



HAL
open science

Comparaison des modèles dentaires imprimés en stéréolithographie et dépôt de fil

Antoine Boyer

► **To cite this version:**

Antoine Boyer. Comparaison des modèles dentaires imprimés en stéréolithographie et dépôt de fil. Sciences du Vivant [q-bio]. 2020. dumas-03137068

HAL Id: dumas-03137068

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03137068v1>

Submitted on 10 Feb 2021

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



AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 122.4

Code de la Propriété Intellectuelle. Articles L 335.2 - L 335.10



UNIVERSITÉ DE PARIS

UFR D'ODONTOLOGIE - MONTROUGE

Année 2020

N°M033

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 15 juin 2020

Par

Antoine BOYER

**Comparaison des modèles dentaires imprimés en
stéréolithographie et dépôt de fil**

Dirigée par le Docteur Lucien Dupagne

JURY

M. le Professeur Louis Maman

M. le Docteur Franck Decup

Mme le Docteur Aurélie Benoit à la Guillaume

M. le Docteur Lucien Dupagne

Mme le Docteur Aurélie Firon

Président

Assesseur

Assesseur

Assesseur

Invité



Tableau des enseignants de la Faculté

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MÂÎTRES DE CONFÉRENCES
1. DÉVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRÉVENTION	ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE	Mme DAVIT-BÉAL Mme DURSUN Mme VITAL	M. COURSON Mme JEGAT Mme SMAIL-FAUGERON Mme VANDERZWALM
	ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE		Mme BENAHMED M. DUNGLAS Mme KAMOUN Mme LE NORCY
	PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ ET ODONTOLOGIE LÉGALE	Mme FOLLIGUET M. PIRNAY	Mme GERMA M. TAVERNIER
2. CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE	PARODONTOLOGIE	Mme COLOMBIER Mme GOSSET	M. BIOSSE DUPLAN M. GUEZ
	CHIRURGIE ORALE	M. MAMAN Mme RADOI	Mme EJEIL M. GAULTIER M. HADIDA M. MOREAU M. NGUYEN Mme TAHI
	BIOLOGIE ORALE	Mme CHAUSSAIN M. GOGLY Mme SÉGUIER Mme POLIARD	M. ARRETO Mme BARDET (MCF) Mme CHARDIN M. FERRE M. LE MAY
3. RÉHABILITATION ORALE	DENTISTERIE RESTAURATRICE ENDODONTIE	Mme BOUKPESSI Mme CHEMLA	Mme BERÈS Mme BESNAULT M. BONTE Mme COLLIGNON M. DECUP Mme GAUCHER
	PROTHÈSES	Mme WULFMAN	M. CHEYLAN M. DAAS M. DOT M. EID Mme FOUILLOUX-PATEY Mme GORIN M. RENAULT M. RIGNON-BRET M. TRAMBA
	FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX	M. SALMON	M. ATTAL Mme BENBELAID Mme BENOÎT A LA GUILLAUME (MCF) M. BOUTER M. CHARRIER M. CHERRUAU M. FLEITER Mme FRON CHABOUIS Mme MANGIONE Mme TILOTTA
	PROFESSEURS ÉMÉRITES	M. BÉRENHOLC Mme BRION M. LASFARGUES M. LAUTROU M. LEVY	M. PELLAT M. PIERRISNARD M. SAFFAR Mme WOLIKOW
<i>Mise à jour le 06 septembre 2019</i>			

Remerciements

À M. le Professeur Louis Maman

Docteur en Chirurgie dentaire

Spécialiste qualifié en Chirurgie orale

Docteur en Sciences odontologiques

Habilité à Diriger les Recherches

Professeur des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Merci de me faire l'honneur de présider cette thèse d'exercice. Merci pour votre enseignement de chirurgie orale au sein du service d'Ivry, de votre bonne humeur et de votre accessibilité en tant que Doyen de la faculté de chirurgie dentaire.

À M. le Docteur Franck DECUP

Docteur en Chirurgie dentaire

Docteur de l'Université Paris Descartes

Maitre de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Merci d'avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Merci de vos enseignements et de vos conseils durant ces années en tant qu'étudiant. Merci de m'accorder votre confiance tous les lundis matin au sein de votre équipe d'attachés c'est un réel plaisir de venir travailler avec vous.

À Mme le Docteur Aurélie Benoit à la Guillaume

Docteur de l'Université Mines Paris Tech

Maitre de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Montrouge

Merci de prendre de votre temps et de me faire l'honneur de participer
à ce jury de thèse.

À M. le Docteur Lucien Dupagne

Docteur en Chirurgie dentaire

Assistant Hospitalo-Universitaire, UFR d'Odontologie - Montrouge

Merci d'avoir dirigé cette thèse et supporté ma prose. Merci pour ta disponibilité au sein du service d'Ivry et pour ton enseignement ainsi que ta gentillesse envers les étudiants. Merci de m'avoir accordé ta confiance pour être ton attaché. En espérant que cela continuera.

À Mme le Docteur Aurélie FIRON

Docteur en Chirurgie dentaire

Merci de m'avoir recruté. Merci d'avoir accepté de participer à ce jury de thèse. Merci de ne pas être comme tout le monde. C'est un plaisir de venir travailler avec toi au centre municipal de santé en espérant qu'il me reprenne après cette thèse !

Table des matières

INTRODUCTION	3
1 : GENERALITES	4
1.1 METHODES ADDITIVES	4
1.1.1. Définition	4
1.1.2. Les différentes technologies	4
1.2 LES METHODES ADDITIVES SUR LE MARCHE DENTAIRE	6
1.2.1 Champs d'applications au cabinet.....	7
1.2.2 Champs d'applications au laboratoire.....	7
1.3 LE DEPOT DE FIL FONDU (FDM)	8
1.3.1 Principe	8
1.3.2 Facteurs influençant le FDM.....	9
1.3.3 Les limites du FDM.....	9
1.4 LA STEREO LITHOGRAPHIE (SLA)	10
1.4.1 Principe	10
1.4.2 Les limites de SLA.....	11
1.5 CONSTRUCTION DU PROTOCOLE D'ÉVALUATION	12
1.5.1 Vocabulaire.....	12
1.5.2 l'approche objective	13
1.5.3 l'approche comparative.....	13
2 : MATERIELS ET METHODE	15
2.1. MATERIELS	15
2.1.1. Imprimantes	15
2.1.2. Caméra intra-orale Carestream CS3500.....	16
2.1.3. Logiciel d'analyse GOM inspect 2018.....	16
2.2 PROTOCOLES.....	17
2.2.1. Fabrication.....	17
2.2.2 Analyse des STL.....	19
2.2.3 Calculs des valeurs d'écart moyennes.....	20
3 : RESULTATS	22
3.1. GRAPHIQUES.....	22
3.1.1. Arcades complètes.....	22
3.1.2. Graphiques sectoriels 24-25-26.....	27

3.1.3. Valeurs d'écart moyen.....	30
3.1.4. Évaluation subjective visuelle.....	34
4 : DISCUSSION.....	41
4.1. VALEURS.....	41
4.2 LIMITES.....	42
CONCLUSION.....	43
BIBLIOGRAPHIE.....	44
TABLE DES FIGURES.....	45
TABLE DES TABLEAUX.....	46

Introduction

La Conception Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO) a pris une part importante dans la médecine bucco-dentaire. La grande majorité des laboratoires de prothèses sont aujourd'hui équipés d'outils de CFAO et de plus en plus des cabinets s'équipent de chaînes complètes (acquisition/fabrication) ou simplement d'acquisition. La Fabrication se divise en 2 catégories : Les méthodes soustractives et les méthodes additives. Si la méthode soustractive, en particulier l'usinage, est bien développée, nous assistons actuellement à l'essor des méthodes additives dans nos cabinets.

Les méthodes additives ont l'avantage de pouvoir réaliser des pièces de géométrie complexe ne pouvant être réalisées par simple usinage. De plus, L'amélioration des vitesses de fabrication, l'augmentation des propriétés mécaniques des matériaux, la diversification des types de matériaux utilisables et le faible coût de la méthode additive permet à celle-ci de venir s'incorporer dans nos laboratoires et cabinets.

La multitude de technologies existantes pour les méthodes additives et le peu de données disponibles sur la qualité des impressions nous a mené à nous interroger sur laquelle serait la plus adaptée et la plus exacte pour la fabrication de modèles dentaires au cabinet. Les 2 types de technologies les plus répandues dans le monde dentaire ont été sélectionnées pour les comparer en choisissant des machines équivalentes en termes de coûts et de caractéristiques techniques.

La première partie de cette thèse consiste à passer en revue succinctement les différents procédés existants en méthode additive, en s'attardant sur les 2 technologies retenues pour cette étude.

La seconde partie développe le protocole utilisé ainsi que le matériel retenu.

La troisième partie présente les résultats obtenus

La quatrième partie discute des résultats ainsi que des limites de l'étude.

1 : Généralités

1.1 Méthodes additives

Le nom « méthode additive » est le nom qui regroupe tous les procédés de fabrication par ajout de matière. Cette méthode est plus connue par le grand public sous le nom « d'impression 3D ».

1.1.1. Définition

L'impression 3D est définie comme un panel de technologies capables de transformer des données de modèles virtuels en modèles physiques. Le principe de base de fabrication consiste à l'ajout de matière par couche successives.

Le point de départ de fabrication est un modèle 3D virtuel réalisé à partir d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Le logiciel converti l'objet CAO en un fichier STL (extension .stl) qui est actuellement le standard des méthodes additives. Le fichier STL est ensuite découpé virtuellement par un logiciel en multiples tranches (slicer). Le fichier est ensuite transmis à la machine pour la fabrication de l'objet/pièce physique (fig.1).

Figure 1 : Schéma de la chaîne numérique en méthode additive



Source : Auteur, 2020.

1.1.2. Les différentes technologies

Il existe une multitude de technologies additives. Les principales technologies et les plus utilisées sont répertoriées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Principales technologies des méthodes additives

TECHNOLOGIE	MATERIAU UTILISE	PRINCIPE	ANNEE	INDUSTRIEL
Stéréolithographie (SLA)	Résine	Photopolymérisation sous l'action d'un laser ou lampe UV de la résine liquide	1986-1988	3D System (USA)
Dépôt de fil fondu (Fused Deposition Modeling)	ABS, PC	Dépôt de fil en fusion se solidifiant au contact de la section précédente	1988-1991	Stratasys (USA)
Lamination (LOM)	Papiers, Composites	Couches de matériaux thermocollants, découpés au laser s'empilant automatiquement	1985-1991	Cubic Technologies (USA)
Impression 3D (3DP)	Cires, thermoplastique, métal, céramiques, colle	Des gouttes de matériaux sont déposées par une buse, comparable à une jet d'encre 2D	1985-1997	Z-Corp (USA)
Frittage laser de poudre (SLS)	Métal, thermoplastique	Faisceau laser projeté sur la poudre qui agglomère celle-ci	1987-1992	EOS (Allemagne) 3D System (USA)
Faisceau d'électrons	Métal	Faisceau d'électrons projetés sur la poudre qui s'agglomère	1997-2005	Arcam (Suède)
Projection de poudre	Métal, céramique	Déplacement de la buse qui vient déposer la poudre qui est fusionné par le laser	1998-2003	Optomec (USA)

Source : Bonnard, « Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive », 2011.

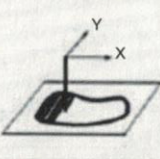
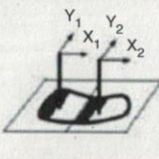
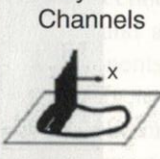

Les méthodes additives peuvent être classifiées de plusieurs manières :

- par leur technologie d'impression¹ : extrusion de matière (FDM, 3DP), Laser (SLS, SLA), etc...

¹ Kruth, Leu, et Nakagawa, « Progress in additive manufacturing and rapid prototyping ».

- par le type de matériau initial chargé dans la machine² : liquide, solide ou poudre
- à la fois en fonction du type de matériau initial et la manière dont est construite la couche³ (point par point ou surface par surface) (fig.2).

Figure 2 : Classification des procédés de fabrication additive selon Pham⁴

	1D Channel	2x1D Channels	Array of 1D Channels	2D Channel
Liquid Polymer	 SLA (3D Sys)	 Dual beam SLA (3D Sys)	 Objet	 Envisiontech MicroTEC
Discrete Particles	SLS (3D Sys), LST (EOS), LENS Phenix, SDM	LST (EOS)	3D Printing	DPS
Molten Mat.	FDM, Solidscape		ThermoJet	
Solid Sheets	Solido PLT (KIRA)			

Source : Gibson, Rosen et Stucker « Additive manufacturing technologies » 2015.

1.2 Les méthodes additives sur le marché dentaire

Les méthodes additives sont déjà présentes dans beaucoup de secteurs et d'industries car elles offrent des avantages en termes de personnalisation et de coûts. Sur le marché dentaire le taux de croissance annuel est de 17%⁵, ce qui semble s'expliquer par le développement constant des matériaux et des technologies 3D. Les méthodes additives sont donc adaptées pour l'utilisation en odontologie car elles permettent d'adapter des solutions pour chaque patient. Le secteur dentaire dans sa globalité utilise principalement les techniques de stéréolithographie (SLA), de frittage laser de poudre (SLS), de dépôt de fil fondu (FDM) et la projection de matière. Si la SLA et le SLS permettent aujourd'hui d'utiliser des matériaux pouvant être mis directement en bouche ce n'est pas le cas du FDM qui n'a actuellement pas de matériaux homologués pour. Le secteur dentaire peut-être scindé en 2 familles : les cabinets dentaires et les laboratoires de prothèses dentaires.

² Kruth, « Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques ».

³ Pham et Gault, « A comparison of rapid prototyping technologies ».

⁴ Pham et Gault.

⁵ Renard, « Impression 3D dentaire : pourquoi les technologies 3D révolutionnent-elles le secteur ? »

1.2.1 Champs d'applications au cabinet

Les techniques additives compatibles en termes de cout pour le cabinet sont le FDM et la SLA. Elles permettent, avec l'aide d'autres outils de dentisterie numérique, de fabriquer :

- des modèles dentaires (modèles d'études/wax up digitaux/modèles de travail)
- des guides chirurgicaux
- des gouttières (bruxisme/orthodontique)
- des PEI, bases d'occlusions

Le FDM ne pourra pas être utilisé pour les modèles dentaires car il n'a pas de matériau homologué pour une utilisation directement en bouche

1.2.2 Champs d'applications au laboratoire

Le cahier des charges pour les laboratoires de prothèses dentaires n'est pas le même que pour un cabinet et permet l'utilisation de machine plus développées et donc un champ d'application plus large :

- des modèles dentaires (modèles d'études/wax up digitaux/modèles de travail)
- des guides chirurgicaux
- des gouttières (de bruxisme/orthodontique)
- PEI, bases d'occlusions
- Prothèse amovible complète
- Châssis métalliques (SLS)
- Châssis en PEEK
- Chappes métalliques (SLS)
- Greffons osseux

Il est désormais possible de fabriquer des pièces en céramique en méthode additive, mais ce procédé ne satisfait pas encore la fabrication de restaurations avec des propriétés mécaniques acceptables et un cout raisonnable en chirurgie dentaire⁶.

⁶ Galante, Figueiredo-Pina, et Serro, « Additive manufacturing of ceramics for dental applications : a review ».

1.3 Le dépôt de fil fondu (FDM)

Le dépôt de fil fondu (FDM) est l'une des technologies additives la plus utilisée actuellement par le grand public et les industriels, dû à sa simplicité et son faible coût d'achat et de fonctionnement. Elle fait partie de la famille des technologies par extrusion de matériau.

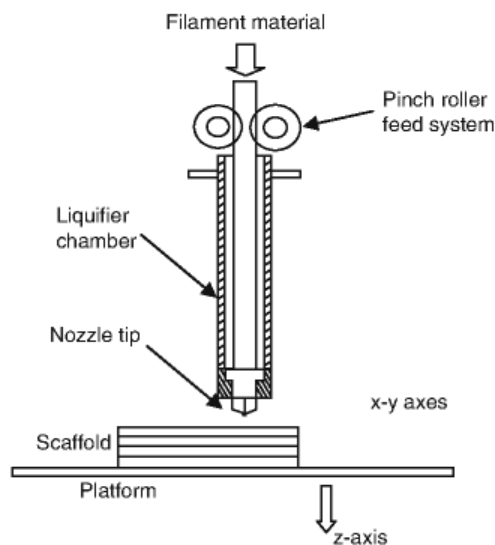
1.3.1 Principe

Le dépôt de fil fondu est une technique additive par extrusion de matière. Elle consiste à injecter à pression constante un matériau solide à travers une buse chauffée d'un diamètre choisi, ensuite liquéfié et déposé sur une plateforme en épaisseur de couche donnée, le matériau liquide chauffé durcira par refroidissement avec l'air ambiant.

Il y a plusieurs étapes importantes dans le FDM :

- le chargement du matériau : le fil est amené à pression constante par un système de rouages mécaniques
- La liquéfaction du matériau + extrusion : le fil est liquéfié dans la chambre et extrudé à travers la buse par la pression constante du chargement du fil.
- La solidification et la liaison du matériau avec la couche précédente : une fois extrudé, le matériau en se solidifiant et se liant doit toujours avoir la même épaisseur de couche et la même largeur.
- La création de supports annexes pendant la fabrication pour soutenir la pièce en construction

Figure 3: Schéma du principe de base des systèmes d'addition par extrusion



Source : Gibson, Rosen et Stucker « Additive manufacturing technologies » 2015.

1.3.2 Facteurs influençant le FDM

Il existe de multiples facteurs qui peuvent influencer de façon importante le résultat final de la pièce fabriquée^{7 8}.

- La pression de chargement : s'il y a un changement de pression de chargement, il y aura donc un changement de vitesse d'extrusion du matériau au niveau de la buse et donc une variation de l'épaisseur ou la largeur du dépôt de matériau sur le plateau.
- La température intrinsèque du matériau dans la chambre : la température du fil dans la chambre n'est pas tout à fait la même dans le matériau et se liquéfie donc différemment. Ce qui comme pour la pression de chargement va influencer sur la vitesse d'extrusion du matériau.
- Le diamètre de la buse d'extrusion : plus le diamètre est grand, plus la vitesse d'impression est rapide et moins précise est la qualité de la pièce finie
- La température de la pièce en fabrication : Les pièces aux géométries variables ne refroidissent pas aux mêmes vitesses sur les sections différentes, ce qui peut affecter la pièce en elle-même ou les systèmes de control de température.

1.3.3 Les limites du FDM

Actuellement les limites du FDM sont :

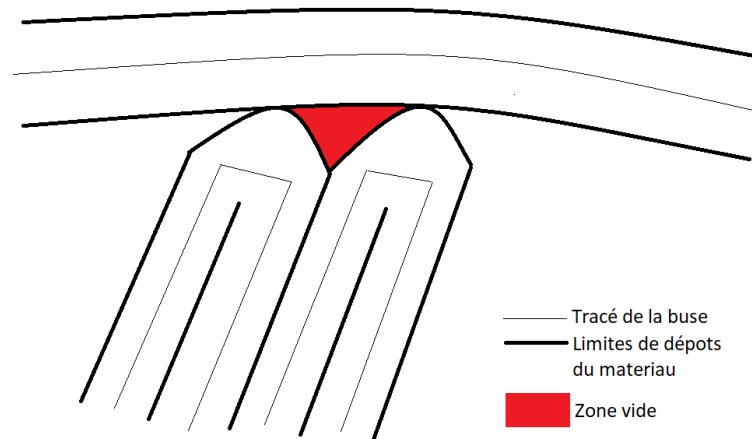
- La forme ronde de la buse d'extrusion. Rendant impossible la création d'angles pointus, et favorisant l'apparition de porosités (fig.3)
- La vitesse de fabrication qui peut être lente : actuellement le FDM est limité par la rapidité des micros-moteurs mécaniques, l'élasticité du matériau, et la vitesse de chargement du matériau.
- La qualité de l'objet final, qui dépend des paramètres ci-dessus

C'est pourquoi cette technologie est peu utilisé en dentaire

⁷ Gibson, Rosen, et Stucker, *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*.

⁸ Popescu et al., « Fdm process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens ».

Figure 4: Schéma de tracé d'une buse ronde en dépôt de fil mettant en évidence les zones de porosités



Source : Gibson, Rosen et Stucker « Additive manufacturing technologies » 2015.

1.4 La stéréolithographie (SLA)

La stéréolithographie est une technique additive qui a été développée à la fin des années 1980. Un peu moins répandue que le FDM elle était jusqu'à ces dernières années réservée aux industriels. Cette technologie fait partie de la famille des « vat polymerisation » (polymérisation en cuve).

1.4.1 Principe

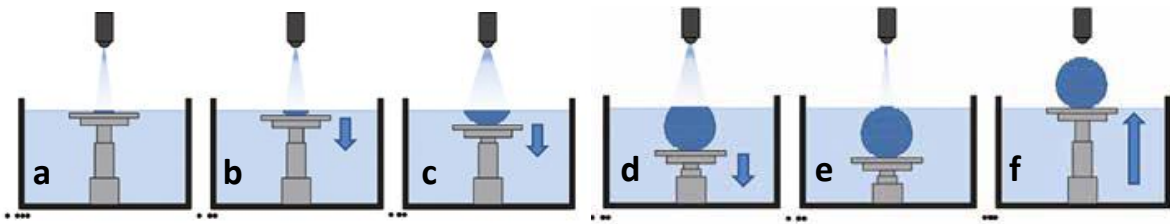
Le principe de base de la stéréolithographie consiste en l'utilisation de liquides ou résines photopolymérisables comme matériau primaire. Ce sont souvent des photopolymères réagissant à des longueurs d'ondes d'ultraviolet, mais il existe une multitude d'ondes utilisables (rayons-X, rayons gamma, électrons et des fois du domaine du visible.).

La machine peut être décomposée en 3 parties :

- La cuve de monomère
- La source d'irradiation
- Le support mobile

La première étape consiste en l'irradiation de la première couche de monomère sur le support mobile (fig.4.a). Ensuite le support va s'immerger de l'épaisseur de couche choisie dans les paramètres de la machine. Une nouvelle fois le monomère est irradié afin de photopolymériser une nouvelle couche et en la copolymérisant sur la couche précédente (fig.4.b). Le cycle est répété jusqu'à obtention de la pièce complète (fig.4.c d e f)

Figure 5 : Schéma du déroulement d'une impression en stéréolithographie

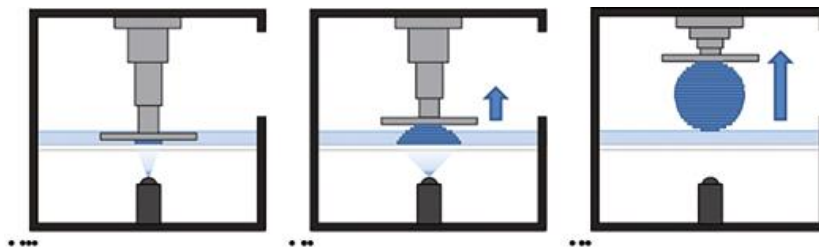


Source : Dupagne, Le Goff et Tapie « L'impression 3D : partie 3, La stéréolithographie », 2017.

Il existe une méthode alternative (fig.5) à celle-ci permettant de réduire la taille de la cuve, de rendre la machine plus compacte et d'éviter l'égouttage en fin de fabrication. La cuve de monomère est une fine couche de liquide. L'objet est fixé sur le support qui cette fois-ci s'éloigne de la cuve, et l'irradiation se fait à travers une plaque translucide. Ce système présente quand même 2 défauts :

- la pièce en construction peut se détacher de son support
- La couche photopolymérisé peut adhérer à la plaque translucide, endommager celle-ci et l'objet en fabrication.

Figure 6 : Schéma de la méthode alternative de stéréolithographie



Source : Dupagne, Le Goff et Tapie « L'impression 3D : partie 3, La stéréolithographie », 2017.

La SLA nécessite en fin de fabrication 2 étapes supplémentaires :

- Lavage dans un bain d'alcool pour nettoyer les résidus de monomère non photopolymérisé.
- Un passage dans une cuve à UV afin de terminer la photopolymérisation et de renforcer la pièce.

1.4.2 Les limites de SLA

Actuellement la SLA est limitée principalement par les caractéristiques de ses résines photopolymérisables. En effet la composition de ces résines est mixte. En dentaire les résines acrylates présentent un fort taux de retrait de polymérisation qui empêche donc la photopolymérisation en fine couche. Pour remédier à cela elles sont mélangées à de la résine époxy qui réduit le retrait de polymérisation mais réduit aussi les propriétés mécaniques de la pièce finale⁹.

⁹ Dupagne, Le Goff, et Tapie, « L'impression 3D : partie 3, La stéréolithographie ».

1.5 Construction du protocole d'évaluation

Pour évaluer les 2 machines, des protocoles d'évaluations vont devoir être mis en place pour permettre d'observer des différences de qualité/précision sur les modèles imprimés.

1.5.1 Vocabulaire

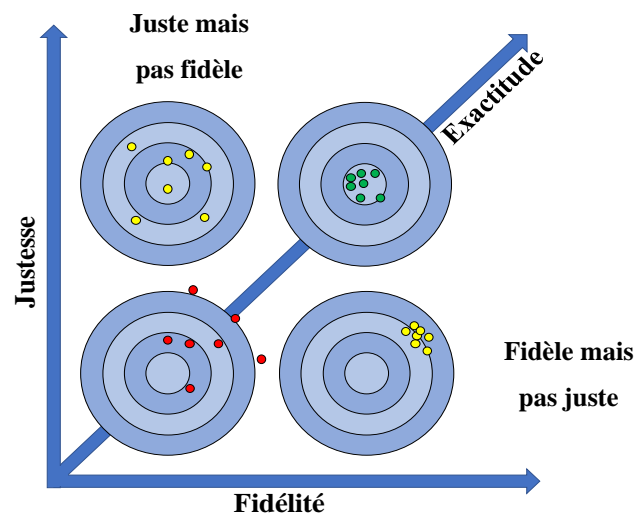
Le domaine de recherche dédié à la mesure est la métrologie. La métrologie définit ce qui est souvent injustement décrit sous le terme de « précision » comme 3 grandeurs distinctes : fidélité, justesse et exactitude¹⁰.

La fidélité est « l'étroitesse de l'accord entre les indications ou les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées ». La fidélité est souvent exprimée numériquement par l'écart type ou la variance.

La justesse est « l'étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et une valeur de référence ». La justesse peut être introduite comme l'écart moyen à une valeur de référence.

L'exactitude est « l'étroitesse de l'accord entre une valeur mesurée et une valeur vraie ». Elle peut être considérée comme une combinaison de justesse et de fidélité.

Figure 7 : Concept de la justesse, fidélité et exactitude.



Source : Dr Dupagne, 2020.

Les protocoles d'évaluation des outils numériques en dentaires reposent souvent sur le même principe. Un objet de référence est sélectionné, scanné et analysé afin d'évaluer la qualité du modèle

¹⁰ International organization for standardization, « Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results e part 1 : general principles and definitions (iso 5725e1:1994) ».

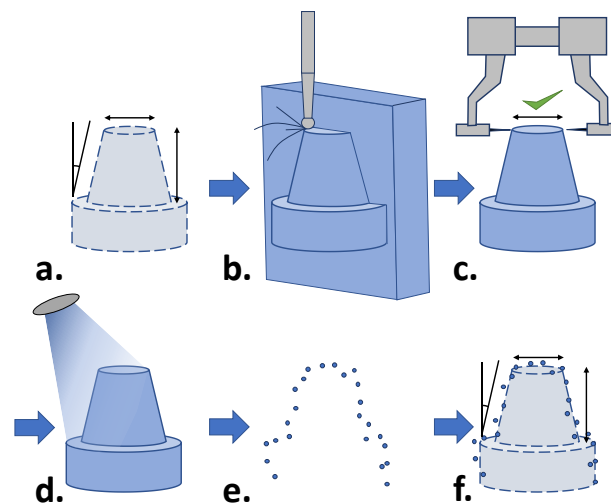
numérique obtenu. Toutefois en métrologie il existe 2 approches différentes pour l'obtention d'un modèle de référence : l'approche objective et l'approche comparative

1.5.2 l'approche objective

L'approche objective est le gold standard de la métrologie. Le modèle de référence initiale n'est pas physique, il est conceptualisé pour le protocole donné (fig.8.a). Il est ensuite fabriqué dans le matériau le plus stable aux côtes données (fig.8.b). Les dimensions de l'objet sont ensuite vérifiées avec des outils de mesure ayant la plus grande exactitude possible (fig.8.c). L'objet de référence peut ensuite être utilisé pour permettre l'évaluation de différents outils numériques (fig.8.d.e.f). Le problème de la méthode objective, c'est qu'elle ne fournit que des objets de référence avec des géométries simples ce qui n'est pas le cas pour des modèles dentaires.

L'approche objective permet d'obtenir des valeurs de justesse de mesure, de bruits de numérisation et d'exactitude.

Figure 8 : Schéma de la conceptualisation du modèle de référence en approche objective



Source : Dr Dupagne, 2020

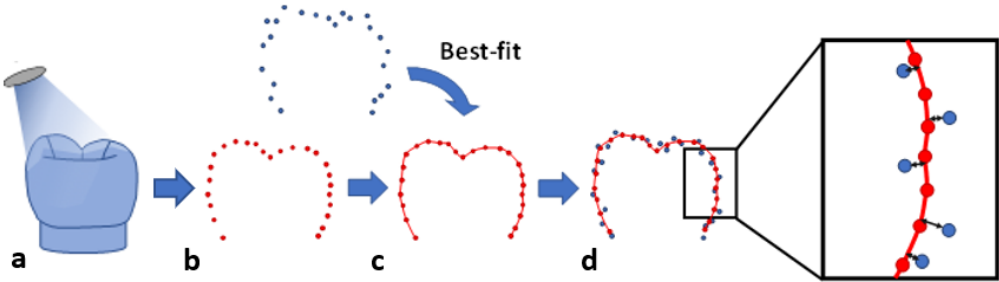
1.5.3 l'approche comparative

L'approche comparative est l'approche utilisée dans cette étude et est celle la plus utilisée dans les protocoles de recherche en odontologie.

Ici l'objet de référence est un objet réel choisi. Les dimensions de cet objet ne sont pas connues. L'objet est scanné par une machine d'acquisition avec une exactitude donnée donnant un nuage de points (fig.9.a et b). Ce nuage de point est converti en surface ce qui donne le modèle de référence CAO (fig.9.c). Les nuages de points obtenus ensuite sont positionnés sur le modèle de référence par la technique de meilleur alignement (best-fit alignement et fig.9.d)

A la différence de l'approche objective, l'approche comparative permet d'utiliser n'importe quel type d'objet de référence avec comme inconvénient de ne pas connaître exactement les valeurs dimensionnelles des formes complexes.

Figure 9 : Schéma de l'acquisition et meilleur alignement en méthode comparative



Source : Dr Dupagne, 2020

2 : Matériels et méthode

2.1. Matériels

2.1.1. Imprimantes

Les deux technologies les plus répandues en impression 3D et en odontologie sont le dépôt de fil et la stéréolithographie. Une imprimante 3D de chacune de ces technologies a été utilisée dans le protocole. La Form 2 de chez Formlabs pour la stéréolithographie et l'Ultimaker 3 extended pour le dépôt de fil.

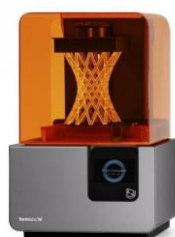
2.1.1.1. Stéréolithographie (SLA) : Form2

La Form 2 est une imprimante 3D par stéréolithographie (SLA) présentant les caractéristiques constructeur suivantes :

- Épaisseur de couches de 300 à 25 μm
- Taille faisceau laser 140 μm
- Laser EN 60825-1:2007 Class 1 250mW
- Volume d'impression (L x l x H) 145 x 145 x 175 mm

Une épaisseur de couche de 50 μm a été choisie pour l'impression des modèles dans l'étude.

Figure 10 : Image d'une imprimante 3D Form2



Source : Formlabs, 2020.

2.1.1.2. Dépôt de fil : Ultimaker 3 Extended

L'Ultimaker 3 Extended est une imprimante 3D par dépôt de fil (FDM) présentant les caractéristiques constructeur suivantes :

- Épaisseur de couche 600 à 60 μm

- Diamètre de buse 0.4 mm
- Volume d'impression (L x l x H) 215 x 215 x 300 mm

Une épaisseur de couche de 60µm a été choisie pour l'impression des modèles dans l'étude.

Figure 11 : Image d'une imprimante 3D Ultimaker 3 Extended



Source : Ultimaker, 2020.

2.1.2. Caméra intra-orale Carestream CS3500

Pour cette étude, une caméra intra-orale Carestream CS3500 a été utilisée pour scanner les modèles.

Elle présente les caractéristiques constructeurs suivantes :

- Résolution : image fixe : 1024 x 768 pixels / video : 640 x 480 pixels
- Précision : 30 microns
- Eclairage : LED quatre couleurs : orange, bleu, vert et UV
- Champ d'examen : 16 x 12 mm avec tête standard / 12 x 9 mm avec petite tête
- Profondeur de champ : -2 à +13 mm
- Longueur de câble : 2.5 m
- Raccordement numérique : USB 2.0 High Speed
- Dimensions sans câble: 245 x 37 x 42 mm
- Poids : 295 g

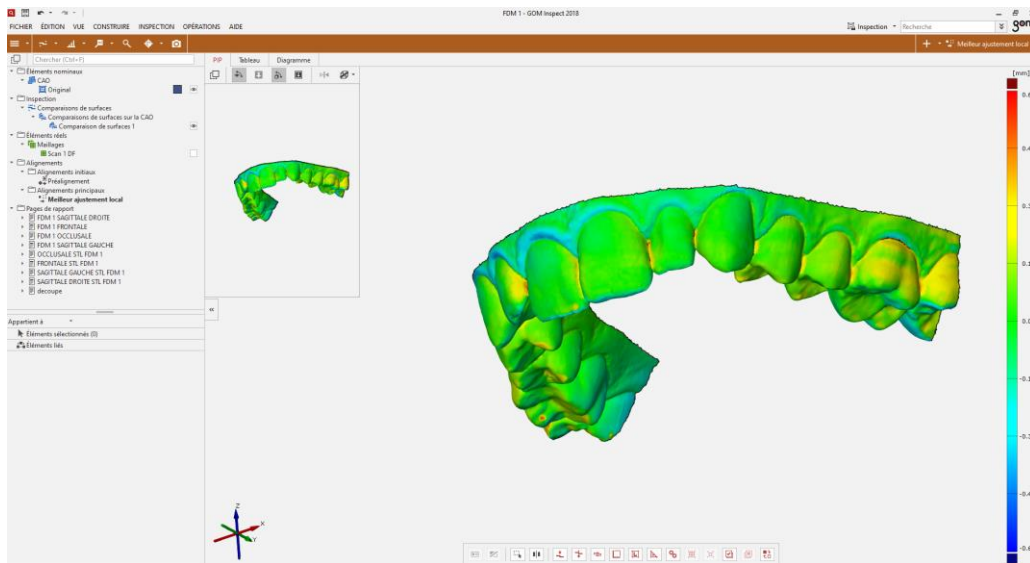
L'exactitude (précision) a été mesurée dans le travail de Renne et al¹¹ à 76 µm sur des scans d'arcades complètes pour la Carestream CS3500.

2.1.3. Logiciel d'analyse GOM inspect 2018

Durant cette étude toutes les analyses des fichiers numériques STL des modèles dentaires ont été faites sur le logiciel GOM inspect 2018, permettant la comparaison de fichiers CAO.

¹¹ Renne et al., « Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners : an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons ».

Figure 12 : Capture d'écran du logiciel GOM inspect 2018



Source : Auteur, 2020.

2.2 Protocoles

2.2.1. Fabrication

Dans le but de d'augmenter l'erreur de mesure pour en faciliter l'interprétation Il a été décidé de répéter le cycle impression/empreinte optique/impression etc... A chaque cycle, le modèle issu de l'impression est rescanné par la carestream, et le modèle numérique issu de ce scan est réimprimé. L'étude se basant sur la méthode comparative, le fichier initial de référence (STL0) a été obtenu par acquisition intra-orale de l'arcade complète maxillaire de l'auteur grâce à la caméra intra orale Carestream CS 3500. (fig.13.a)

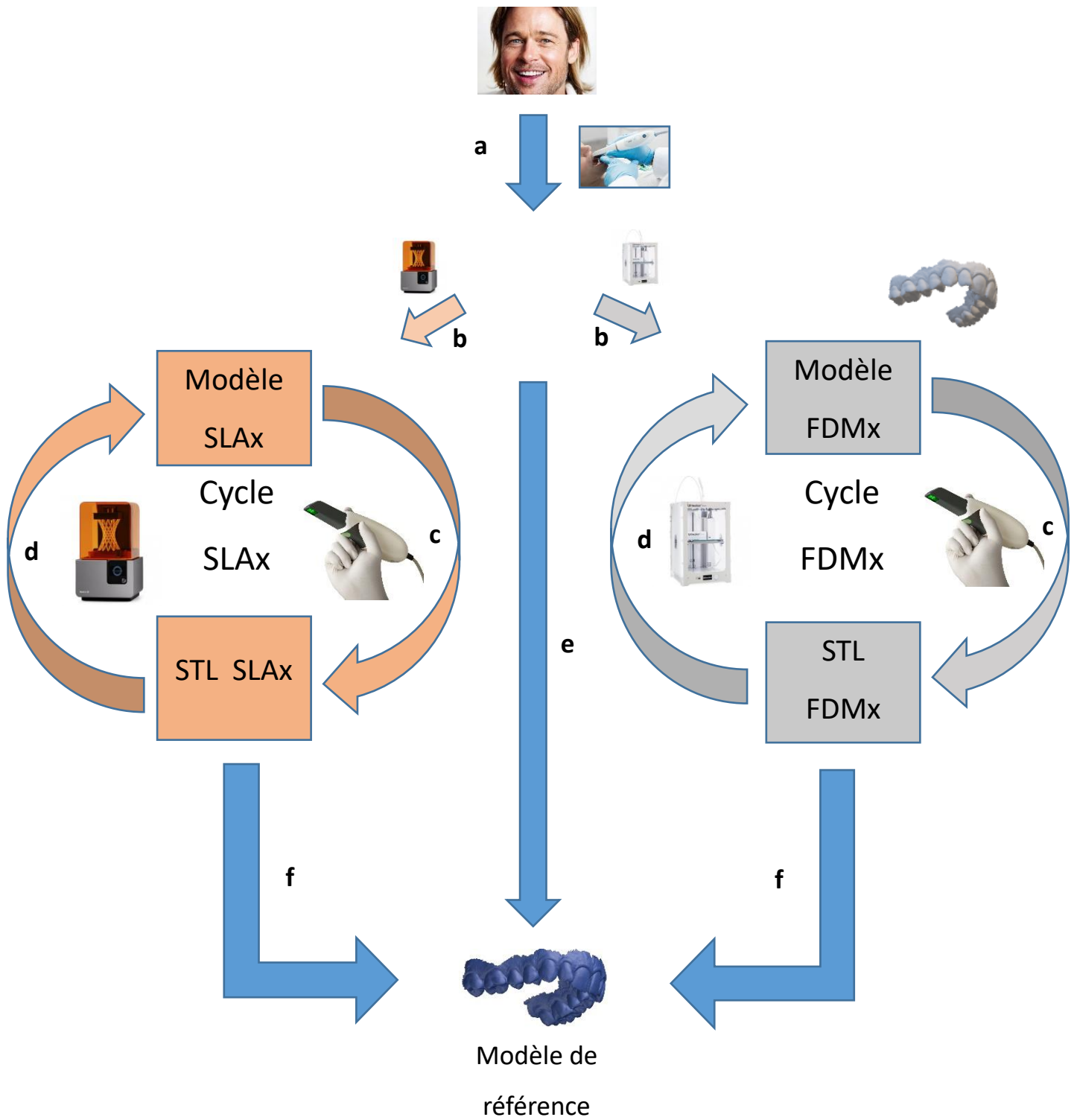
Le fichier STL0 de référence est ensuite utilisé pour impressions de deux modèles sur les deux machines, issues des 2 technologies (SLA/FDM). (fig.13.b)

Ces 2 premiers modèles (MODELE FDM1 / MODELE SLA1) sont ensuite scannés avec la même caméra intra orale (CS3500) donnant alors les fichiers STL correspondants (FDM1 / SLA1) (fig.13.c).

A chaque fin de cycle, le dernier fichier STL obtenu (ici FDM1/SLA1) est utilisé pour démarrer le cycle suivant (fig.13.d). Après impression les seconds modèles sont obtenus (MODELE FDM2 / MODELE SLA2) issues des 2 machines correspondantes. Ces modèles sont scannés à leur tour pour obtenir les fichiers STL correspondant (FDM2 / SLA2), terminant ainsi le second cycle.

L'opération est répétée successivement cinq fois, permettant l'obtention de 5 modèles par SLA et 5 modèles par FDM, chaque modèle réel est associé à un modèle STL.

Figure 13 : Schéma du protocole de fabrication/acquisition des différents modèles



Source : Auteur, 2020.

2.2.2 Analyse des STL

Une fois les STL des 5 cycles obtenus, les comparaisons se font sur le logiciel GOM 2018. L'analyse se fait donc sur 11 modèles STL :

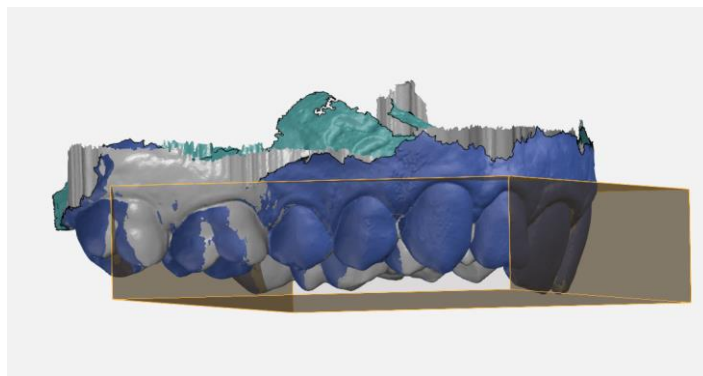
- 1 fichier STL initial (STL0) de référence issue du scan intra oral donnant le modèle virtuel de référence (e)
- 5 fichiers STL des modèles imprimés en stéréolithographie (SLA1,2,3,4,5)
- 5 fichiers STL des modèles imprimés en dépôt de fil fondu (FDM1,2,3,4,5)

L'objectif est la détermination de l'écart de mesure moyen entre chaque STL évalué et le modèle de référence issu du STL0 peut être réalisé, suivant la méthode comparative, présentée partie 1.5.3. L'analyse se fait à la fois en arcade complète et en sectorielle afin de montrer que la distorsion en arcade complète¹² n'est pas responsable de la perte de données entre chaque impression. La première étape consiste donc à tronquer les fichiers issus des impressions et le fichier de référence. La découpe se fait suivant les repères :

En arcade complète (fig.14) :

- En postérieur la moitié des 17/27
- A l'horizontale les collets des canines 13/23

Figure 14 : Limites de la zone en arcade complète



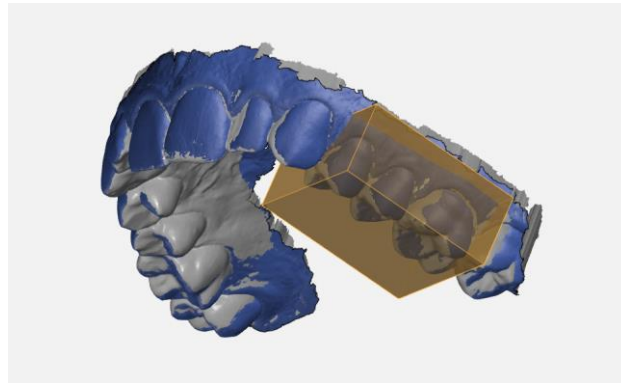
Source : Auteur, 2020.

En sectoriel, zone 24-25-26 (fig.15) :

- En distal de la 26
- En Mesiale de 24
- A l'horizontale les collets des canines 13/23

¹² Schmidt et al., « Torsion and linear accuracy in intraoral scans obtained with different scanning principles ».

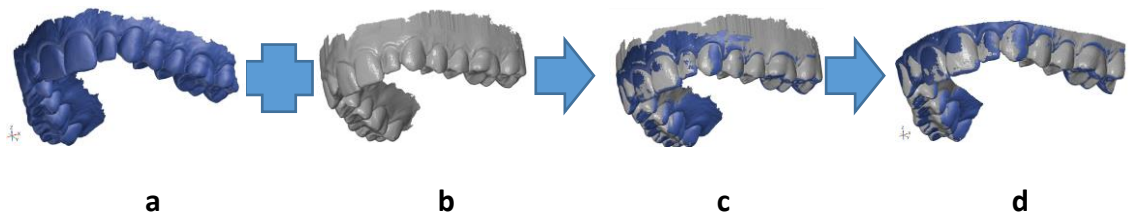
Figure 15 : Limites de la zone en coupe 24-25-26



Source : Auteur, 2020.

Le STL évalué est ensuite recalé sur le modèle référence par la technique des moindres carrés (fig.16). L'écart moyen entre STL évalué et le modèle est déterminé par projection des points du STL évalué sur le modèle de référence.

Figure 16 : Schéma du protocole d'alignement du modèle numérique sur GOM inspect 2018



Source : Auteur, 2020.

2.2.3 Calculs des valeurs d'écartes moyennes

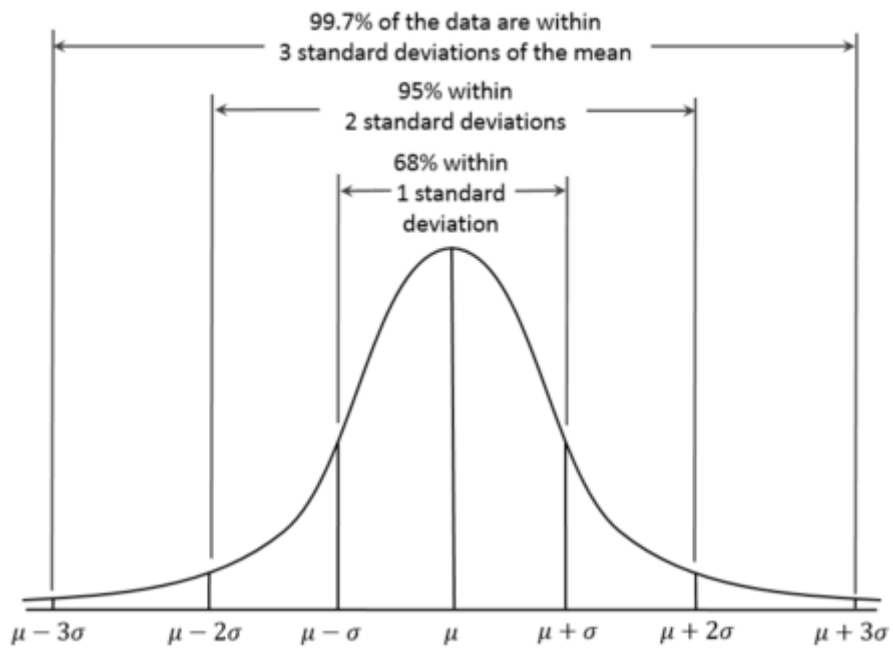
Les valeurs d'écartes sont présentées graphiquement (tab.2,3,4,5,6 et 7), et les données numériques d'écart sont extraites du logiciel dans un tableur.

Afin d'exclure les données aberrantes, il a été décidé de borner les valeurs d'écartes à 4 déviations standard, ce qui revient à garder 99.9% des valeurs d'écartes et à exclure les 0.01% les plus extrêmes (Figure 17).

Pour chaque mesure d'écart, de chaque cycle, la moyenne des écarts (μ) a été calculé, puis l'écart type (σ) de cette moyenne d'écart. Les bornes inférieurs et supérieurs sont donc $\mu \pm 4\sigma$.

Une fois les bornes définies, la moyenne des écarts est recalculée ainsi que l'écart type.

Figure 17 : Loi normale : relation entre pourcentage et déviation standard



Source : standarddeviationformula, « Standard deviation percentage ».

3 : Résultats

3.1. Graphiques

3.1.1. Arcades complètes

Les tableaux 2, 3, 4 et 5 présentent les représentations graphiques des écarts « arcades complètes » des fichiers STL des cycles 1, 2, 3, 4 et 5 superposés sur le modèle de référence. Chacun d'entre eux montrant des vues différentes (occlusales, frontales, sagittales droite et gauche). La première colonne représente les graphiques issus de l'impression par dépôt de fil fondu (FDM) et la seconde colonne de la stéréolithographie (SLA). L'échelle de couleur signifie que plus le modèle STL évalué est en sur dimensions par rapport à la référence plus les couleurs tendent vers le rouge foncé et plus le modèle STL évalué est en sous dimensions, plus les couleurs tendent vers le bleu foncé.

Pour le FDM

Visuellement dès le 2^{ème} cycle apparaissent de multiples zones avec des écarts importants :

- En occlusale de 14, 15, 27 (tableau 2)
- En palatin de 23, 24, 25 (tableau 2)
- Aux collets des 13, 12, 11, 21 (tableau 3)
- En vestibulaire de 16, 17 (tableau 5)
- En interdentaire (tableaux 3, 4, 5)

Du 2^{ème} au 5^{ème} cycle il y a une augmentation croissante de ces zones avec une apparition au 4^{ème} cycle d'écarts importants sur les bords incisifs et cuspidés des canines. Les écarts importants positifs se situent préférentiellement sur les faces vestibulaires/palatines des molaires/prémolaires et les espaces interdentaires de l'arcade (tableaux 2, 3, 4, 5). Quand Les écarts négatifs se retrouvent sur les cuspidés des molaires, les bords incisifs et les collets des incisives/canines (tableaux 2 et 3).

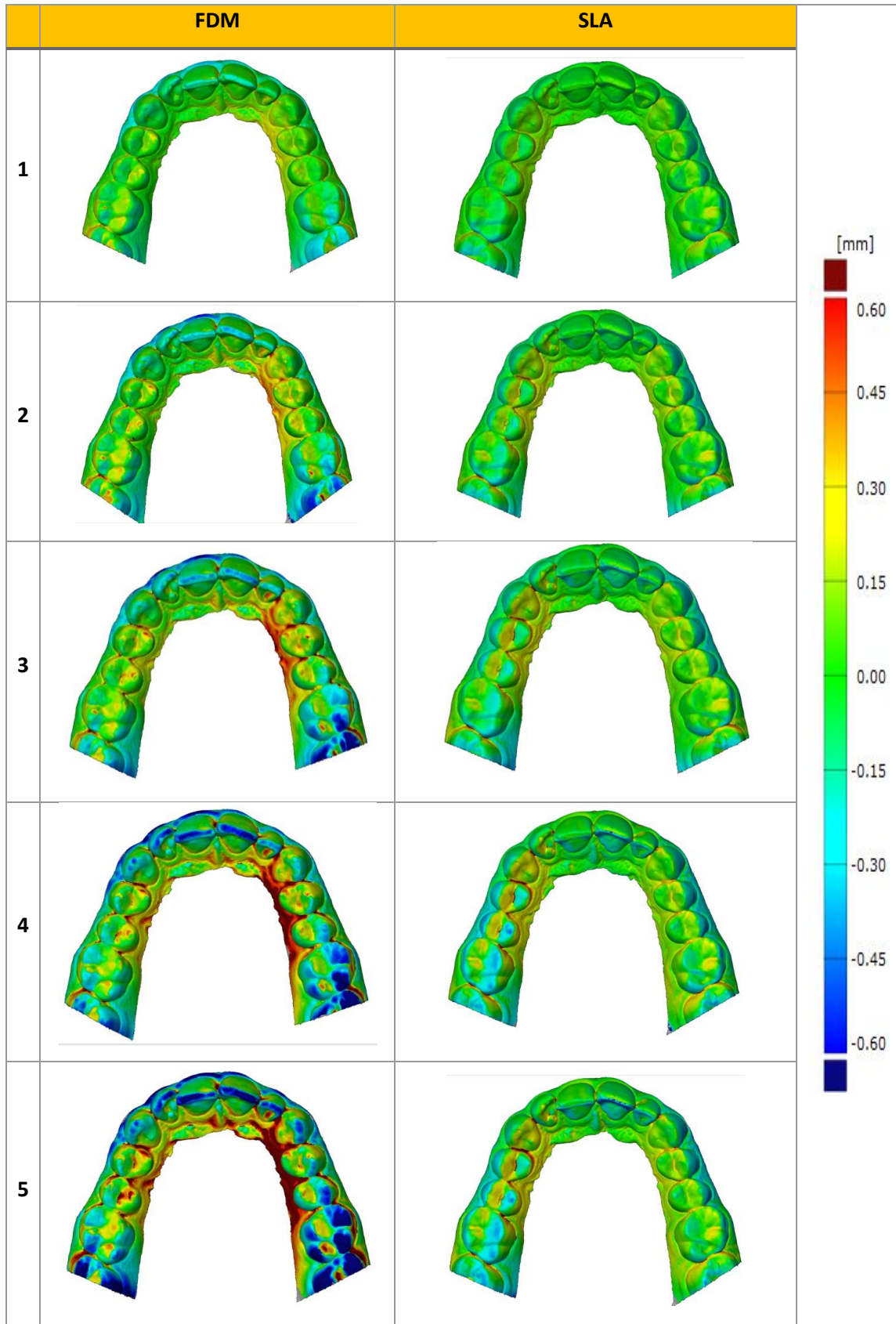
Pour la SLA

Dès le 2^{ème} cycle les zones d'écarts important se retrouvent :

- En Vestibulaire de 24, 25, 26, 27 (tableau 5)
- En Occlusale de 16 (tableau 2)

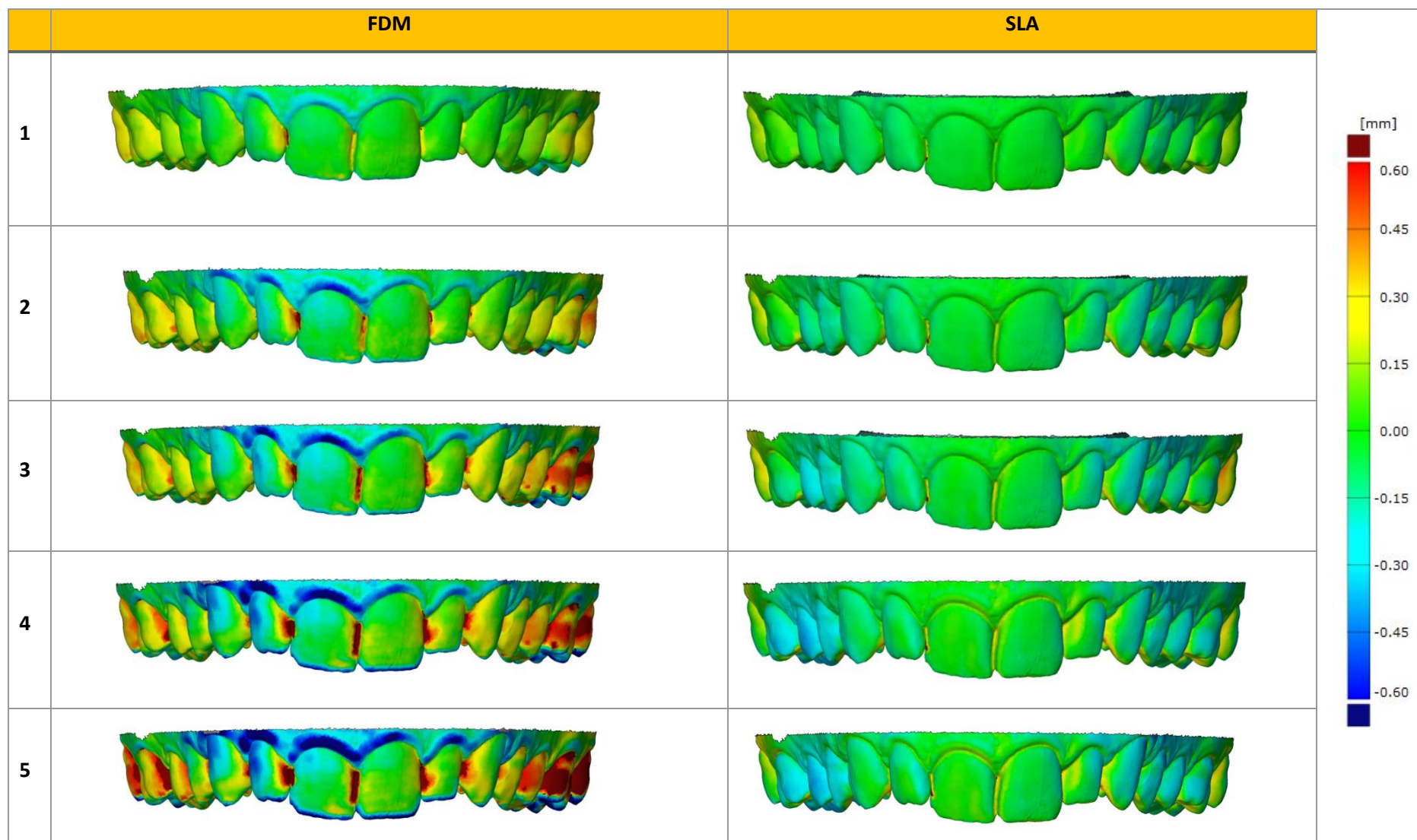
Du 2^{ème} au 5^{ème} cycle il y a une expansion des zones déjà existantes avec apparition au 4^{ème} cycle d'une nouvelle zone en vestibulaire de 14, 15, 16.

Tableau 2 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues occlusales



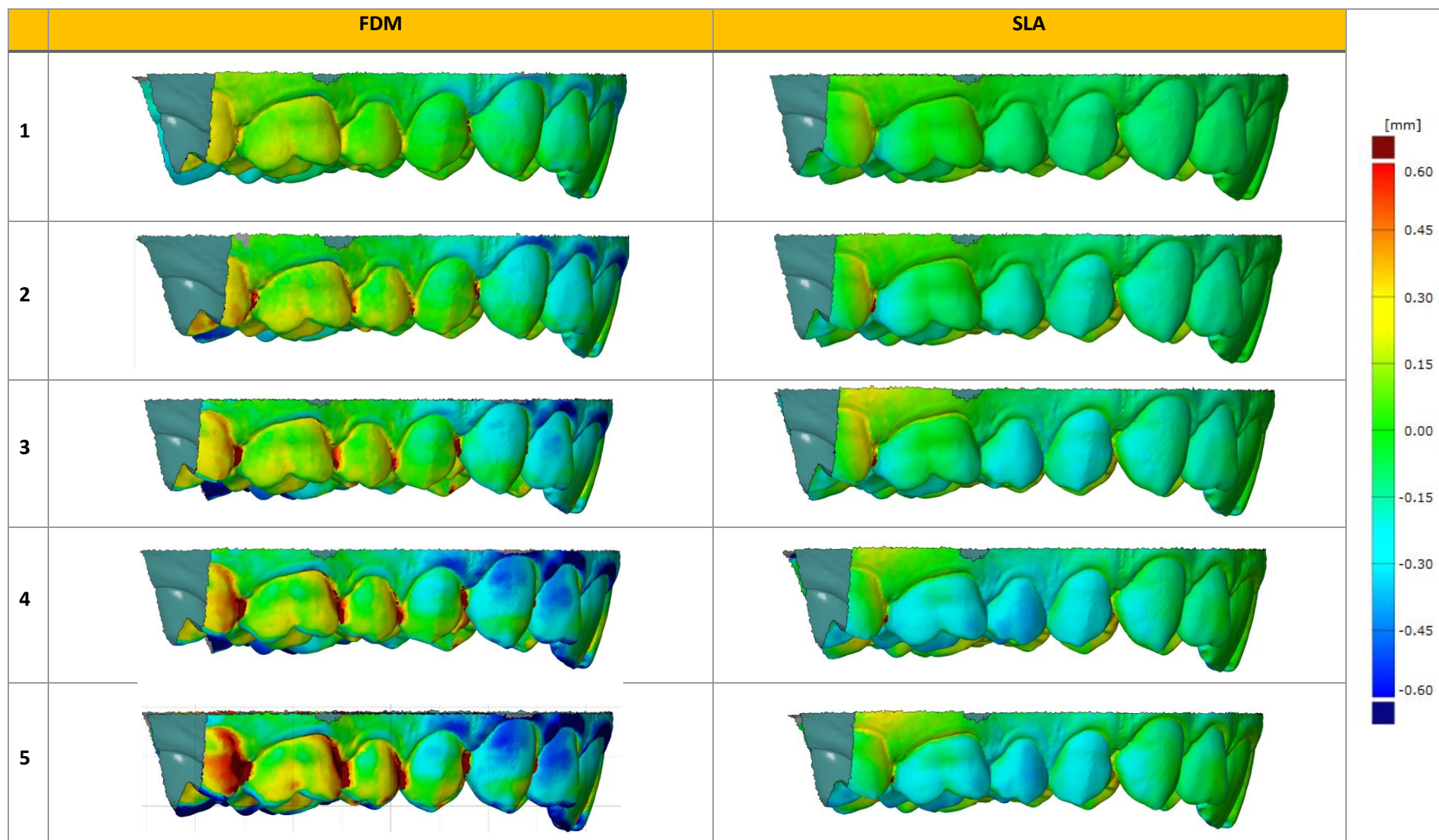
Source : Auteur, 2020.

Tableau 3 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues frontales



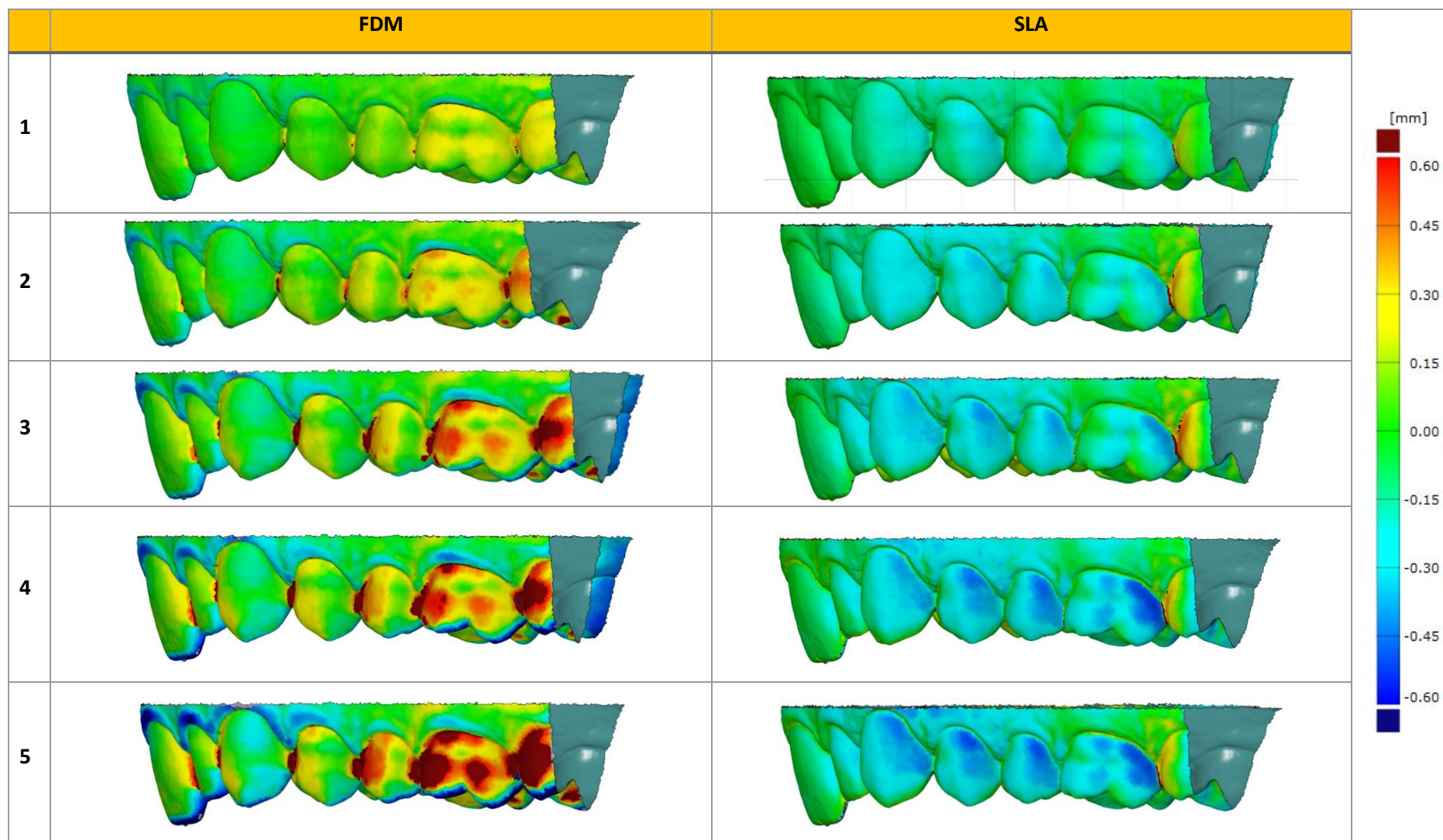
Source : Auteur, 2020.

Tableau 4 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues sagittales droites



Source : Auteur, 2020.

Tableau 5 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues sagittales gauches



Source : Auteur, 2020.

3.1.2. Graphiques sectoriels 24-25-26

Les tableaux 15 et 16 présentent les graphiques des écarts entre les fichiers STL évaluées et le modèle de référence sur le secteur 24-25-26 en fonction du type de technologie d'impression. Le tableau X présente les vues vestibulaires et le tableau Y les vues occlusales. Comme pour l'arcade complète, l'échelle des couleurs signifie que plus on s'écarte de façon positive par rapport au STL0, plus les couleurs tendent vers le rouge foncé, et plus les valeurs s'écartent de façon négative, plus les couleurs tendent vers le bleu foncé.

Pour le FDM

En ce qui concerne la technologie d'impression par dépôt de fil (FDM), les écarts importants apparaissent à partir du 2^{ème} cycle au niveau :

- Interdentaires (tab.7)
- Collets vestibulaires 24, 25, 26 (tab.7)

Au 3^{ème} cycle :

- Pointes des cuspides en occlusale 24, 25, 26 (tab.6)

Du 4^{ème} au 5^{ème} cycle une augmentation de ces zones déjà existantes

Pour le SLA

Pour la Stéréolithographie (SLA) il y a une apparition d'écarts au 2^{ème} cycle au niveau de :

- La fosse centrale de 24 (tab.6)

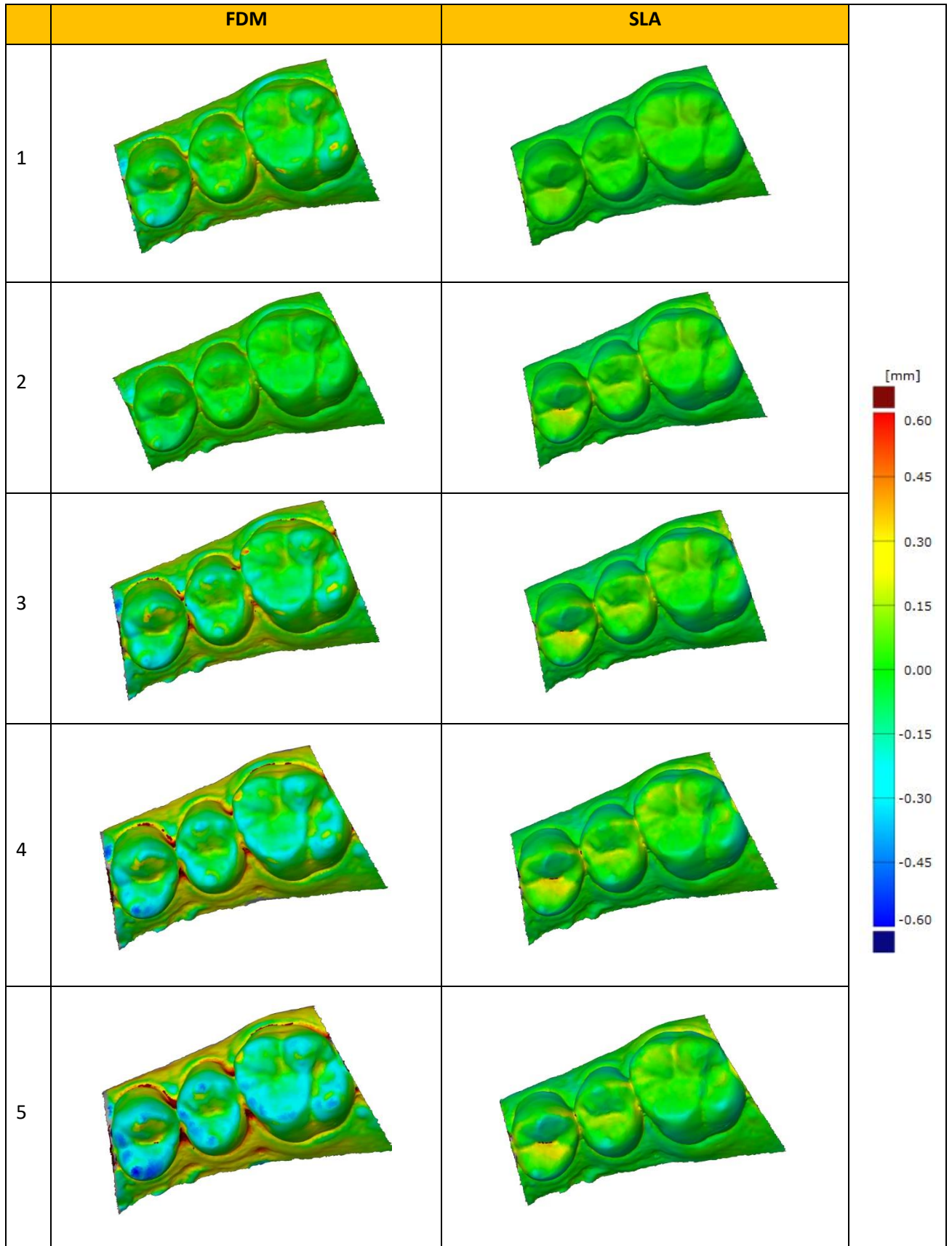
Au 3^{ème} cycle :

- La face vestibulaire de 25, 26 (tab.7)

Du 4^{ème} au 5^{ème} cycle :

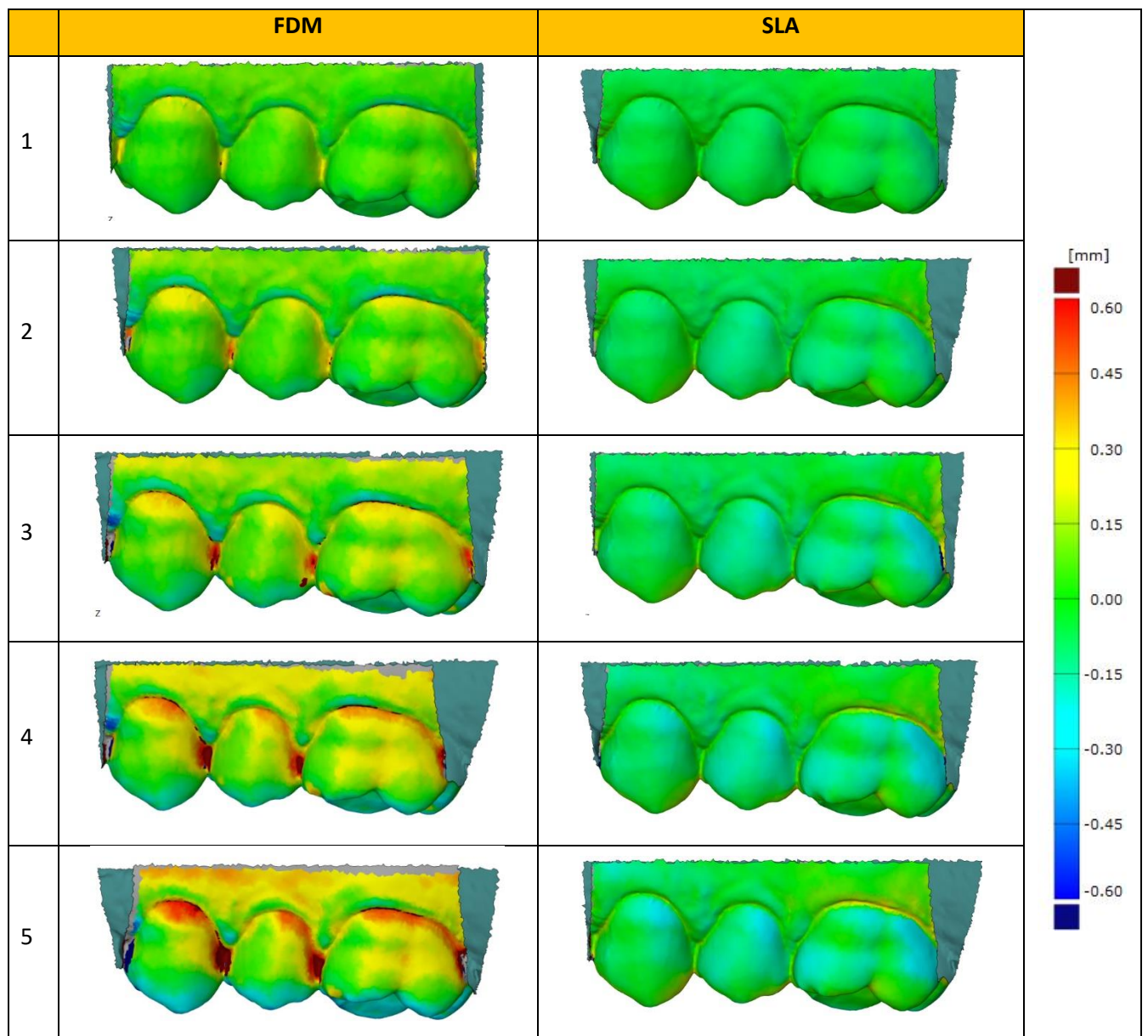
- Une augmentation des zones déjà existantes
- La face vestibulaire de 24 (tab.7)
- Les pointes cuspidiennes linguales des 25 (tab.6)

Tableau 6 : Graphiques des superpositions sectoriels 24-25-26 en vue occlusale



Source : Auteur, 2020.

Tableau 7 : Graphiques des superpositions sectoriels 24-25-26 en vue sagittale vestibulaire



Source : Auteur, 2020.

3.1.3. Valeurs d'écart moyen

Le tableau 8 présente les écarts moyen (mm) en arcade complète et sectoriel 24-25-26 de chaque fichier STL en fonction du cycle par rapport au modèle de référence.

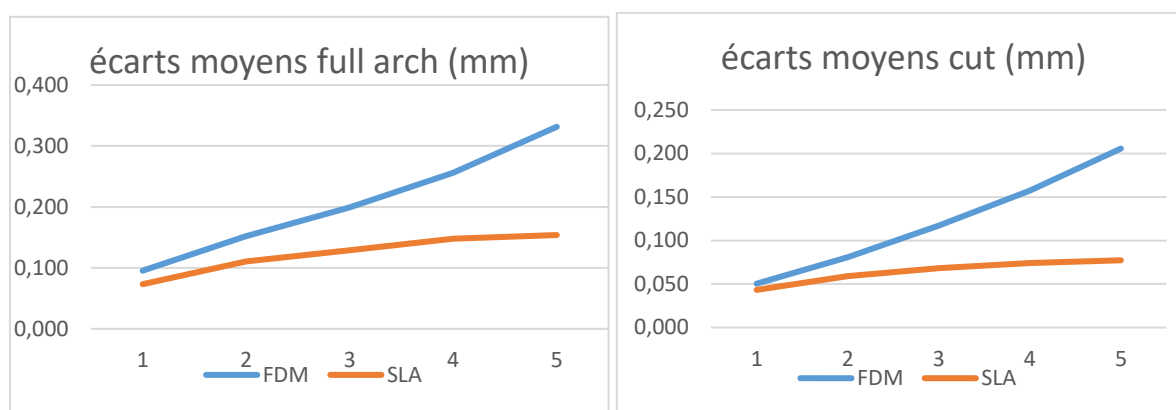
Les valeurs pour le FDM et SLA sont proches sur les premiers cycles mais s'écartent rapidement dès le 3^{ème} cycle (tableau 8). Les valeurs de FDM évoluent de façon linéaire quand celles de SLA semblent tendre vers un plateau (fig.18).

Tableau 8 : Valeurs des écarts moyens tronquées en arcade complète

	Ecart moyen arcade complète (mm)		Ecart moyen secteur 24-25-26 (mm)	
	FDM	SLA	FDM	SLA
1	0.095	0.073	0.050	0.043
2	0.152	0.110	0.081	0.059
3	0.199	0.129	0.117	0.068
4	0.256	0.148	0.157	0.074
5	0.331	0.154	0.206	0.077

Source : Auteur, 2020.

Figure 18 : Graphiques des écarts moyens en mm en fonctions des cycles



Source : Auteur, 2020.

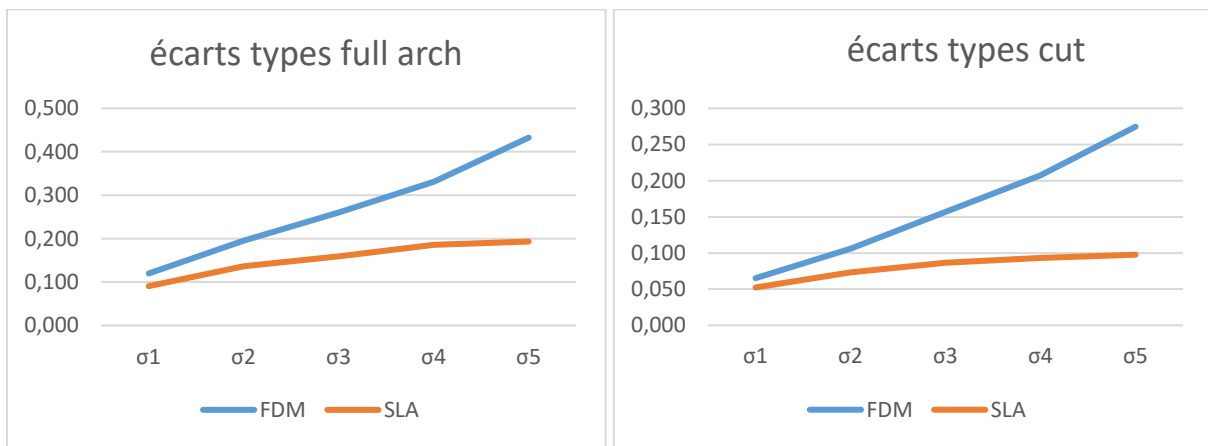
Le tableau 9 présente les écarts types en arcade complète et sectoriels 24-25-26 des écarts des fichiers STL des différents cycles, par rapport au modèle de référence. De la même façon que pour les écarts moyen les valeurs pour le FDM et la SLA sont proches dans les premiers cycles et s'écartent rapidement dès le 3^{ème} cycle (tableau 9). Ici aussi les valeurs des écarts types en FDM semblent être linéaires, quand les écarts en SLA semblent tendre vers un plateau (fig.19).

Tableau 9 : Valeurs des écarts types tronquées types en arcade complète

	Ecart types arcade complète		Ecart types secteur 24-25-26	
	FDM	SLA	FDM	SLA
1	0.120	0.091	0.065	0.052
2	0.195	0.137	0.106	0.073
3	0.260	0.159	0.157	0.086
4	0.331	0.185	0.207	0.093
5	0.433	0.193	0.275	0.098

Source : Auteur, 2020.

Figure 19 : Graphiques des écarts types en arcade complète en fonction des cycles



Source : Auteur, 2020.

Les tableaux 10 et 11 présentent les graphiques de répartition de toutes les mesures d'écarts en arcade complète et sectoriel. En abscisse les groupes d'écarts sont en millimètres (mm) et en ordonnée le nombre de points par tranche. La dispersion des points est équivalente aux premiers cycles entre FDM et SLA puis une dispersion des points accentué pour le FDM par rapport au SLA aux cycles 3, 4 et 5.

Tableau 10 : Graphiques de répartition des écarts mesurés en FDM et SLA arcade complète

	FDM	SLA
1	<p>FDM 1</p>	<p>SLA 1</p>
2	<p>FDM 2</p>	<p>SLA 2</p>
3	<p>FDM 3</p>	<p>SLA 3</p>
4	<p>FDM 4</p>	<p>SLA 4</p>
5	<p>FDM 5</p>	<p>SLA 5</p>

Source : Auteur, 2020.

Tableau 11 : Graphiques de répartitions des écarts mesurés en FDM et SLA sectoriel

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		

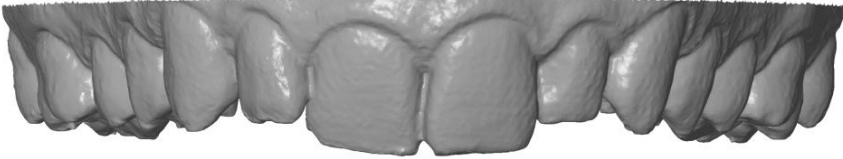
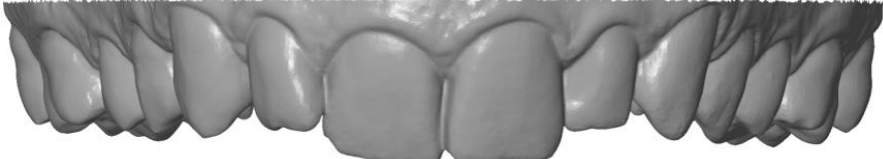

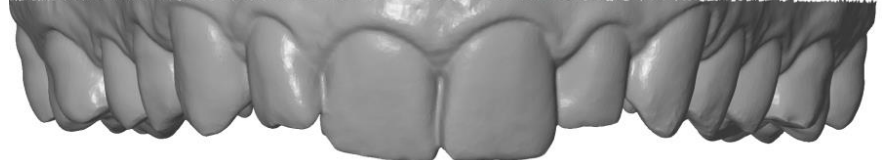
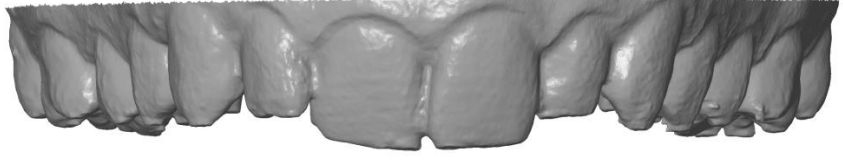
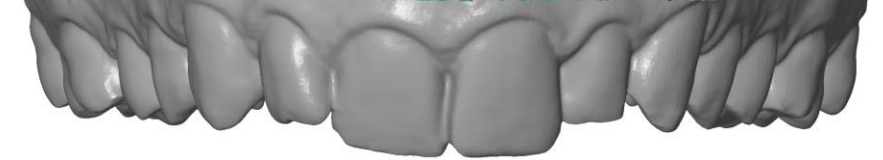
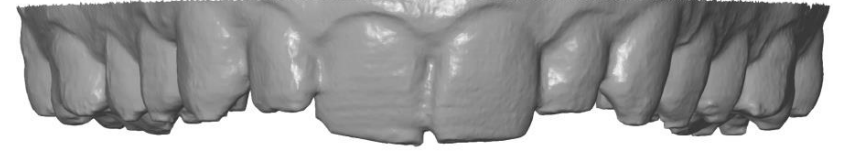

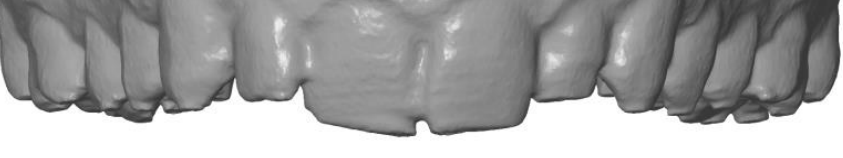

Source : Auteur, 2020.

3.1.4. Évaluation subjective visuelle

Les tableaux 12, 13 et 14 présentent les fichiers STL bruts des scans des modèles. Ils permettent de mettre en évidence l'évolution de façon subjective de la perte de données. Dès le 2^{ème} cycle en interdentaire et au niveau du sulcus en FDM il y a une perte d'information par lissage qui s'accroît au fil des cycles. En SLA entre le 1^{er} cycle et 5^{ème} cycle il y a un lissage généralisé visible au niveau du sulcus.

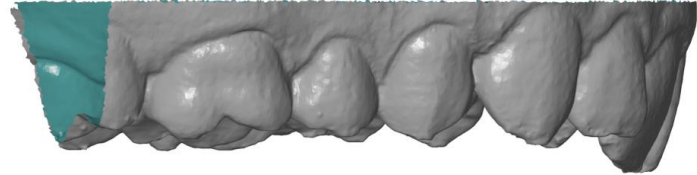
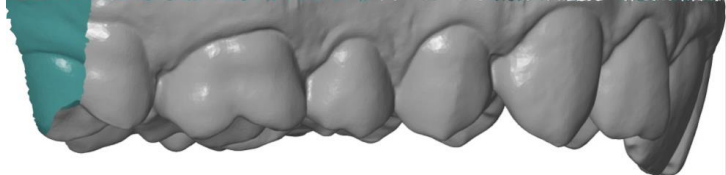
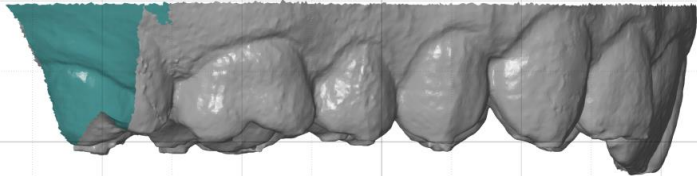
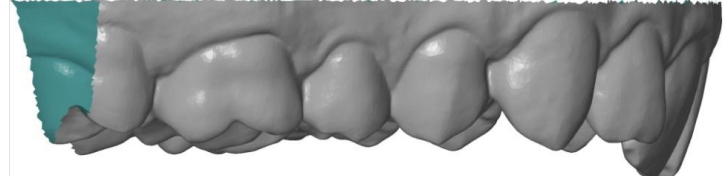
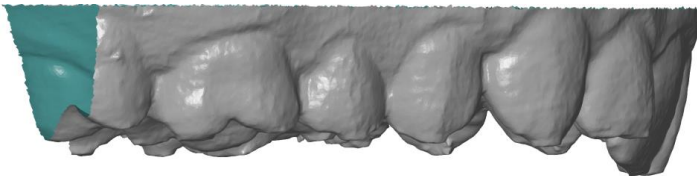
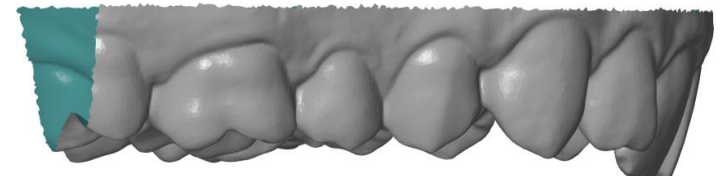
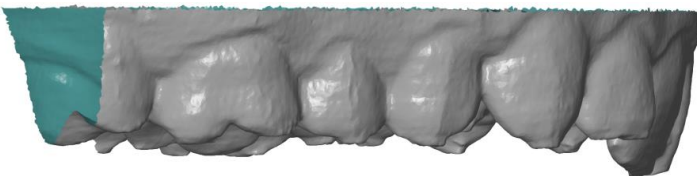
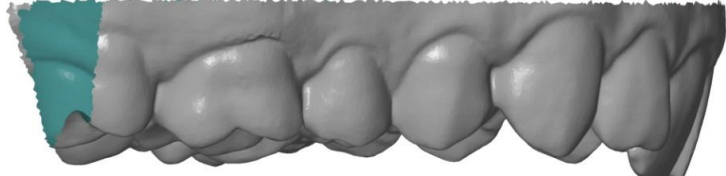
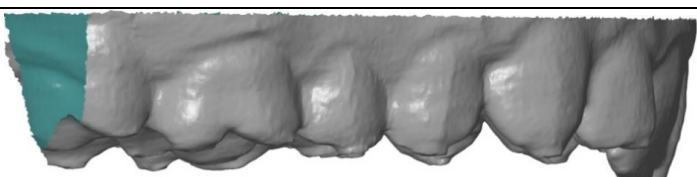
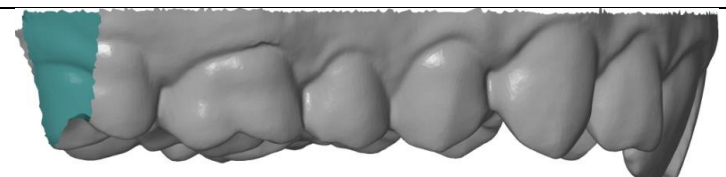
Les tableaux 15, 16 et 17 présentent les photographies des modèles physiques imprimés à chaque cycle. Comme pour les fichiers STL bruts, les photos permettent d'évaluer les impressions de façon subjective. Le lissage du sulcus et des zones interdentaires est ici aussi très visible pour le FDM tandis que sur les modèles imprimés en SLA seul le lissage des sulcus est visible dans une moindre mesure.

Tableau 12 : Fichiers STL bruts des vues frontales

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		

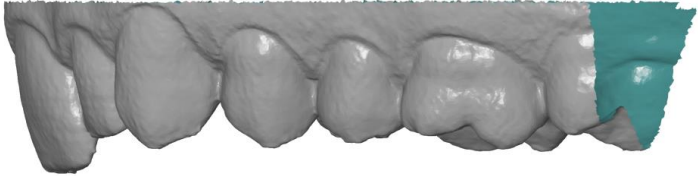
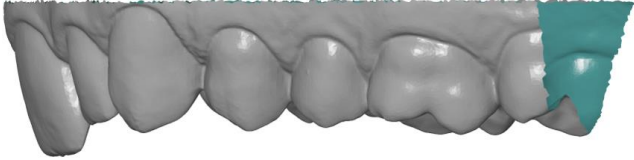
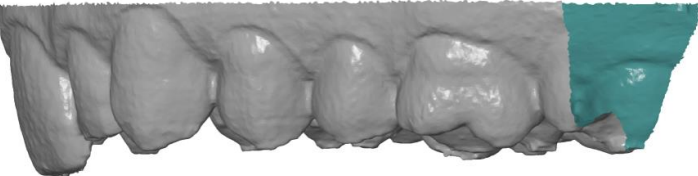
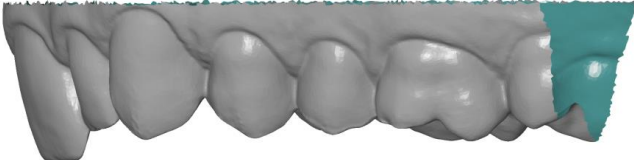
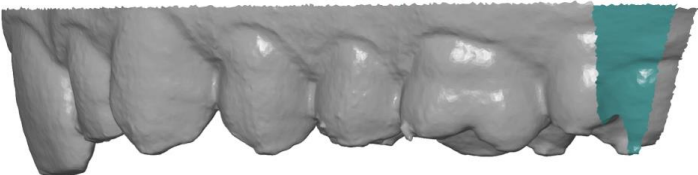
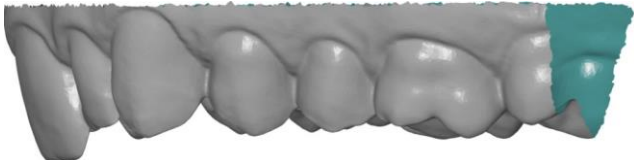
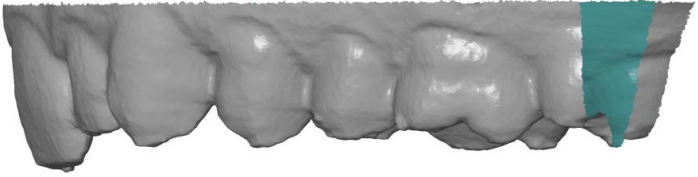
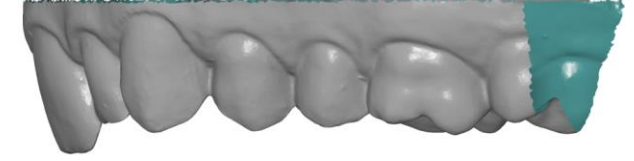
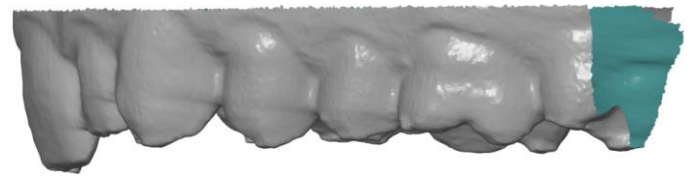
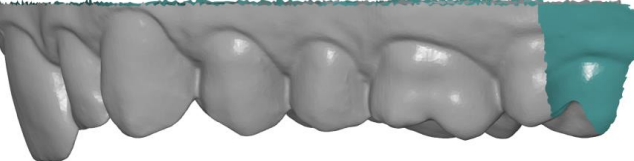
Source : Auteur, 2020.

Tableau 13 : Fichiers STL bruts des vues sagittales droites

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		










Source : Auteur, 2020.

Tableau 14 : Fichiers STL bruts des vues sagittales gauches

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		





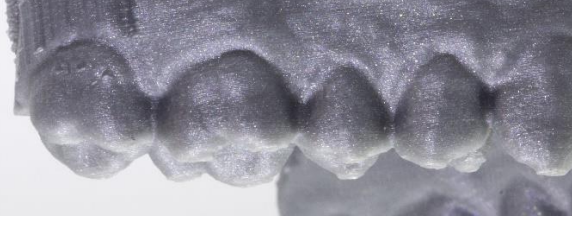





Source : Auteur, 2020.

Tableau 15 : Vues frontales des modèles imprimés

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		











Source : Auteur, 2020.

Tableau 16 : Vues sagittales droites des modèles imprimés

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		

Source : Auteur, 2020.

Tableau 17 : Vues sagittales gauches des modèles imprimés

	FDM	SLA
1		
2		
3		
4		
5		

Source : Auteur, 2020.

4 : Discussion

4.1. Valeurs

La répétition de cycles a rempli son objectif, les valeurs d'écart moyen augmente au fur et à mesure des répétitions d'empreinte optique/impression. Cette répétition permet de mettre en évidence de manière plus visibles les zones où l'impression 3D génère le plus de perte d'information : sulcus, sillons et face vestibulaires des molaires

Les valeurs obtenues au premier cycle sont comparativement assez basses quand on les compare à l'erreur de mesure de la caméra CS3500 que l'on trouve dans la littérature ($76\mu\text{m}$)¹³ mais il ne faut pas oublier que le modèle de référence est issu d'une acquisition de la CS3500, les erreurs d'acquisition sont peut-être déjà présentes dans le modèle de référence ce qui minimise l'influence de la caméra dans les résultats.

Comme ce qui est très souvent décrit dans la littérature^{14,15}, les résultats en empreinte sectorielle semblent meilleurs qu'en empreinte complète, ceci s'explique par des phénomènes de torsions entre les 2 extrémités de modèles (molaire à molaire) qui ne sont pas négligeables en arcade complète contrairement en sectoriel¹⁶, il est très probable que la caméra soit majoritairement responsable de ce constat car la taille du modèle imprimé devrait avoir peu d'influence sur l'erreur d'impression alors que le phénomène de retrait de photopolymérisation en SLA et le refroidissement en FDM influent surement.

Les résultats sont en faveur de la SLA avec une moyenne d'écart moyen après 5 cycles qui reste assez faible et qui semble tendre vers une asymptote, tandis que les valeurs moyennes de FDM après 5 cycles sont 2 fois plus élevées et semblent suivre une simple droite. En effet même si ici le principal défaut du protocole est que la valeur d'écart moyen obtenu dépend à la fois de l'erreur de l'acquisition de la caméra Carestream CS3500 et des imperfections d'impressions des modèles, on peut tout de même

¹³ Renne et al., « Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners : an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons ».

¹⁴ Nedelcu et Persson, « Scanning accuracy and precision in 4 intraoral scanners : an in vitro comparison based on 3-dimensional analysis ».

¹⁵ Renne et al., « Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners : an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons ».

¹⁶ Schmidt et al., « Torsion and linear accuracy in intraoral scans obtained with different scanning principles ».

conclure que l'impact de la technologie d'impression est non négligeable car les deux technologies donnent des résultats différents bien que la même caméra ait été utilisée en SLA et en FDM.

Il est aussi observable que l'écart type augmente avec les cycles ce qui signifie que ce n'est pas une erreur systématique qui augmente mais bien des valeurs de plus en plus chaotiques par rapport à la référence.

La perte de données

4.2 Limites

La première limite de cette étude est la quantité d'impressions. En effet le peu d'impressions (5 en SLA et 5 en FDM) ne permettent pas d'avoir assez de données statistiques et de pouvoir conclure avec certitude qu'une technologie à une meilleure exactitude que l'autre.

Dans un deuxième temps le facteur de la couleur des modèles scannés avec la caméra intra-orale peut avoir une influence sur les résultats.

Le premier scan en intra-oral (fig.13.a) sur l'auteur n'est pas problématique, car c'est ce STL qui sert de référence et donc de point de départ de l'étude. Les scans suivants se font directement sur les modèles imprimés qui sont gris argenté pour les modèles FDM et orange mat pour les modèles SLA (tab.15 16 et 17). S'il est difficile de trouver des données dans la littérature sur le sujet, certains articles mettent en évidence une différence d'exactitude des caméras intra-orales en fonction de la lumière ambiante¹⁷ ou de l'intérêt de poudrer les modèles¹⁸, ce qui laisse penser que la différence de couleurs des résines, et donc d'illumination, peut avoir un impact sur les scans enregistrés.

¹⁷ Arakida et al., « Evaluating the influence of ambient light on scanning trueness, precision, and time of intra oral scanner ».

¹⁸ Prudente et al., « Influence of scanner, powder application, and adjustments on CAD-CAM crown misfit ».

Conclusion

La répétition de cycle semble être une bonne méthode pour faciliter l'analyse d'erreur dans la fabrication de modèle par impression 3D.

Malgré la limite de cette étude il semble que l'imprimante Form2 en stéréolithographie possède une exactitude supérieure à l'Ultimaker 3D extend en dépôt de fil, une étude plus poussée avec une multiplicité de modèle et une analyse statistique est nécessaire pour avoir une conclusion définitive. De plus l'homologation de résine pouvant aller en bouche pour la stéréolithographie fait donc de cette technologie, la technique d'impression la plus adaptée pour le moment en utilisation quotidienne dans nos cabinets dentaires.

Bibliographie

- Arakida, T., M. Kanazawa, M. Iwaki, T. Suzuki, et S. Minakuchi. « Evaluating the influence of ambient light on scanning trueness, precision, and time of intra oral scanner ». *Journal of prosthodontic research* 62, n° 3 (2018): 324-29. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2017.12.005>.
- Dupagne, L., S. Le Goff, et L. Tapie. « L'impression 3D : partie 3, La stéréolithographie ». *Biomatériaux dentaire cliniques : l'innovation pédagogique* 2, n° 1 (2017): 76-80.
- Galante, R., C. G. Figueiredo-Pina, et A. P. Serro. « Additive manufacturing of ceramics for dental applications : a review ». *Dental materials* 35, n° 6 (2019): 825-46. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.02.026>.
- Gibson, I., D. Rosen, et B. Stucker. *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2nd ed. New York : Springer, 2015.
- International organization for standardization. « Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results e part 1 : general principles and definitions (iso 5725e1:1994) ». International organization for standardization, 1994 . <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:en>.
- Kruth, J.P. « Material inccress manufacturing by rapid prototyping techniques ». *CIRP Annals* 40, n° 2 (1991): 603-14. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6).
- Kruth, J.-P., M.C. Leu, et T. Nakagawa. « Progress in additive manufacturing and rapid prototyping ». *CIRP Annals* 47, n° 2 (1998): 525-40. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5).
- Nedelcu, R. G., et A. S. K. Persson. « Scanning accuracy and precision in 4 intraoral scanners : an in vitro comparison based on 3-dimensional analysis ». *The journal of prosthetic dentistry* 112, n° 6 (décembre 2014): 1461-71. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.05.027>.
- Pham, D.T, et R.S Gault. « A comparison of rapid prototyping technologies ». *International journal of machine tools and manufacture* 38, n° 10-11 (1998): 1257-87. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(97\)00137-5](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(97)00137-5).
- Popescu, D., A. Zapciu, C. Amza, F. Baciu, et R. Marinescu. « FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens : a review ». *Polymer testing* 69 (2018): 157-66. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>.
- Prudente, M. S., L. R. Davi, K. O. Nabbout, C. J. Prado, L. M. Pereira, K. Zancopé, et F. D. Neves. « Influence of scanner, powder application, and adjustments on CAD-CAM crown misfit ». *The journal of prosthetic dentistry* 119, n° 3 (2018): 377-83 . <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.03.024>.
- Renard, M. « Impression 3D dentaire : pourquoi les technologies 3D révolutionnent-elles le secteur ? » 3Dnatives : Le média de l'impression 3D, 2019. <https://www.3dnatives.com/impression-3d-dentaire-25032019/>.
- Renne, W., M. Ludlow, J. Fryml, Z. Schurch, A. Mennito, R. Kessler, et A. Lauer. « Evaluation of the accuracy of 7 digital scanners : an in vitro analysis based on 3-dimensional comparisons ». *The journal of prosthetic dentistry* 118, n° 1 (2017): 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.09.024>.
- Schmidt, A., C. R. Benedickt, M. A. Schlenz, P. Rehmann, et B. Wöstmann. « Torsion and linear accuracy in intraoral scans obtained with different scanning principles ». *Journal of prosthodontic research*, 2019, S1883195818303943. <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2019.06.006>.

Table des figures

Figure 1 : Schéma de la chaîne numérique en méthode additive.....	4
Figure 2 : Classification des procédés de fabrication additive selon Pham	6
Figure 3: Schéma du principe de base des systèmes d'addition par extrusion	8
Figure 4: Schéma de tracé d'une buse ronde en dépôt de fil mettant en évidence les zones de porosités	10
Figure 5 : Schéma du déroulement d'une impression en stéréolithographie.....	11
Figure 6 : Schéma de la méthode alternative de stéréolithographie.....	11
Figure 7 : Concept de la justesse, fidélité et exactitude.	12
Figure 8 : Schéma de la conceptualisation du modèle de référence en approche objective	13
Figure 9 : Schéma de l'acquisition et meilleur alignement en méthode comparative	14
Figure 10 : Image d'une imprimante 3D Form2	15
Figure 11 : Image d'une imprimante 3D Ultimaker 3 Extended.....	16
Figure 12 : Capture d'écran du logiciel GOM inspect 2018.....	17
Figure 13 : Schéma du protocole de fabrication/acquisition des différents modèles	18
Figure 14 : Limites de la zone en arcade complète	19
Figure 15 : Limites de la zone en coupe 24-25-26.....	20
Figure 16 : Schéma du protocole d'alignement du modèle numérique sur GOM inspect 2018	20
Figure 17 : Loi normale : relation entre pourcentage et déviation standard.....	21
Figure 18 : Graphiques des écarts moyens en mm en fonctions des cycles	30
Figure 19 : Graphiques des écarts types en arcade complète en fonction des cycles.....	31

Table des tableaux

Tableau 1 : Principales technologies des méthodes additives	5
Tableau 2 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues occlusales	23
Tableau 3 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues frontales	24
Tableau 4 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues sagittales droites	25
Tableau 5 : Graphiques des superpositions en arcade complète des vues sagittales gauches	26
Tableau 6 : Graphiques des superpositions sectoriels 24-25-26 en vue occlusale	28
Tableau 7 : Graphiques des superpositions sectoriels 24-25-26 en vue sagittale vestibulaire	29
Tableau 8 : Valeurs des écarts moyens tronquées en arcade complète.....	30
Tableau 9 : Valeurs des écarts types tronquées types en arcade complète	31
Tableau 10 : Graphiques de répartitions des écarts mesurés en FDM et SLA arcade complète	32
Tableau 11 : Graphiques de répartitions des écarts mesurés en FDM et SLA sectoriel	33
Tableau 12 : Fichiers STL bruts des vues frontales.....	35
Tableau 13 : Fichiers STL bruts des vues sagittales droites.....	36
Tableau 14 : Fichiers STL bruts des vues sagittales gauches.....	37
Tableau 15 : Vues frontales des modèles imprimés.....	38
Tableau 16 : Vues sagittales droites des modèles imprimés	39
Tableau 17 : Vues sagittales gauches des modèles imprimés.....	40

Vu, le Directeur de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie - Montrouge

Docteur Lucien DUPAGNE

Professeur Louis MAMAN

Vu, le Président d'Université de Paris

Professeur Christine CLERICI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Louis MAMAN

Comparaison des modèles dentaires imprimés en stéréolithographie et dépôt de fil

Résumé :

L'avènement du numérique dans les cabinets dentaires, amène aujourd'hui à s'équiper de plus en plus de matériels de Conception Fabrication Assisté par Ordinateur (CFAO) type usineuse et/ou imprimante 3D au sein même de ces structures. Nous avons choisi à travers cette étude de nous intéresser à l'impression 3D et plus particulièrement à la qualité d'impression de modèles dentaires par deux des technologies les plus distribuées sur le marché : la stéréolithographie et le dépôt de fil. Nous présenterons en premier lieu les différentes technologies d'impressions 3D existantes dans leurs globalités, tout en nous attardant sur la stéréolithographie et le dépôt de fil. Dans un second temps nous détaillerons les matériels utilisés au cours de cette étude, que ce soit pour l'acquisition (caméra optique Carestream CS3500), la fabrication (Formlabs 2 pour la stéréolithographie et Ultimaker 3 pour le dépôt de fil) et l'analyse des résultats (Logiciel GOM 2018). Nous développerons ensuite le protocole pour l'acquisition et la réalisation des différents modèles selon les technologies utilisées. Nous poursuivrons par la présentation des résultats obtenus lors des différentes manipulations ce qui nous mènera à la discussion de ces résultats. Nous terminerons par la discussion de la pertinence du protocole mis en place, ainsi que des avantages et inconvénients de chaque technologie appliquée au monde dentaire, afin que chacun puisse effectuer un choix lors de l'acquisition d'une imprimante 3D.

Discipline :

Prothèses dentaires

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

Conception assistée par ordinateur -- Dissertation universitaire ; Impression tridimensionnelle -- Dissertation universitaire ; CFAO, Systèmes de -- Thèses et écrits académiques ; Ingénierie -- Thèses et écrits académiques

English keywords (MeSH) :

Computer-Aided Design -- Academic Dissertation ; Printing, Three-Dimensional -- Academic Dissertation

Université de Paris
UFR d'Odontologie - Montrouge
1, rue Maurice Arnoux
92120 Montrouge