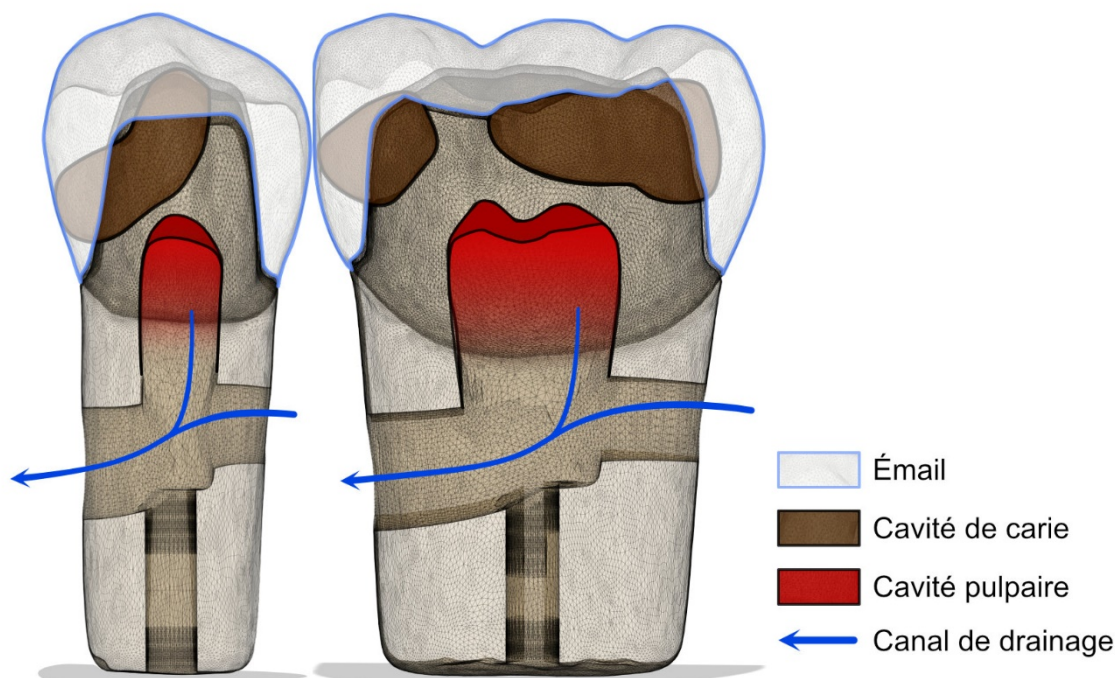
Figure 12 : Photographies des dents Frasaco préparées à partir des images du logiciel Slicer

Les fichiers résultants au format 3OXZ ont été convertis au format STL afin de les importer dans le logiciel de modélisation Meshmixer (Autodesk). Ce logiciel nous a permis de réaliser les étapes suivantes :

1. Suppression du support de numérisation
2. Modélisation d'une lacune pour simuler la chambre pulpaire
3. Création d'un puit de vis
4. Modélisation d'une cheminée de drainage pour évacuer la résine non polymérisée
5. Modélisation des lacunes afin de simuler les lésions carieuses

La coque d'émail a été réalisée sur ce même logiciel par une opération de soustraction du fichier de la dent préparée à celui de la dent intacte.

La figure 13 présente les modèles avec les améliorations réalisées.



Une fois les fichiers modifiés (figure 14), les modèles, sous la forme de quatre fichiers STL, sont prêts à être imprimés.

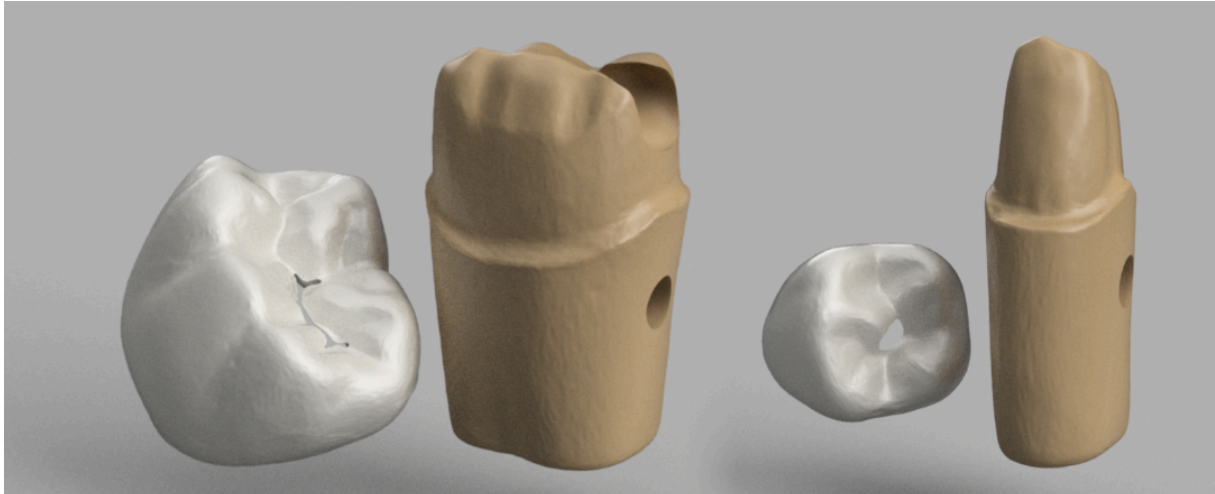


Figure 14 : Rendus 3D des modèles de dents améliorés

4.2.1.2. Impression des modèles dentaires

L'imprimante Form3 ne pouvant imprimer qu'une résine à la fois, nous avons réalisé deux impressions différentes pour les parties émail et dentine.

La partie dentine a été imprimée avec la résine Color Base du Color Kit de chez Formlab et la partie émail avec la White résine de chez Formlab.

Les modèles sont ensuite détachés du plateau puis trempés dans de l'alcool isopropylique pendant 2 minutes. Ils ont ensuite été placés dans un bac à ultrasons contenant le même alcool pendant 15 minutes. Après 15 minutes, nous avons détaché les tiges supports des modèles puis ces derniers ont été placés dans un four à polymériser pendant 10 minutes à 40 degrés Celsius (figure 15).

Les modèles sont ensuite prêts à être assemblés. (Figure 16)

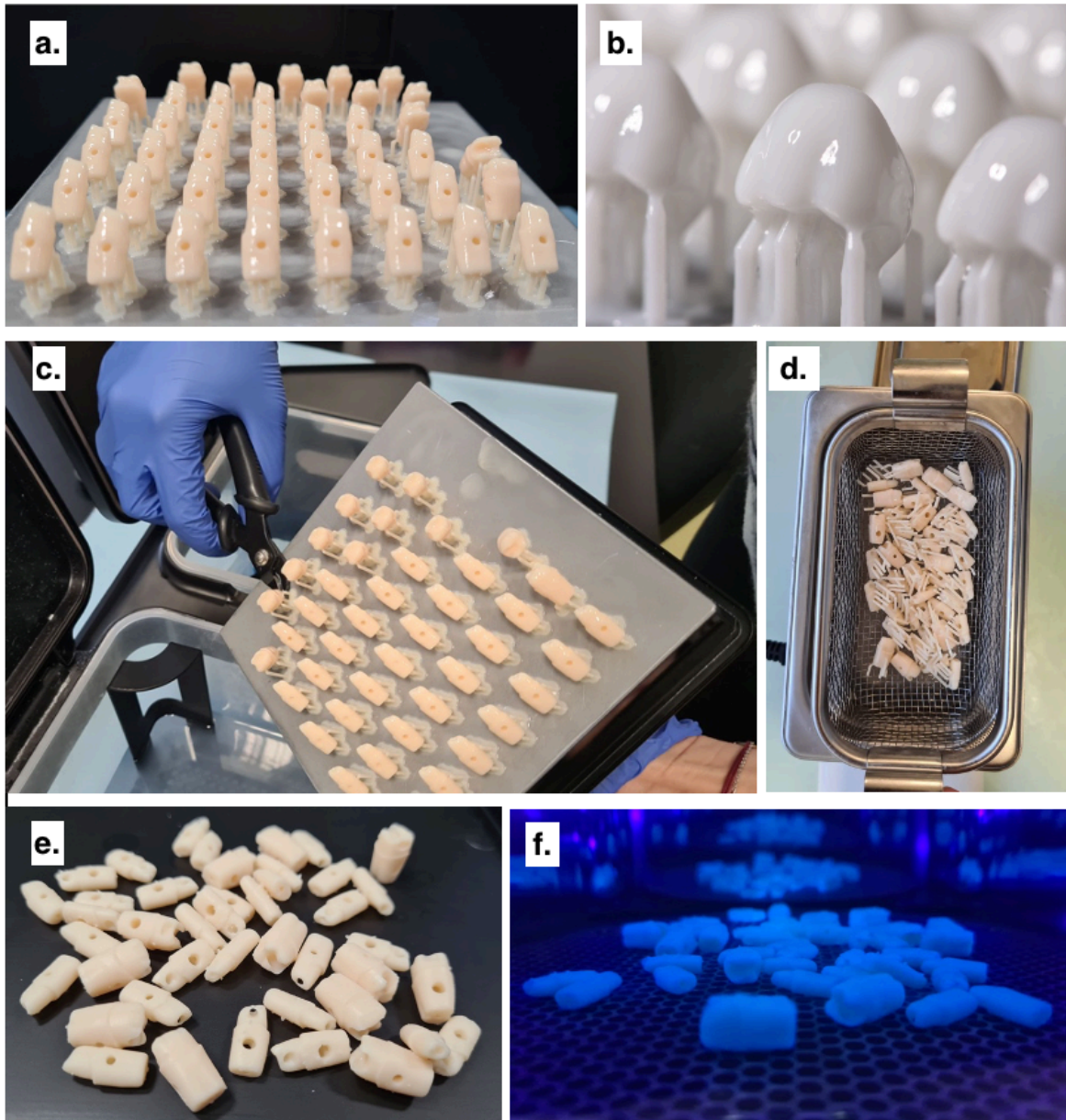


Figure 15 : étapes de préparation des modèles après impression (a-b : modèles imprimés sur le support d'impression ; c : découpe des tiges support ; d : mise en place pendant 15 minutes dans un bac à ultrasons avec de l'alcool isopropylique ; e : modèles séparés des tiges support ; f : 10 minutes à 40 degrés Celsius dans le four à polymériser)

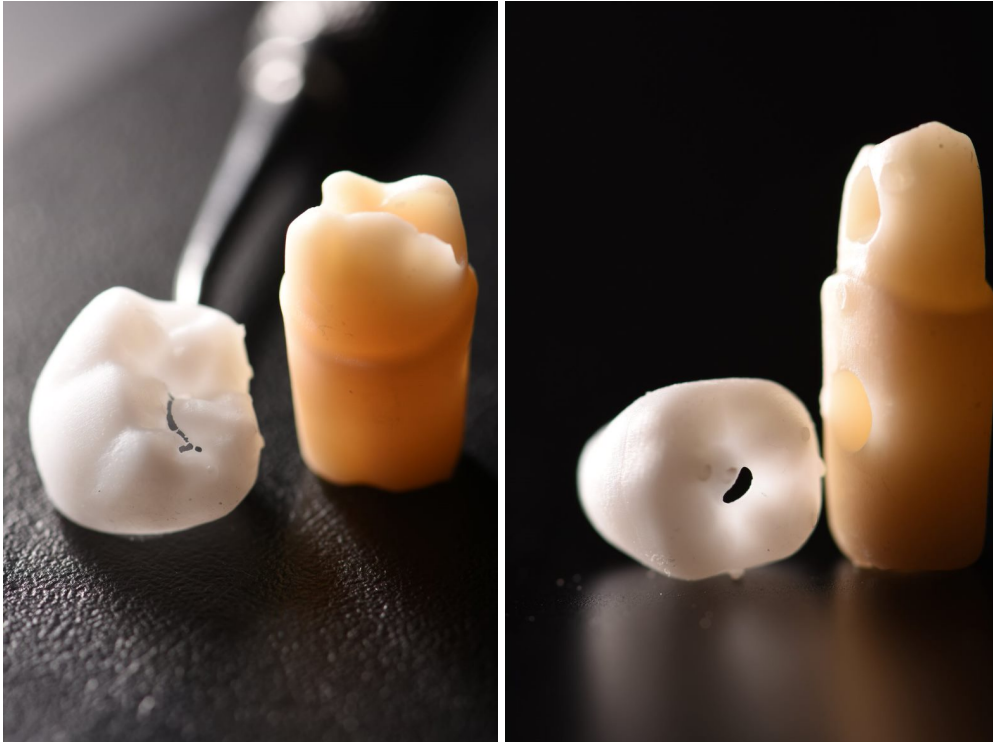


Figure 16 : photographies deux parties imprimées avant assemblage

4.2.1.3. Assemblage des modèles imprimés

Une fois les modèles imprimés et traités, les dents ont été assemblés à la main. Du Clip Flow (Voco) a été mélangé à un mélange de pigments du Color Kit (Formlab). Le mélange de pigments a été réalisé de manière à obtenir la teinte Walnut (figure 17) et une goutte de mélange a été intégrée à 1,8g de Clip Flow afin de simuler la carie. C'est ce Clip Flow modifié qui a servi à remplir les lacunes créées pour simuler des lésions carieuses (figure 18).

Les parties dentine et émail ont ensuite été assemblées avec du Core-X® flow (Dentsply Sirona) qui est une résine composite duale et qui permet un assemblage facile et rapide.

Une fois assemblés, ces modèles ont été placés dans le four à polymériser pendant 30 minutes à 60°C afin de post-polymériser les modèles et faire polymériser le Clip Flow.

Les cavités pulpaire ont été obturées avec de l'Impregum Penta DuoSoft light (3M Espe). Le matériau a été appliqué à l'aide d'un embout auto-mélangeur par les cheminées de drainage. Ce matériau permet de simuler la pulpe en termes de couleur et de consistance (13,14) (figure 19). Une fois l'assemblage des modèles terminé, ces derniers sont vissés sur les mâchoires du commerce pour l'évaluation (figure 20).

Walnut

PRODUIT FORM X

RGB

155, 106, 94

HEX

#9B6A5E



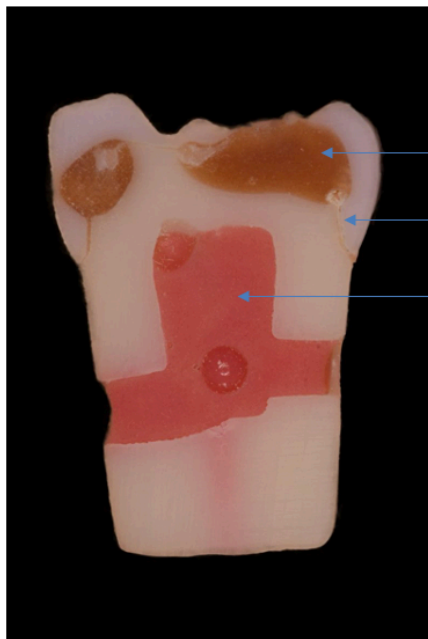
FORMULE DES PIGMENTS

CYAN	0ml	NOIR	5ml
MAGENTA	30ml	BLANC	15ml
JAUNE	50ml		

Figure 17 : teinte Walnut choisie pour la carie



Figure 18 : mise en place du Clip Flow coloré dans le modèle imprimé



Flip Flow (Voco) coloré avec de la résine Color Kit pour simuler la carie

Core-X® flow (Dentsply Sirona)

Impregum Penta DuoSoft light (3M Espe) pour simuler la pulpe

Figure 19 : coupe verticale du modèle imprimé après assemblage



Figure 20 : modèles imprimés vissés sur les mâchoires du commerce pour l'évaluation

4.2.2. Evaluation des modèles imprimés

4.2.2.1. Recrutement des participants étudiants

Les modèles 3D ont été évalués par des étudiants de 4^{ième} et 6^{ième} année d'odontologie ayant déjà soigné au moins une lésion carieuse chez un patient. Les étudiants de 6^{ième} année ont deux ans d'expérience clinique et auront donc une meilleure perception des dents naturelles que les étudiants de 4^{ième} année qui débutent leur formation clinique.

Pour des questions de pratique et de disponibilité des étudiants, les modèles ont été testés directement au Pôle d'Odontologie de la Timone (AP-HM, Marseille, France) sur la base du volontariat.

4.2.2.2 Évaluation des modèles par les étudiants

L'évaluation des modèles a été réalisée via un questionnaire élaboré à partir des résultats de la revue de la littérature :

Questionnaire d'évaluation

1 – Quelle est votre année d'étude :

2 – Concernant les lésions carieuses sur 35 et 36, complétez le tableau suivant

	Lésion carieuse sur 35	Lésions carieuses sur 36	
		En mésial	En distal
ICDAS visuel			
ICDAS radiologique			
Sévérité de la lésion (Initiale, modérée, sévère)			
Option thérapeutique (abstention, non invasif, minimalement invasif)			

Pour les questions suivantes donnez votre degré d'accord avec une note de 1 à 5 avec :

1 - Tout à fait d'accord, 2 - D'accord, 3 - Ni d'accord, ni pas d'accord, 4 - Pas d'accord, 5 - Pas du tout d'accord

3 – Concernant la simulation de la carie...

- a- La texture du matériau simulant la carie est réaliste :
- b- La teinte du matériau simulant la carie est adéquate :
- c- Le modèle imprimé est adéquat pour réaliser une évaluation ICDAS (hors stade 1 et 2) :
- d- La simulation de la radiographie fournie est réaliste :
- e- La simulation de la radiographie fournie permet une bonne évaluation de l'ICDAS radiologique :

4– Le modèle de dent imprimé...

- a- A une dureté adéquate :
- b- A une différence de teinte entre l'émail et la dentine réaliste :
- c- A une différence de dureté entre l'émail et la dentine perceptible :
- d- Présente une bonne simulation de la carie :
- e- Est une option adéquate pour les TP de OC Restau. :

5- Évaluation du résultat d'apprentissage : mon résultat d'apprentissage personnel est meilleur avec la dent imprimée qu'avec la dent du modèle standard :

6 – Évaluation du processus d'apprentissage de la dent imprimée :

- a- Rétrospectivement, j'aurais aimé m'exercer sur ce modèle de dents imprimé avant de traiter un patient :
- b- A mon avis, la dent imprimée permet d'atteindre plus facilement les objectifs pédagogiques concernant l'éviction carieuse :

7 – Qu’est ce qui pourrait être amélioré sur les dents imprimées ? (texte libre)

8 - Quels sont les avantages selon vous à l’utilisation des dents imprimées dans l’enseignement dentaire ? (texte libre)

Afin de pouvoir tester les modèles imprimés, la consigne a été donnée de réaliser l’évaluation et l’éviction carieuse sur les dents 35 et 36.

Les moteurs ont été réglés à une vitesse 2500 tours/min, cette vitesse a été définie après plusieurs essais comme la vitesse avec laquelle le ressenti lors du fraisage est le plus proche de la réalité clinique.

Afin de permettre une évaluation globale du stade ICDAS, une simulation radiologique, réalisée via le logiciel Affinity Designer (Serif Europe), a été fournie aux participants (figure 21).

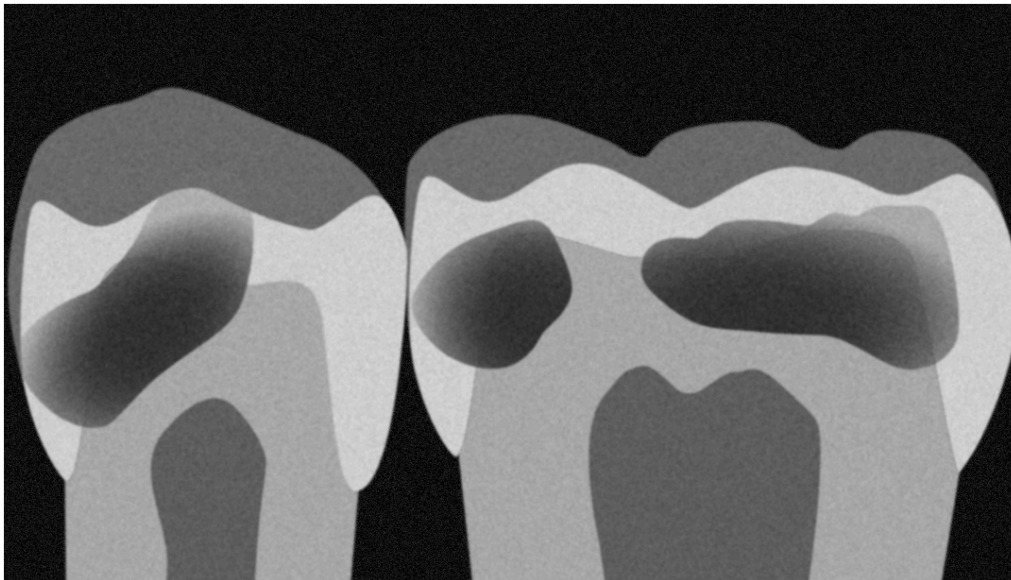


Figure 21 : simulation radiologique

4.2.2.3. Évaluation par des praticiens « experts »

Afin d’avoir une référence concernant l’évaluation ICDAS et les options thérapeutiques, cinq praticiens « experts » ont également évalué les modèles et la radiographie fournie.

L’évaluation a été réalisée en deux tours. Dans un premier temps, chaque praticien a réalisé son évaluation de manière indépendante, puis lors d’un deuxième tour, une proposition définitive a été définie de manière consensuelle.

A la fin de ce deuxième tour, le stade ICDAS combiné ainsi que l’option thérapeutique pour chaque dent a été relevé. Cette évaluation servira de référence pour évaluer les réponses des étudiants.

4.2.2.4. Analyse des données

Les résultats du questionnaire ont été transcrits et analysés dans le logiciel Excel[®] (Microsoft).

4.3. Résultats

31 étudiants ont souhaité participer dont 14 étudiants de 6^{ème} année.

Le degré d'accord moyen avec les items évalués avec l'échelle de Likert était de $1,56 \pm 0,83$.

4.3.1. Evaluation des lésions carieuses sur 35 et 36

La première partie du questionnaire était consacrée à l'évaluation des lésions carieuses selon la classification ICDAS. Les résultats sont présents dans la figure 22.

La moyenne des résultats de chaque item a été calculée. (Tableau 3)

Certains étudiants ont fait remarquer dans la section texte libre que l'évaluation ICDAS sur les modèles imprimés était difficile à réaliser.

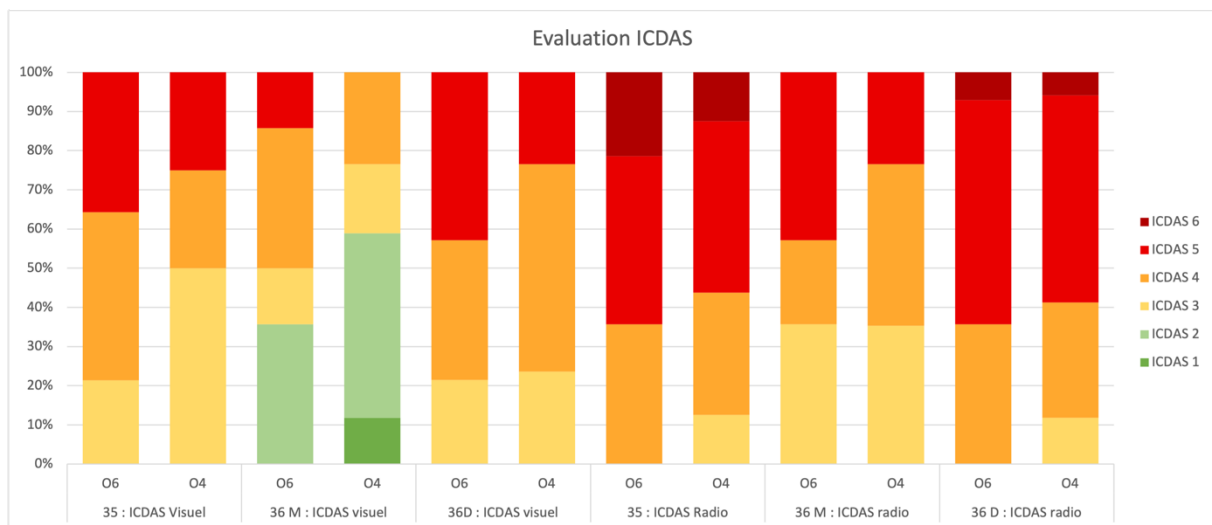


Figure 22 : diagramme regroupant les résultats obtenus de l'évaluation ICDAS par les étudiants

	ICDAS visuel			ICDAS radiologique		
	35	36M	36D	35	36M	36D
O6	4,1 ± 0,59	3,3 ± 1,30	4,2 ± 0,64	4,8 ± 0,59	4,1 ± 0,84	4,7 ± 0,37
O4	3,7 ± 0,73	2,5 ± 1,01	4 ± 0,5	4,6 ± 0,80	3,9 ± 0,61	4,5 ± 0,64
Moyenne	3,9 ± 0,69	2,9 ± 1,25	4,1 ± 0,56	4,7 ± 0,7	4 ± 0,70	4,6 ± 0,51

Tableau 3 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation ICDAS par les étudiants

Le résultat de l'évaluation des praticiens « experts » est affiché dans le tableau 4.

ICDAS visuel et radiologique combiné			Option thérapeutique		
35	36M	36D	35	36M	36D
Sévère	Modéré	Modéré	Soin opératoire	Soin opératoire	Soin opératoire

Tableau 4 : résultats de l'évaluation ICDAS par les praticiens « experts »

L'évaluation des étudiants correspond majoritairement à l'évaluation des praticiens « experts », sauf pour la lésion distale de 36 pour laquelle les étudiants évaluent majoritairement la lésion comme étant sévère (Figure 23).

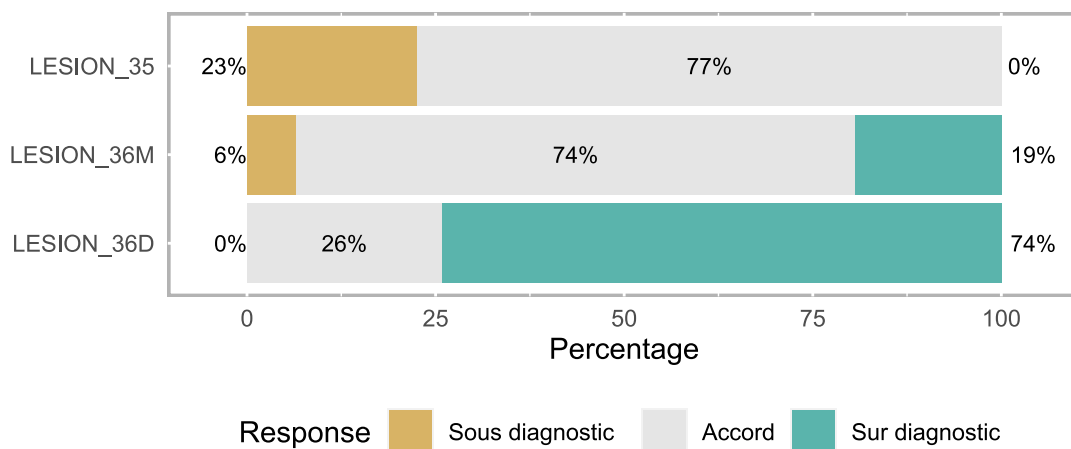


Figure 23 : degré d'accord entre les praticiens « experts » et les étudiants concernant les stades ICDAS combinés.

Concernant l'option thérapeutique, le degré d'accord entre les étudiants et les enseignants est bon (Figure 24).

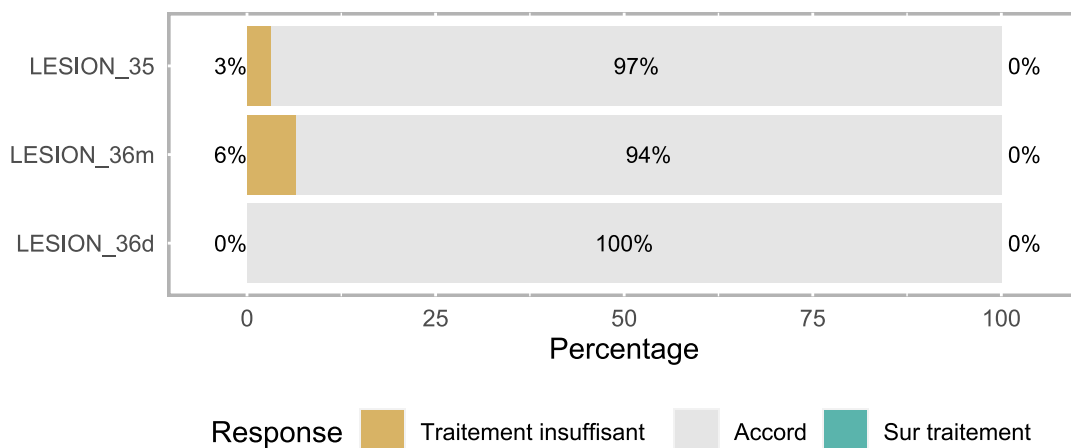


Figure 24 : degré d'accord entre les praticiens « experts » et les étudiants concernant l'option thérapeutique.

4.3.2. Évaluation de la simulation de la carie

Les résultats de l'évaluation de la simulation de la carie sont présents dans la figure 25 et le tableau 5. La simulation de la carie a été évaluée comme très bonne avec une moyenne de $1,5 \pm 0,49$.

Les étudiants ont relevé dans les questions libres que la teinte de la carie était trop claire, qu'elle n'était pas assez visible par transparence sous l'émail, et certains l'ont jugé trop molle. Cependant, d'autres étudiants ont trouvé que la simulation de la carie était très réaliste.

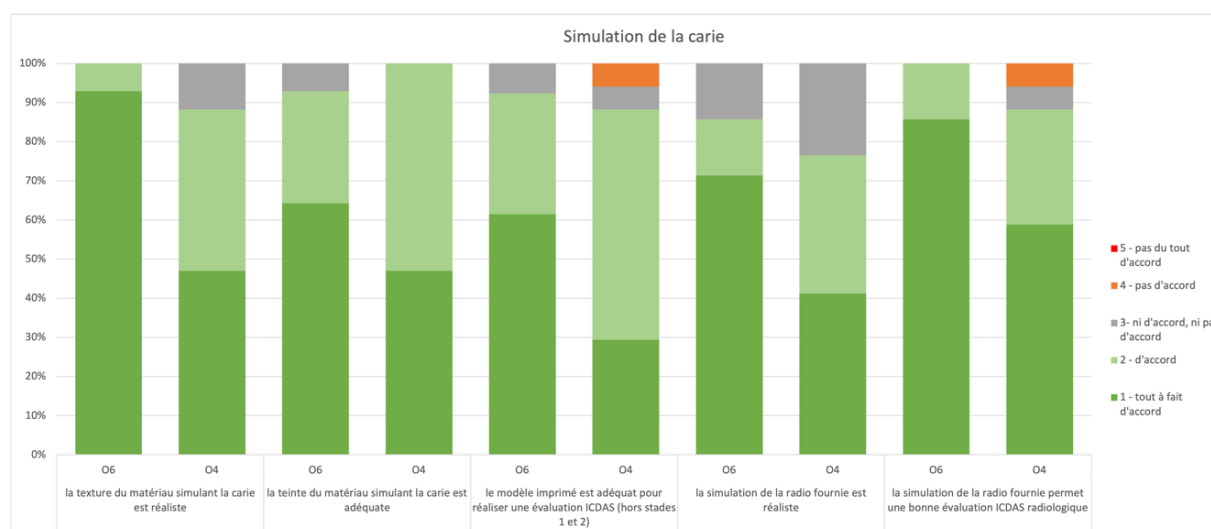


Figure 25 : diagramme regroupant les résultats de la simulation de la carie (la texture du matériau simulant la carie est réaliste, la teinte du matériau simulant la carie adéquate, le modèle imprimé est adéquat pour réaliser une évaluation ICDAS (hors stade 1 et 2), la simulation de la radiographie fournie est réaliste, la simulation de la radiographie fournie permet une bonne évaluation de l'ICDAS radiologique)

	La texture du matériau simulant la carie est réaliste	La teinte du matériau simulant la carie est adéquate	Le modèle imprimé est adéquat pour réaliser une évaluation ICDAS	La simulation de la radiographie fournie est réaliste	La simulation de la radiographie fournie permet une bonne évaluation ICDAS radiologique
O6	1,1 ± 0,07	1,4 ± 0,41	1,5 ± 0,44	1,4 ± 0,57	1,1 ± 0,13
O4	1,6 ± 0,49	1,5 ± 0,26	1,9 ± 0,65	1,8 ± 0,65	1,6 ± 0,76
Moyenne	1,4 ± 0,38	1,5 ± 0,32	1,7 ± 0,56	1,6 ± 0,64	1,4 0,51

Tableau 5 : moyennes des résultats obtenus lors de l'évaluation de la simulation de la carie.

4.3.3. Évaluation du modèle dentaire imprimé

Dans la partie suivante du questionnaire, le modèle dentaire imprimé a été noté avec une moyenne de $1,8 \pm 1,10$. Les résultats obtenus lors de cette évaluation sont présents dans la figure 26 et la tableau 6.

Les questions libres ont permis de noter que l'émail n'est pas assez dur et peut être abimé avec les fraises tungstènes.

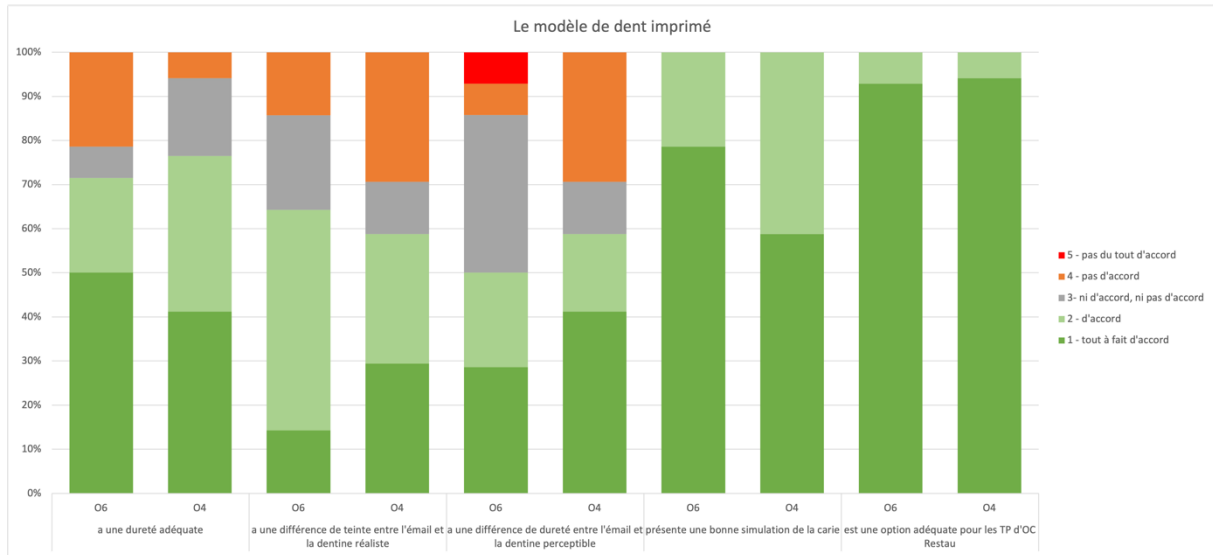


Figure 26 : diagramme regroupant les résultats d'évaluation du modèle imprimé (dureté adéquate, différence de teinte émail/dentine réaliste, différence de dureté émail/dentine perceptible, bonne simulation de la carie, option adéquate pour les TP d'OC Restau)

	A une dureté adéquate	A une différence de teinte entre l'émail et la dentine réaliste	A une différence de dureté entre l'émail et la dentine perceptible	Présente une bonne simulation de la carie	Est une option adéquate pour les TP d'OC Restau
O6	2 ± 1,54	2,4 ± 0,86	2,4 ± 1,49	1,2 ± 0,18	1,1 ± 0,07
O4	1,9 ± 0,86	2,4 ± 1,51	2,3 ± 1,72	1,4 ± 0,26	1,1 ± 0,06
Moyenne	1,9 ± 1,13	2,4 ± 1,18	2,4 ± 1,57	1,32 ± 0,23	1,1 ± 0,23

Tableau 6 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation des modèles imprimés

4.3.4. Évaluation du résultat d'apprentissage

L'évaluation du résultat de l'apprentissage a eu de très bonnes notes (figure 27), avec une moyenne de $1,03 \pm 0,03$. On peut également noter que la moyenne des étudiants de 6^{ième} année ($1 \pm 0,00$) et celle des 4^{ième} année ($1,1 \pm 0,06$) sont très proches.

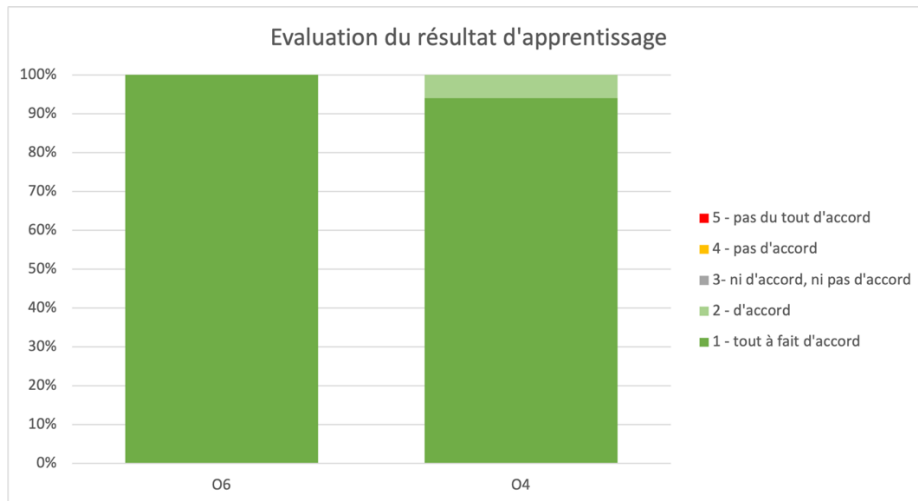


Figure 27 : évaluation du résultat d'apprentissage avec la dent imprimée

4.3.5. Évaluation du processus d'apprentissage de la dent imprimée

Dans la dernière partie du questionnaire, le processus d'apprentissage des élèves a été évalué (Figure 28) (tableau 7), une note de $1,03 \pm 0,03$ a été attribuée.

Les étudiants ont relevé beaucoup de points positifs. Ces modèles imprimés leur ont permis une meilleure compréhension des étapes cliniques et instrumentales, d'apprendre les sensations et les perceptions cliniques.

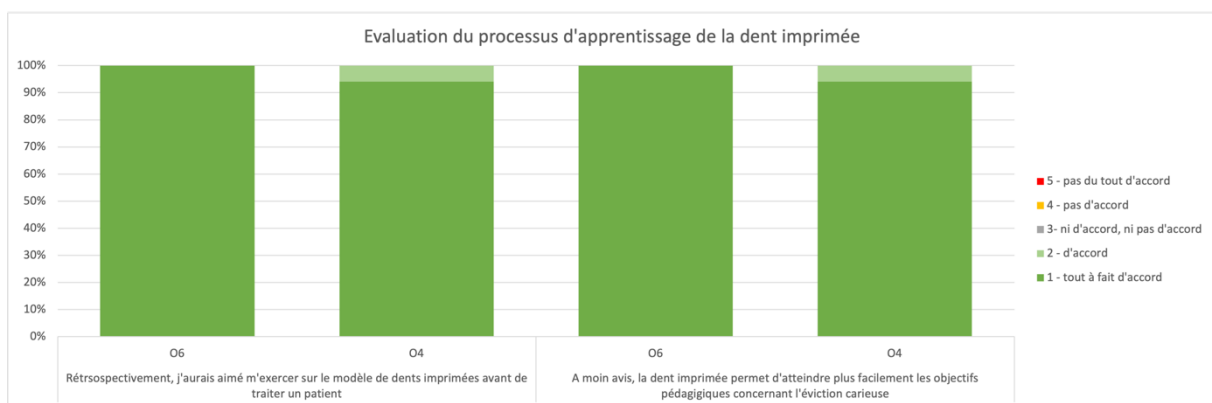


Figure 28 : résultats de l'évaluation du processus d'apprentissage de la dent imprimée (rétrospectivement j'aurais aimé m'exercer sur le modèle dents imprimées avant de traiter un patient ; à mon avis, la dent imprimée permet d'atteindre plus facilement les objectifs pédagogiques concernant l'éviction carieuse)

	Rétrospectivement, j'aurais aimé m'exercer sur le modèle de dents imprimées avant de traiter un patient	A mon avis, la dent imprimée permet d'atteindre plus facilement les objectifs pédagogiques concernant l'éviction carieuse
O6	1 ± 0,00	1 ± 0,00
O4	1,1 ± 0,06	1,1 ± 0,06
Moyenne	1 ± 0,03	1 ± 0,03

Tableau 7 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation du résultat d'apprentissage de la dent imprimée

4.4. Discussion

Selon les résultats de l'analyse du questionnaire, les modèles dentaires imprimés en 3D ont été jugés utiles pour l'apprentissage du traitement des lésions carieuses. Le modèle de dent a été évalué avec une note globale de $1,56 \pm 0,83$. Certains points restent à discuter.

En effet, les deux questions ayant reçues les moins bonnes notes concernent la différence de dureté entre la partie émail et la partie dentine ($2,4 \pm 1,57$) ainsi que la différence de teinte entre ces deux parties ($2,4 \pm 1,18$). En ce qui concerne la dureté, les deux résines utilisées avaient effectivement la même dureté, ce qui justifie la note reçue. Nous devions initialement utiliser la Rigid 10K Resin (Formlab) potentiellement plus dure que la résine du Color Kit. Cependant, nous ne l'avons malheureusement pas reçue dans les temps, et avons dû utiliser la White resin (Formlab) qui présente une dureté comparable à la résine du Color Kit utilisée pour la partie dentine. Certains étudiants (41,6%) ont toutefois pu ressentir une différence de dureté entre l'émail et la dentine. Cette différence perçue peut être justifiée par un effet psychologique dû à la différence de teinte, ou par leur enthousiasme à tester de nouveaux modèles. Elle peut également être expliquée par le fait que la couche externe a plus polymérisé du fait de la post-polymérisation, comme l'ont justifié Sinha *et al.* dans leur étude (7). Dans les questions libres, les étudiants ont relevé que la partie émail était trop molle et pouvait être abîmée avec les fraises en carbure de tungstène ; ils auraient souhaité avoir un matériau plus dur pour la dent imprimée. Pour ce qui est de la différence de teinte entre les deux parties, cette note peut être justifiée par le fait que les étudiants n'utilisent pas d'eau lors de la réalisation des préparations, ce qui crée beaucoup de poussière empêchant de voir la différence de teinte. Il serait donc préférable de teinter de manière plus importante la partie dentine des modèles afin de faciliter la différenciation des deux parties. Une autre solution serait d'aménager des salles de TP permettant l'utilisation systématique de spray, cette dernière solution serait plus coûteuse mais permettrait aux étudiants une meilleure préparation à la pratique clinique.

L'évaluation de la simulation de la carie a reçu de très bons résultats. On peut remarquer que les étudiants de 6^{ème} année attribuent de meilleures notes que les étudiants de 4^{ème} année, ceci pourrait se justifier par une meilleure expérience clinique. Le matériau simulant la carie, le Clip Flow modifié, a reçu d'excellents résultats par les étudiants de 6^{ème} année ($1,1 \pm 0,07$). Des étudiants ont fait remarquer dans les questions libres que la carie pourrait être plus colorée afin de mieux la différencier de la dentine et de mieux la visualiser par transparence sous l'émail. La présence de carie sur ces modèles ont fait l'objet de beaucoup de remarques. Elle a permis

aux étudiants de sentir la « sensation de chute » dans la carie et d’effacer les incompréhensions liés au fait de soigner des modèles de dents saines lors des TP. Cette présence de carie permet d’initier les étudiants à la notion d’éviction sélective et de conservation ou non de certains tissus comme l’émail non soutenu par exemple.

De plus, une partie des étudiants ont réalisé, volontairement ou non, des effractions pulpaire. Les étudiants ont été agréablement surpris par la présence de l’Impregum Penta DuoSoft pour simuler la pulpe, et ont jugé que ce matériau simulait bien la pulpe en termes de couleur et de dureté, bien qu’un étudiant ait fait remarquer que la pulpe ne saigne pas lors de l’effraction. Ces résultats sont en accord avec l’étude de Höhne *et al.* de 2019 (13). Lors des questions libres, ils ont jugé la profondeur pulpaire comme bonne.

Concernant l’évaluation ICDAS par les étudiants (figure 22), on peut voir une hétérogénéité des résultats. Bien que les variances ne soient pas très élevées, les étudiants hésitent souvent entre 3 réponses, voire 4 pour l’ICDAS visuel de la lésion en mésial de 36, qui présente une variance élevée (1,25). Cette hétérogénéité nous laisse penser que les étudiants manquent d’entraînement en termes d’évaluation ICDAS.

Cependant, cette hétérogénéité est compensée par l’effet « entonnoir » de la méthode d’évaluation ICDAS. Si on regarde les stades ICDAS combinés, le degré d’accord avec les enseignants est bon, en particulier pour la lésion sur 35 et en mésial de 36. Concernant les options thérapeutiques, trois étudiants préconisent un traitement non invasif malgré avoir identifié des lésions modérées ou sévères. On peut là aussi identifier un manque d’entraînement de la part de ces étudiants.

Dans les questions libres, certains étudiants ont noté qu’il était difficile d’évaluer l’ICDAS sur les modèles proposés, mais que ces modèles leur permettent un entraînement à cette évaluation, chose qu’ils ne pouvaient pas faire avec les modèles standards.

Enfin, tous les étudiants étaient parfaitement d’accord avec le fait que leurs résultats d’apprentissage personnels sont meilleurs avec la dent imprimée qu’avec la dent du modèle standard ($1,03 \pm 0,03$). De plus, tous les étudiants auraient souhaité s’exercer sur ces modèles avant de traiter les patients ($1,03 \pm 0,03$) et ont jugé que les objectifs pédagogiques concernant l’éviction carieuse sont plus facilement atteignables avec les modèles 3D que les modèles standards ($1,03 \pm 0,03$).

De plus, certains étudiants ont fait remarquer dans les questions libres la possibilité de varier les simulations.

Calculons maintenant le coût unitaire moyen de ce type de dent. Le tableau 8 nous présente la quantité de résine utilisée pour chaque dent ainsi que le temps d’impression.

	Nombre de pièce	Résine utilisée	Temps d’impression
35 “email”	x35	8.16ml	4h41 (4,68h)
36 “email”	x35	14.82ml	
35 “dentine”	x35	16.15ml	7h10 (7,17h)
36 “dentine”	x35	26.13ml	

Tableau 8 : quantité de résine utilisée et temps nécessaire pour l’impression des dents 35 et 36

Les bacs de résine doivent être changés tous les 5 litres de résine utilisée, soit environ toutes les 15 000 coques d'émail et 7 500 bases dentinaires. Le coût unitaire d'un bac est de 100€. Le litre de résine de classique White coûte 135€, et 0,8L de Resin Color Kit coûte 169€.

Imprimer 15 000 dents correspond à l'utilisation de 5L de White Resin, de 10L de Resin Color Kit et 3 bacs de résine. En définitive, l'impression de 15 000 dents revient à :

$$135 \times 5 + 169 \times 13 + 100 \times 3 = 3\,172\text{€}$$

Pour assembler 70 dents, 2 seringues de Clip Flow (2 x 1,8g à 26,78€ le lot) ont été utilisées, ainsi que 2 seringues de composite dual (2 x 4,75g à 75 € le lot).

Pour imprimer 15 000 dents, il faudra donc 430 seringues de Clip Flow et 430 seringues de composite dual, ce qui revient donc à :

$$(430/2) \times 26,78 + (430/2) \times 75 = 21\,882,7 \text{ €}$$

La réalisation de 15 000 dents coûte donc 25 054,70 € de consommable.

Pour la mise à l'échelle, il serait possible d'utiliser une colle duale moins onéreuse. En effet pour cette étude nous avons utilisé des échantillons gratuits de Core X Flow que nous avons directement à disposition. Le recours à des colles industrielles à base d'époxy ou de méthacrylate serait bien sur plus avantageux avec des tarifs avoisinant les 1€ par gramme. 2038g de colle sont nécessaire pour l'assemblage des 15 000 dents, ce qui reviendrait à 2038€ de colle industrielle. Le coût est donc nettement moins élevé qu'avec la colle utilisée précédemment (16 125€).

Le coût global de consommable pour la réalisation de 15 000 dents passerait donc à **10 967,70€**.

Le temps de manutention correspond au temps de traitement des pièces additionné au temps d'assemblage des modèles.

Le temps de traitement des pièces comprend :

- 30 minutes pour lancer l'impression
- 5 minutes de trempage à la sortie de l'impression
- 15 minutes de bac à ultrasons
- 10 minutes pour nettoyer le plateau d'impression pendant que les dents polymérisent dans le Form Cure
- 30 minutes pour ranger

Le temps de traitement revient donc à 90 minutes par impression. Pour imprimer 15 000 dents, à raison de 70 pièces par plateau, il faut réaliser 215 impressions de coques d'émail et 215 impressions bases dentinaires, soit 645 heures.

Le temps d'assemblage des modèles a été évalué à 1 minute 30 en moyenne par modèle, ce qui revient à 375 heures pour les 15 000 dents imprimées.

En considérant le SCMIC horaire brut (10€57/h), le coût de manutention pour 15 000 dents devrait avoisiner :

$$10,57 \times (645+375) = 10\,781,4\text{€}$$

La consommation électrique de la Form 3 d'une puissance de 220 Watts peut être estimée grâce à la formule suivante :

$$\text{Nombre d'heures d'utilisation} \times (\text{puissance en Watts}/1000)$$

Ce qui nous donne :

$$(4,68 + 7,17)/2 \times 430 \times 220/1000 = 560,5 \text{ kWh}$$

Le coût en électricité de la Form 3 est donc de **100,9€** (avec un tarif de 0,18 le kWh) pour l'impression de 15 000 dents.

Le Form cure est utilisé à deux reprises, une première fois pendant 10 minutes après chaque impression. Puis pendant 30 minutes après l'assemblage des modèles.

Sa puissance étant de 144W, sa consommation électrique peut donc être estimée à :

$$(215 \times 2 \times 10 + 215 \times 30) / 60 \times 144 / 1000 = 25,8 \text{ kWh}$$

Coût en électricité du Form Cure pour les 430 plateaux est donc de **4,64€**.

Le coût total est donc calculé de la manière suivante :

$$(\text{Coût du consommable} + \text{coût de la manutention} + \text{cout en électricité de la Form 3} + \text{coût en électricité du Form Cure}) / 15\ 000$$

Ce qui donne :

$$(10\ 967,7 + 10\ 781,4 + 100,9 + 4,64) / 15\ 000 = 1,46€$$

Le coût total ramené à une dent nous donne un prix moyen unitaire de 1,46€.

Il ne faut pas oublier le coût de l'investissement de la Form 3 de 3 299€ ainsi que du Form Cure à 699€.

Cependant, il serait possible de baisser les coûts de production. En effets, l'école pourrait créer un partenariat avec les fournisseurs afin d'obtenir les consommables à moindre coût.

A ce jour, les dents du modèle standard sont vendues 3€ aux étudiants et sont donc nettement plus chères que les modèles 3D que nous avons réalisés. Pour subvenir aux besoins annuels de l'Ecole de Médecine Dentaire de Marseille, uniquement pour les travaux pratiques d'Odontologie Restauratrice et prothétique, il faut imprimer 7520 modèles pédagogiques, ce qui reviendrait à 10 979,2 €.

Si ces modèles sont intégrés à grande échelle dans les travaux pratiques, il serait également intéressant de comparer le prix d'une imprimante pouvant imprimer plusieurs résines à la fois, ce qui permettrait d'économiser en temps de manutention.

Conclusion

Jusqu'à ce jour, les étudiants s'exerçaient lors des travaux pratiques sur des modèles standards uniformes. Les modèles pédagogiques réalisés par SLA possèdent un grand nombre d'intérêt mais présentent également des limites.

Tout d'abord, ces nouveaux modèles pédagogiques destinés aux travaux pratiques d'Odontologie Conservatrice sont en accord avec la classification actuelle des lésions carieuses, la classification ICDAS. En effet, ces modèles permettent aux étudiants une approche beaucoup plus clinique de l'éviction carieuse, avec des différences de teinte entre l'émail et la dentine, une simulation de la carie en termes de teinte et de texture, ce qui amène les étudiants à se poser des questions sur les notions de conservation tissulaire et de réalité biomécanique. Ces modèles permettront également aux étudiants de se former aux coiffages pulpaire directs en cas d'effraction pulpaire, et de sensibiliser les étudiants aux conséquences d'une éviction mal réalisée dans les zones juxta-pulpaire. De plus, tous les étudiants auront à traiter la même lésion et les notations seront plus équitables.

Enfin, ces modèles permettent également de former les étudiants au niveau de l'évaluation radiographique pré-opératoire en évaluant la taille de la lésion et sa proximité pulpaire.

Les étudiants se sont montrés très optimistes lors de l'évaluation des modèles et auraient souhaité s'entraîner sur ces modèles avant de soigner des patients en situation clinique.

Cependant, nos modèles ont montré des inconvénients. En effet, un des problèmes qui a soulevé le plus de remarques est le manque de dureté de l'émail, et donc le manque de différence de dureté entre l'émail et la dentine. Le problème de manque de dureté a été relevé a de nombreuses reprises dans la littérature (13,14,16,18). Le catalogue Formlab référence un grand nombre de résines différentes et les nouveautés sont nombreuses. Il ne fait nul doute que celles-ci sauront répondre à nos attentes en matière de dureté dans un futur proche.

De plus, contrairement à certains articles, et bien que nous ayons atteint nos objectifs, nous avons trouvé que la prise en main de la chaîne technologique n'est ni rapide, ni facile. En effet, c'est un travail assez complexe, pour lequel il est nécessaire de s'approprier les logiciels, de maîtriser les outils informatiques, et sur lequel il faut passer un nombre considérable d'heures si l'on veut réaliser l'acquisition, la modélisation ainsi que la production.

En conclusion, l'impression 3D de modèles pédagogiques permettra à l'Ecole de Médecine Dentaire de Marseille d'adapter les modèles aux besoins de chaque séance de travaux pratiques pour maximiser leur apport pédagogique dans les différentes matières enseignées.

Bibliographie

1. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 310 diseases and injuries, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet*. 2016;388(10053):1545-602.
2. Herndon JB, Tomar SL, Catalanotto FA, Rudner N, Huang I-C, Aravamudhan K. Measuring quality of dental: Caries prevention services for children. *J Am Dent Assoc*. 2015;146(8):581-91.
3. Richter M, Peter T, Rüttermann S, Sader R, Seifert LB. 3D printed versus commercial models in undergraduate conservative dentistry training. *Eur J Dent Educ*. 2021;00:1-9.
4. Pitts NB, Banerjee A, Mazevet ME, Goffin G, Martignon S. From « ICDAS » to « CariesCare International »: the 20-year journey building international consensus to take caries evidence into clinical practice. *Br Dent J*. 2021;231(12):769-74.
5. Martignon S, Pitts NB, Goffin G, Mazevet M, Douglas GVA, Newton JT, et al. CariesCare practice guide: consensus on evidence into practice. *Br Dent J*. 2019;227(5):353-62.
6. 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*. 2007;35(3):170-8.
7. Sinha A, Osnes C, Keeling AJ. Pilot study assessing 3D-printed teeth as a caries removal teaching tool. *Eur J Dent Educ*. 2021;00:1-8.
8. Nascimento MM, Behar-Horenstein LS, Feng X, Guzmán-Armstrong S, Fontana M. Exploring How U.S. Dental Schools Teach Removal of Carious Tissues During Cavity Preparations. *J Dent Educ*. 2017;81(1):5-13.
9. Banerjee A, Frencken JE, Schwendicke F, Innes NPT. Contemporary operative caries management: consensus recommendations on minimally invasive caries removal. *Br Dent J*. 2017;223(3):215-22.
10. Chevalier V, Le Fur Bonnabesse A, Duncan HF. Frightened of the pulp? A qualitative analysis of undergraduate student confidence and stress during the management of deep caries and the exposed pulp. *Int Endod J*. 2021;54(1):130-46.
11. Kröger E, Dekiff M, Dirksen D. 3D printed simulation models based on real patient situations for hands-on practice. *Eur J Dent Educ*. 2017;21(4):e119-25.
12. Marty M, Broutin A, Vaysse F, Vergnes J. 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.
13. Höhne C, Schmitter M. 3D Printed Teeth for the Preclinical Education of Dental Students. *J Dent Educ*. 2019;83(9):1100-6.
14. Höhne C, Schwarzbauer R, Schmitter M. 3D Printed Teeth with Enamel and Dentin Layer for Educating Dental Students in Crown Preparation. *J Dent Educ*. 2019;83(12):1457-63.
15. Höhne C, Schwarzbauer R, Schmitter M. Introduction of a new teaching concept for crown preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ*. 2020;24(3):526-34.
16. Höhne C, Dickhaut N, Schmitter M. Introduction of a new teaching concept for dentin post preparation with 3D printed teeth. *Eur J Dent Educ*. 2020;24(3):499-506.
17. Höhne C, Rammler T, Schmitter M. 3D Printed Teeth with Included Veneer Preparation Guide. *J Prosthodont*. 2021;30(1):51-6.

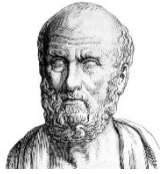
18. Höhne C, Jentzsch A, Schmitter M. The “Painting by Numbers Method” for education of students in crown preparation. *Eur J Dent Educ.* 2021;25(2):261-70.
19. Gattoni C. Développement de modèles dentaires anatomiques numériques pour l’impression 3D en Odontologie Concervatrice. Aix-Marseille Université; 2020.
20. Imprimantes 3D résine : fonctionnement et applications [Internet]. Makershop. [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: <https://www.makershop.fr/blog/fonctionnement-performance-application-imprimante-3d-resine/>
21. Formlabs. Color Kit [Internet]. 2021 [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: <https://formlabs.com/store/color-kit/>
22. Formlabs. 3D Printing Materials for Professionals [Internet]. [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: <https://formlabs.com/materials/standard/#color-kit>
23. Formlabs. Color Kit Catalogue [Internet]. 2021 [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: https://formlabs.com/checkout-media/catalog/product/600x600/r/s/rs-f2-pkg-cr_sq.png
24. Formlabs. Rigid 10K Resine Fiche technique [Internet]. 2020. Disponible sur: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-FR-0.pdf>
25. Formlabs. Rigid 10K Resin [Internet]. 2022 [cité 23 nov 2021]. Disponible sur: <https://formlabs.com/fr/materials/rigid/>
26. Shivakumar K, Prasad S, Chandu G. International Caries Detection and Assessment System: A new paradigm in detection of dental caries. *J Conserv Dent* 2009 12110-16.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des articles inclus.....	15
Tableau 2 : Tableau récapitulant les questions posées lors de l'évaluation des modèles (les cases colorées correspondent aux études pour lesquelles les questions ont été posées).....	17
Tableau 3 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation ICDAS par les étudiants	30
Tableau 4 : résultats de l'évaluation ICDAS par les praticiens « experts »	31
Tableau 5 : moyennes des résultats obtenus lors de l'évaluation de la simulation de la carie.	32
Tableau 6 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation des modèles imprimés.....	33
Tableau 7 : moyenne des résultats obtenus lors de l'évaluation du résultat d'apprentissage de la dent imprimée.....	35
Tableau 8 : quantité de résine utilisée et temps nécessaire pour l'impression des dents	35 et 36
.....	36

Liste des illustrations

Figure 1 : Photographies des premiers modèles obtenus par impression 3D.....	3
Figure 2 : Capture d'écran du modèle « brut » sur son support dans le logiciel Fusion360	4
Figure 3 : Modélisation de la chambre pulpaire et du puits de vis.....	5
Figure 4 : Fonctionnement de l'impression par SLA.....	5
Figure 5 : Schéma de la méthode de réalisation des modèles dentaires.....	7
Figure 6 : Color Kit (Formlabs) (23).....	8
Figure 7 : Capture d'écran de la couleur choisie pour la dentine ainsi que la formule des pigments qui y est associée	8
Figure 8 : Résine 10K Rigide (Formlabs) (25).....	9
Figure 9 : Recherche bibliographique	11
Figure 10 : Captures d'écran du logiciel 3DSlicer après avoir supprimé l'émail des dents 36, 35, 16.....	21
Figure 11 : Capture d'écran de 36 et 35 après suppression de l'émail.....	21
Figure 12 : Photographies des dents Frasaco préparées à partir des images du logiciel Slicer	21
Figure 13 : Schéma des modèles améliorés par transparence	22
Figure 14 : Rendus 3D des modèles de dents améliorés	23
Figure 15 : étapes de préparation des modèles après impression (a-b : modèles imprimés sur le support d'impression ; c : découpe des tiges support ; d : mise en place pendant 15 minutes dans un bac à ultrasons avec de l'alcool isopropylique ; e : modèles séparés des tiges support ; f : 10 minutes à 40 degrés Celsius dans le four à polymériser)	24
Figure 16 : photographies deux parties imprimées avant assemblage	25
Figure 17 : teinte Walnut choisie pour la carie	26
Figure 18 : mise en place du Clip Flow coloré dans le modèle imprimé.....	26
Figure 19 : coupe verticale du modèle imprimé après assemblage.....	26
Figure 20 : modèles imprimés vissés sur les mâchoires du commerce pour l'évaluation.....	27
Figure 21 : simulation radiologique	29
Figure 22 : diagramme regroupant les résultats obtenus de l'évaluation ICDAS par les étudiants	30
Figure 23 : degré d'accord entre les praticiens « experts » et les étudiants concernant les stades ICDAS combinés.....	31
Figure 24 : degré d'accord entre les praticiens « experts » et les étudiants concernant l'option thérapeutique.	31
Figure 25 : diagramme regroupant les résultats de la simulation de la carie (la texture du matériau simulant la carie est réaliste, la teinte du matériau simulant la carie adéquate, le modèle imprimé est adéquat pour réaliser une évaluation ICDAS (hors stade 1 et 2), la simulation de la radiographie fournie est réaliste, la simulation de la radiographie fournie permet une bonne évaluation de l'ICDAS radiologique).....	32
Figure 26 : diagramme regroupant les résultats d'évaluation du modèle imprimé (dureté adéquate, différence de teinte email/dentine réaliste, différence de dureté email/dentine perceptible, bonne simulation de la carie, option adéquate pour les TP d'OC Restau)	33
Figure 27 : évaluation du résultat d'apprentissage avec la dent imprimée	34
Figure 28 : résultats de l'évaluation du processus d'apprentissage de la dent imprimée (rétrospectivement j'aurais aimé m'exercer sur le modèle dents imprimées avant de traiter un patient ; à mon avis, la dent imprimée permet d'atteindre plus facilement les objectifs pédagogiques concernant l'éviction carieuse).....	34



SERMENT MEDICAL

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Que je sois déshonoré et méprisé de mes confrères si j'y manque.

ALLAERD Perrine – Amélioration et évaluation des modèles dentaires anatomiques réalisés par impression 3D en Odontologie Conservatrice

Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix –Marseille Université : 2022

Rubrique de classement : Odontologie Conservatrice

Résumé

Au cours de la formation préclinique, le développement des compétences théoriques et procédurales complexes sont acquises par les étudiants à l'aide de simulations réalisées au travers de travaux pratiques. Concernant l'odontologie restauratrice, les modèles de dents en plastique monoblocs traditionnellement utilisés ne permettent pas de soutenir la formation des étudiants à la prise en charge actuelle des lésions carieuses. Depuis quelques années, des modèles de dents artificielles imprimés en 3D commencent à voir le jour. Dans ce travail de thèse, nous chercherons à améliorer et à évaluer de nouveaux modèles de dents artificielles imprimés en 3D.

Après avoir présenté les modèles et avancées précédemment réalisés par le Dr Gattoni durant son travail de thèse d'exercice, nous présenterons les différents axes d'amélioration que nous pourrions réaliser. Dans la troisième partie, nous réaliserons une revue systématique de la littérature afin de recenser les propositions de modèles pédagogiques imprimés en 3D qui ont été évalués. Enfin, nous présenterons le développement de modèles de dents artificielles améliorés et les résultats de leur évaluation par des étudiants de l'École de Médecine Dentaire de Marseille.

Mots clés : Impression 3D, Modèles pédagogiques, Lésions carieuses, Stéréolithographie, ICDAS, Evaluation

ALLAERD Perrine – Improvement and evaluation of anatomical dental models made by 3D printing in conservative dentistry

Abstract

During the preclinical formation, the development of complex theoretical and procedural skills are acquired by the students with the help of simulations performed through hands-on courses. In restorative dentistry, the traditionally used one-piece plastic tooth models do not support the training of students in the current management of carious lesions. In recent years, 3D-printed artificial tooth models have begun to emerge. This thesis work will seek to improve and evaluate new 3D printed artificial tooth models.

After presenting the models and advances previously made by Dr. Gattoni during his thesis work, we will present the different areas of improvement that we could make. In the third part, we will carry out a systematic review of the literature to identify the proposals of 3D printed pedagogical models that have been evaluated. Finally, we will present the development of improved artificial teeth models and the results of their evaluation by students of the Marseille School of Dentistry.

Keywords: 3D Printing, Dental Teaching Models, Carious Lesion, Stereolithography, ICDAS, Evaluation