



HAL
open science

Justesse et précision des modèles de travail issus de l’empreinte optique

Édouard Sans

► **To cite this version:**

Édouard Sans. Justesse et précision des modèles de travail issus de l’empreinte optique. Chirurgie. 2015. dumas-01137478

HAL Id: dumas-01137478

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01137478>

Submitted on 24 Aug 2015

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.

Université de Bordeaux
Collège des Sciences de la Santé
UFR des Sciences Odontologiques

Année 2015

N°23

Thèse pour l'obtention du
DIPLOME D'ETAT de DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement par

Edouard SANS

Né le 22 Avril 1990 à Toulon (83), France

Le 27 Mars 2015

**Justesse et précision des modèles de travail
issus de l'empreinte optique**

Directeur de thèse

Docteur Jean-Philippe PIA

Membres du jury

Président	Mme M.J. BOILEAU	Professeur des Universités
Directeur	M. J.P. PIA	Assistant Hospitalo-Universitaire
Rapporteur	M. A. SOENEN	Attaché Hospitalo-Universitaire
Assesseur	M. C. BOU	Maitre de Conférences des Universités
Assesseur	Mme D. ORIEZ	Maitre de Conférences des Universités

UNIVERSITE BORDEAUX

Président

M. Manuel TUNON de LARA

COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE **UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE**

<i>Directeur</i>	Mme Caroline BERTRAND	58-02
<i>Directeur Adjoint – Chargé de la Formation initiale</i>	Mme Dominique ORIEZ	56-01
<i>Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche</i>	M. Jean-Christophe FRICAIN	57-02
<i>Directeur Adjoint - Chargé des Relations Internationales</i>	M. Jean-François LASSERRE	58-02

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Mme Caroline	BERTRAND	Prothèse dentaire	58-02
Mme Marie-José	BOILEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme Véronique	DUPUIS	Prothèse dentaire	58-02
M. J-Christophe	FRICAIN	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

Mme Elise	ARRIVÉ	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mme Cécile	BADET	Sciences biologiques	57-03
M. Etienne	BARDINET	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Michel	BARTALA	Prothèse dentaire	58-02
M. Cédric	BAZERT	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Jean-Pierre	BLANCHARD	Prothèse dentaire	58-02
M. Christophe	BOU	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
Mme Sylvie	BRUNET	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M. Sylvain	CATROS	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
M. Stéphane	CHAPENOIRE	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Jacques	COLAT PARROS	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Reynald	DA COSTA NOBLE	Parodontologie	57-01
M. François	DARQUE	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. François	DE BRONDEAU	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Yves	DELBOS	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Raphael	DEVILLARD	Odontologie conservatrice- Endodontie	58-01
M. Emmanuel	D'INCAU	Prothèse dentaire	58-02
M. Bruno	ELLA NGUEMA	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
M. Dominique	GILLET	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Jean-François	LASSERRE	Prothèse dentaire	58-02
M. Yves	LAUVERJAT	Parodontologie	57-01
Mme Odile	LAVIOLE	Prothèse dentaire	58-02

M. Jean-Marie	MARTEAU	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme Javotte	NANCY	Odontologie pédiatrique	56-01
Mme Dominique	ORIEZ	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Jean-François	PELI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. Philippe	POISSON	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M. Patrick	ROUAS	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Johan	SAMOT	Sciences bioogiques	57-03
Mlle Maud	SAMPEUR	Orthopédie dento-faciale	56-02
M. Cyril	SEDARAT	Parodontologie	57-01
Mlle Noélie	THEBAUD	Sciences biologiques	57-03
M. Eric	VACHEY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01

ASSISTANTS

Mme Audrey	AUSSEL	Sciences biologiques	57-03
M. Terence	BARSBY	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme Aurélie	BARSBY-EL-KHODER	Prothèse dentaire	58-02
M. Julien	BROTHIER	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	CLINKEMAILLIE	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	CONTREPOIS	Prothèse dentaire	58-02
M. Guillaume	CRESTE	Prothèse dentaire	58-02
Mme Clarisse	DE OLIVEIRA	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme Hélène	DENOST	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M. Guillaume	FENOUL	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Nicolas	GLOCK	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme Sandrine	GROS	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme Olivia	KEROUEDAN	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-02
Mme Alice	LE NIR	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme Karine	LEVET	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M. Alexandre	MARILLAS	Odontologie conservatrice - Endodontie	58-01
M. Matthieu	MEYER	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme Darrène	NGUYEN	Sciences biologiques	57-03
Mme Virginie	PANNEREC	Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
Mme Chloé	PELOURDE	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme Candice	PEYRAUD	Odontologie pédiatrique	56-01
M. Jean-Philippe	PIA	Prothèse dentaire	58-02
M. Mathieu	PITZ	Parodontologie	57-01
M. Clément	RIVES	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M. François	VIGOUROUX	Parodontologie	57-01

17/02/2015

A mon président de jury, Madame le professeur Marie-José BOILEAU.

- Professeur des Universités – Praticien hospitalier, sous section : 56-02
- Docteur en Chirurgie-Dentaire

Vous m’avez fait l’honneur d’accepter la présidence de cette thèse. Je me souviendrai de votre implication et sympathie au cours de mes années d’études.

Veuillez trouver l’expression de mes remerciements les plus sincères.

A mon directeur de thèse, Monsieur Jean-Philippe PIA.

- Assistant Hospitalo-Universitaire, sous section : 58-02
- Docteur en Chirurgie-Dentaire

Je vous remercie de m’avoir fait l’honneur de diriger cette thèse. Je vous serai reconnaissant pour tous les conseils prodigués durant les vacations hospitalières. Je me souviendrai de ce voyage en Belgique qui fut un super moment.

Je vous prie de trouver dans ce travail toute l’expression de ma gratitude.

A mon rapporteur de thèse, Monsieur Arnaud SOENEN.

- Attaché Hospitalo-Universitaire
- Ex-Assistant Hospitalo-Universitaire, sous section : 58-02
- Docteur en Chirurgie-Dentaire

Je vous serai reconnaissant pour avoir consacré votre temps à la relecture de ce travail. C’est un honneur d’avoir pu vous assister à votre cabinet.

Je continuerai à méditer sur cette belle phrase : «Un arbre qui donne trop, est un arbre qui se meurt ».

A mon assesseur de thèse, Monsieur Christophe BOU.

- Maître de conférences des Universités – Praticien hospitalier, sous section : 56-03
- Docteur en Chirurgie-Dentaire

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter de juger ce travail et j'en suis honoré. Je vous remercie pour votre implication dans cette thèse.

Et je suis reconnaissant pour votre dévouement total pour les étudiants.

Vous êtes un exemple de Pédagogie.

A mon assesseur de thèse, Mamade Dominique ORIEZ

- Maître de conférences des Universités – Praticien hospitalier, sous section 58-01
- Docteur en Chirurgie-Dentaire

Je vous remercie d'avoir bien voulu prendre place au sein de mon jury.

Merci de m'avoir toujours encouragé et de toute la gentillesse que vous avez porté à mon égard. Vous m'avez donné goût à l'Endodontie, plus généralement à notre métier.

Je vous adresse mes remerciements sincères et mon profond respect.

A Christophe SIREIX, de SIRISCAN

- Info-prothésiste

Merci de m'avoir accueilli dans ton laboratoire et mis à disposition tout ce qui m'était nécessaire. Je souhaite aussi remercier tous ceux qui ont pu m'aider au laboratoire au cours de mes manipulations.

A Maman et Papa qui ont toujours été présents pour moi. Si j'en suis là, c'est grâce à vous. Merci pour tout le bonheur que vous me donnez.

A Ben, mon grand frère qui me fera toujours rire. Tu es génial et je t'en remercie. Je te souhaite plein de bonheur avec Vanessa.

A Maïa, je sais que tu es fière de moi. Merci pour ton optimisme et tout ce que tu m'as apporté. Tu me manques, mais comme tu disais toujours « Il faut que ça aille ! ».

A Lucie, merci pour tout l'amour que tu m'apportes. On se marre vraiment ensemble, même pour un rien. Je sais que de belles années sont devant nous. Je t'aime.

A Catherine et Alain, merci pour tous ces moments quand j'étais petit.

A la famille de Papa, merci pour ces repas de famille sympas. Qu'il y en ait encore beaucoup.

A Bernard et Gaëlle, merci pour votre accueil à Locquirec. Je n'ai toujours pas changé d'avis : « Allez l'OM ! ».

A Danièle, François et Matthieu, merci de m'avoir accueilli aussi chaleureusement.

A Arnaud, tu fais partie de la famille. T'imagines qu'on va finir confrères, qui l'aurait dit ? Je remercie Corinne, Jacques et Romain pour être aussi gentils avec moi.

A Clément, Paupau et Pilou, je vous ai toujours connu et j'espère que ça va continuer. Merci à vos familles également pour tous ces moments partagés.

A Yohann (allias Tiger Woods) et Julien (allias Jim Furick), toutes ces parties de golf enflammées durant lesquelles on aura bien ri. J'espère qu'il y en aura encore beaucoup. Vous m'avez fait rêver avec tous vos voyages et j'ai pu un peu en faire partie à New-York.

A Hugo, on s'est rencontré la veille du concours de P1 et tu m'as fait rire. Je me suis dit : « Ce mec est incroyable ! ». Effectivement, tu l'es. On est arrivé à Bordeaux et on s'est mieux connu, on est devenu ami. Tu m'auras fait marrer avec tes frasques de soirées, les roses ramenées à 4h du mat', le VCub dans le salon et j'en passe. Vous allez vivre de belles années sous le soleil avec Ju.

A PA, comment auraient été mes études sans toi ? Tu nous as permis de nous éclater et faire rêver notamment avec ces soirées « mousse ». Sans parler de ces fameuses Pyramides qui sont devenues « infernales » avec le temps. On a passé de bons moments à Barcelone, au ski, à Bayonne...

A Guillaume, tu es à l'écoute des autres et toujours à fond dans ce que tu fais. Merci pour ça. Ton accent me fera toujours sourire. C'est bien l'accent basque ? Je te souhaite plein de bonheur avec Sisley.

CQFD

A Bégate, je me souviendrai des aventures à Peñíscola, du radiateur dans le dos et du cactus dans les chaussures de ski. Tu me fais rire. De belles années vous attendent avec Cécilou. Je remercie Jocelyne et Didier pour leur accueil aussi sympathique.

A Emile, tu resteras mon casseur de cailloux préféré. Tu m'impressionnes par ta gentillesse, ta volonté et ton sérieux. Merci pour m'avoir écouté. On se sera bien poilé à l'hôpital et encore plus en Belgique. Plein de bonnes choses à Marie-Sophie et toi.

A Boubouch', on se rappellera de nos vacances hospitalières. Ces fous rires terribles qui nous obligeaient à sortir du cabinet. La Belgique n'a été que rigolade du début à la fin. Merci pour tous ces moments et une belle vie t'attend aux cotés de Nadège.

A Micka, on se s'est connu un peu tard mais on a bien rattrapé le temps perdu. Tu me fais rire en soirée avec toute ta musique et tes attaques.

A Val, la « force tranquille » est selon moi ce qui te définit le mieux. On a fait de belles soirées ensemble. Vous allez vivre de super moments avec Julia.

A Tintim, notre volleyeur pro du groupe. Malheureusement, on n'a pas pu faire de soirées volley et on le regrette un peu tous. Peut être qu'on se retrouvera sur l'île Intense autour d'une Dodo.

A Anne-So, merci d'avoir toujours été là et de m'avoir écouté depuis le début. Tu me fais rire avec ton côté « blonde ». J'espère qu'on se reverra sous les tropiques avec Alex et sa GoPro accrochée sur le front.

A Aude, merci pour ta gentillesse et ton amitié. Depuis la P2, on se sera quand même bien marré au ski, à Bayonne, à Cognac, en soirées... Je te souhaite plein de bonnes choses avec Stéphanou.

A Mappy, tu as toujours le sourire et c'est top ! Ne change pas. Merci pour ces soirées à Hossegor.

A Christophe, tu m'auras bien fait rire avec tous tes gadgets depuis la P1. J'espère que t'en auras encore plein d'autres à me montrer. Merci pour les macatias de Cilaos.

A Kévin, on a été en binôme quelques mois et je pense qu'on s'est bien marré. Malgré ce fameux point de contact, je sais que tu seras un super praticien.

A Lucas, Matthieu, Guillaume et Camille. Merci pour ces bonnes soirées qu'on peut passer ensemble.

A Anaïs, Clara, Noémie, Antoine et Claudine. C'est vraiment gentil d'être venus m'aider alors que vous n'étiez pas obligés. Merci beaucoup.

A Loïc, tu m'as montré combien ce métier pouvait être passionnant. Je t'en suis reconnaissant. Ton « filleul » !

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	9
TABLE DES ILLUSTRATIONS	10
LISTE DES ABRÉVIATIONS.....	12
I. INTRODUCTION.....	13
II. GENERALITES	14
1. Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO).....	14
1. Les différents types de CFAO (2)	14
2. Les différentes étapes de la CFAO	15
2. Problématique du modèle physique	19
1. La méthode conventionnelle	19
2. La méthode numérique.....	21
III. LES MODELES PAR PROTOTYPAGE RAPIDE	23
1. Le Prototypage Rapide	23
2. Les techniques.....	25
1. L'usinage	25
2. La stéréolithographie (SLA).....	25
3. La technique Fused Deposition Modeling (FDM)	27
4. L'impression 3D	28
5. La Laminated Object Manufacturing (LOM)	29
6. La technique Inkjet	30
7. La technique Polyjet.....	31
IV. EXPERIMENTATION	33
1. Objectifs.....	33
2. Matériel et méthode	34
1. Matériel.....	34
2. Méthode.....	36
3. Critères d'exclusion	37
4. Recueil de données.....	37
3. Analyse statistique	38
4. Résultats.....	38
5. Discussion.....	60
V. CONCLUSION	62
BIBLIOGRAPHIE.....	63

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : VUE D'UNE SURFACE ACQUISE	17
FIGURE 2 : PRINCIPE DU PROTOTYPAGE RAPIDE.....	23
FIGURE 3 : TECHNIQUES DE PROTOTYPAGE RAPIDE	24
FIGURE 4 : TECHNIQUE D'USINAGE	25
FIGURE 5 : TECHNIQUE DE STEREO LITHOGRAPHIE	26
FIGURE 6 : TECHNIQUE DE FUSED DEPOSITION MODELING.....	27
FIGURE 7 : TECHNIQUE D'IMPRESSON 3D	28
FIGURE 8 : TECHNIQUE LOM.....	29
FIGURE 9 : TECHNIQUE D'INKJET	30
FIGURE 10 : TECHNIQUE DE POLYJET	31
FIGURE 11 : RECAPITULATIF DES TECHNIQUE DE PROTOTYPAGE RAPIDE.....	32
FIGURE 12 : SCHEMA DU PROTOCOLE EXPERIMENTAL	33
FIGURE 13 : PROPRIETES DU FUJIROCK EP OPTIXSCAN® (D'APRES LA FIRME GC™).....	35
FIGURE 14 : EXACTITUDE, JUSTESSE ET PRECISION (D'APRES JEAN FREDERIC GUTH).....	37
FIGURE 15 : SET-UP DU LOGICIEL GEOMAGIC QUALIFY 12®	38
FIGURE 16 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL1/STL2).....	40
FIGURE 17 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL1/STL2).....	41
FIGURE 18 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL1/STL3).....	42
FIGURE 19 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL1/STL3).....	43
FIGURE 20 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL1/STL4).....	44
FIGURE 21 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL1/STL4).....	45
FIGURE 22 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL1/STL5).....	46
FIGURE 23 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL1/STL5).....	47
FIGURE 24 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL2/STL3).....	48
FIGURE 25 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL2/STL3).....	49
FIGURE 26 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL2/STL4).....	50

FIGURE 27 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL2/STL4).....	51
FIGURE 28 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL2/STL5).....	52
FIGURE 29 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL2/STL5).....	53
FIGURE 30 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL3/STL4).....	54
FIGURE 31 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL3/STL4).....	55
FIGURE 32 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL3/STL5).....	56
FIGURE 33 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL3/STL5).....	57
FIGURE 34 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES ET NUAGE DE POINTS (STL4/STL5).....	58
FIGURE 35 : TESTS DE STUDENT SUR LES MOYENNES ET ECARTS-TYPES (STL4/STL5).....	59
FIGURE 36 : EXACTITUDE DES TECHNIQUES (D'APRES JEAN-FREDERIC GUTH)	62

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3D : Trois dimensions

ABS : Acrylonitrile Butadiene Styrene

AWS : Active Wavefront Sampling

CAO : Conception Assistée par Ordinateur

CFAO : Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur

CNC : Computerized Numerically Controlled

DVS : Digital Veneering System

FAO : Fabrication Assistées par Ordinateur

FDM : Fused Deposition Modeling

LOM : Laminated Object Manufacturing

MR : Modèle de référence

PE : Porte-empreinte

RP : « Rapid Prototyping » ou Prototypage Rapide

SLA : Stéréolithographie

SLS : Selective Laser Sintering

STL : Standard Tessellation Language

UV : Ultra-Violet

I. INTRODUCTION

Le développement des technologies numériques a permis ces dernières années une modernisation de l'exercice dentaire. La réalisation d'une prothèse passe toujours par une prise d'empreinte. Cette étape doit enregistrer de façon fidèle une situation existante en bouche afin d'obtenir une adaptation finale de la prothèse. Cette précision influence la longévité du traitement réalisé (1). Un manque d'adaptation peut être source de problèmes carieux, parodontaux, de descellement et à terme compromet le travail effectué (2). La prise d'empreinte et son traitement sont des étapes clefs.

L'empreinte physico-chimique conventionnelle peut être remplacée par l'empreinte optique dans certaines situations cliniques. Cette nouvelle méthode de prise d'empreinte tend vers le développement de la numérisation de la chaîne prothétique.

L'apparition du Prototypage Rapide : technique de production rapide à partir de données numériques, a permis de nouvelles perspectives pour l'élaboration de modèles de travail issus de ces données numériques.

L'objectif de cette étude est de quantifier les variations dimensionnelles qui peuvent exister entre différents types de modèles physiques. Le but de notre recherche après avoir décrit les bases fondamentales des techniques numériques, a été de comparer les répliques obtenues par Prototypage Rapide (issues d'une empreinte optique) et les modèles en plâtre (issus d'une empreinte conventionnelle).

II. GENERALITES

1. Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO)

L'apport des nouvelles technologies a entraîné une modification des étapes de réalisation d'une prothèse. Le technicien de laboratoire peut concevoir sa pièce prothétique sur ordinateur, on parle de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Et de la fabriquer à partir de ces données numériques, c'est la Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO).

Le terme de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) est utilisé quand la CAO et la FAO sont réunis pour réaliser la prothèse.

1. Les différents types de CFAO (3)

On distingue 3 types:

- la CFAO indirecte : le praticien effectue une empreinte conventionnelle qu'il transmet ensuite au laboratoire de prothèse. A l'aide d'un scanner de laboratoire, les données issues de l'enregistrement sont acquises de façon numérique. Conception et fabrication sont réalisées au laboratoire.

- la CFAO semi-directe : le praticien réalise une empreinte optique à l'aide d'une caméra intra-buccale et transmet le fichier informatique acquis à son prothésiste. Conception et fabrication sont réalisées au laboratoire.

- la CFAO directe : acquisition, conception et fabrication sont effectués au sein du cabinet dentaire. L'acquisition est faite par caméra intra buccale avant que le praticien ne conçoive la pièce prothétique sur son logiciel dédié. Celle-ci terminée, une usineuse de cabinet élabore la prothèse.

2. Les différentes étapes de la CFAO

La CFAO peut être distinguée en 3 étapes distinctes : acquisition, conception et fabrication.

1. L'acquisition

C'est la première étape de la CFAO. Elle a pour but de transformer des données physiques (anatomie de l'arcade dentaire, limite périphérique de la préparation...) en informations numériques grâce à une caméra intra-buccale ou à un scanner de laboratoire.

- Les scanners et caméras d'enregistrement

Leur rôle est de réaliser le codage numérique en enregistrant le plus grand nombre de points possibles. Plus ce nombre sera grand, plus le scanner est performant. Différentes technologies, avec ou sans contact lors de l'enregistrement, peuvent être utilisées pour réaliser l'acquisition en Trois Dimensions (3D).

- le palpeur mécanique (avec contact) :

Il parcourt l'ensemble de la surface à enregistrer (4). Il est difficile à utiliser en bouche et son utilisation est privilégiée pour un usage de laboratoire. Cette technique est supplantée par les méthodes de lecture optique. (5)

- l'imagerie à rayons X (sans contact)

Elle permet l'acquisition de données 3D, mais l'irradiation engendrée est importante. En plus de présenter un rapport bénéfice/risque non envisageable pour le patient (6), cette technique peut présenter des artefacts d'enregistrement (7) qui la rendent inutilisable pour la réalisation d'une prothèse dentaire. Sa résolution (nombre de points enregistrés par unité de surface) est trop faible pour obtenir une acquisition de données fiable.

- l'imagerie confocale (sans contact)

Elle est basée sur la projection et la réflexion d'un faisceau lumineux empruntant une trajectoire unique (i.e. : *iTero*[®] de la firme *Cadent*[™]). Elle est capable d'enregistrer les angles prononcés et les cavités profondes (5).

- la triangulation laser (sans contact)

Son principe repose sur l'émission d'une lumière (rayonnement incident) dont les caractéristiques sont connues. La surface éclairée réfléchit une partie du rayonnement : c'est cette partie réfléchi qui est ensuite mesurée par une caméra photosensible (4) (i.e. : *CEREC Bluecam*[®] de la firme *Sirona*[™] ; *CS 15000*[®] de la firme *Carestream*[™]).

L'émetteur du laser, le point lumineux et la caméra forment un angle connu ce qui permet à l'ordinateur de calculer la position en 3D du point enregistré (5).

- la méthode de focalisation/défocalisation non colinéaire (sans contact)

Parmi cette nouvelle technique d'acquisition dynamique, on distingue l'Active Wavefront Sampling (AWS). Elle allie la triangulation et la focalisation/défocalisation (4) (i.e. : *Apollo DI*[®] de la firme *Sirona*[™] ; *INEOS X5*[®] de la firme *Sirona*[™] ; *True Definition Scanner*[®] de la firme *3M*[™]). La caméra réalise la mise au point sur une zone de l'arcade. Cette zone étant limitée, la profondeur de champ est réduite et donc l'erreur est faible (8). Le balayage de l'arcade zone par zone permet d'acquérir l'arcade entière en données numériques.

La surface enregistrée est convertie en un ensemble de triangles (3, 9). On parle de fichier codé au format Standard Tessellation Language (fichier STL).

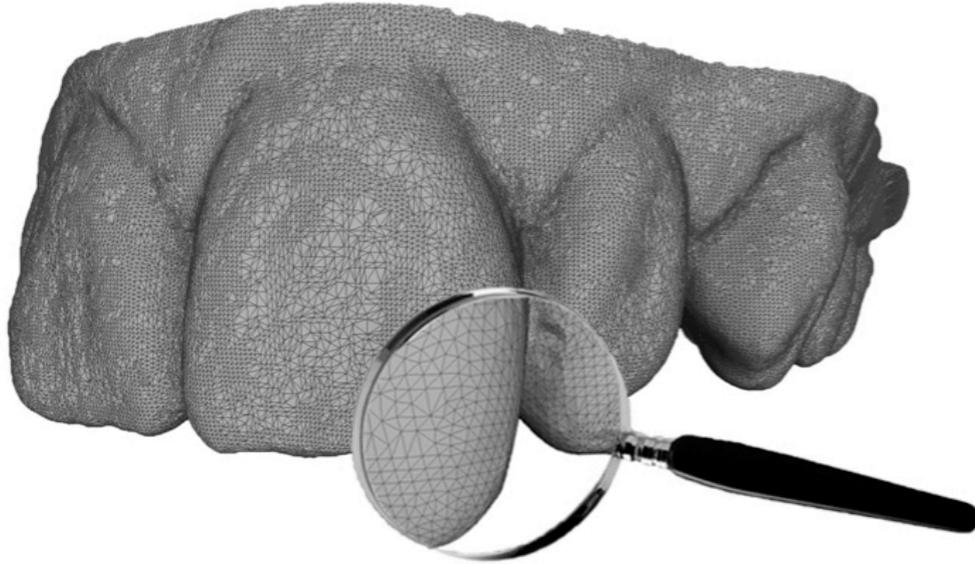


Figure 1 : Vue d'une surface acquise

- Le poudrage ou « coating »

Parmi l'ensemble des systèmes, certains nécessitent une préparation de la surface à enregistrer par un poudrage à base de dioxyde de titane. Il a pour but de limiter la réflexion de lumière lors de l'acquisition en matifiant la surface.

La réflexion diffère selon le substrat, complète pour le métal (ce qui rend difficile l'empreinte d'une couronne coulée), partielle pour l'émail et moindre pour les résines composites. (6, 10).

Cette étape de poudrage permet une reproductibilité de l'enregistrement par homogénéisation des surfaces (11). Il forme une couche superficielle de $25\mu\text{m}$ que le logiciel d'acquisition prend en compte lors de l'élaboration de l'image virtuelle.

Le poudrage nécessite un temps d'apprentissage, car un défaut ou un excès de poudrage sont source d'artefacts.

Un défaut de poudrage peut empêcher l'acquisition des surfaces. Alors qu'un excès provoque une accumulation au niveau du sulcus et des angles de préparation faussant l'empreinte (8).

Une fois acquis, les modèles 3D peuvent être stockés et transférés indéfiniment sans dégradation et avec une manipulation aisée (12-14).

2. La conception :

Un logiciel adapté au fichier enregistré est utilisé pour pouvoir éditer et manipuler l'acquisition 3D. Certains programmes informatiques s'appuient sur la morphologie des dents adjacentes pour établir celle de la prothèse : c'est la technologie biogénérique. Alors que d'autres logiciels proposent des formes pré-enregistrées dans une banque de données. (15)

3. La fabrication :

Elle suit directement le temps de la conception. Cette étape peut intervenir au cabinet ou au laboratoire de prothèse.

Lorsque la FAO est réalisée au cabinet, on parle de système « in-office ». Le praticien possède une machine effectuant l'usinage de ses pièces prothétiques. Le CEREC® de Sirona™ est le premier système à avoir proposé une CFAO complète au cabinet.

Cependant certaines restaurations ne peuvent être réalisées au cabinet et doivent être délocalisées vers le laboratoire de prothèse, on parle de système « out-office ». Le praticien envoie à son prothésiste les données numériques par mail ou par une plateforme réservée au système utilisé (i.e. : *CEREC Connect*®, Sirona™ ; *3M Connection Center*®, *3M*™ ; *CS Connect*®, *Carestream*™). La conception peut autant être réalisée par le dentiste ou le prothésiste avant l'usinage.

Même si la chaîne CFAO s'oriente vers une continuité numérique jusqu'à l'élaboration finale de la pièce prothétique, certaines conditions et impératifs cliniques imposent l'utilisation d'un modèle physique.

2. Problématique du modèle physique

1. La méthode conventionnelle

Majoritairement, l’empreinte est réalisée au fauteuil à l’aide d’un matériau d’empreinte et un porte-empreinte (PE). Elle est ensuite décontaminée avant d’être envoyée au laboratoire. Le prothésiste coule cette empreinte à l’aide d’un matériau de coulée (plâtre ou résine).

1. Le matériau d’empreinte

Le matériau d’empreinte idéal doit enregistrer les détails, être facile à mettre en œuvre, être peu sensible aux variations hydriques et être stable dans le temps. Ses temps de travail et de prise doivent être connus par le praticien et le prothésiste.

2. Le porte-empreinte

Le porte-empreinte utilisé doit être :

- rigide et indéformable : pour assurer la compression et donc l’étalement du matériau sur les structures à enregistrer. (16)
- adapté : l’espace entre la surface enregistrée et le bord du porte-empreinte doit être compris entre 2 et 4 mm. (17-19)
- encollé : pour augmenter la rétention et éviter un décollement partiel ou total du matériau d’empreinte. (17)

L’utilisation d’un PE individualisé n’augmente pas la précision de l’empreinte par rapport à un PE standard si ce dernier est rigide, indéformable, encollé et correctement ajusté. (20)

Le retrait du porte-empreinte mal conduit provoque des déformations. Il se fait de façon brève, uniaxiale en prenant appui sur le matériau pour éviter une désolidarisation avec le porte-empreinte. (18)

3. Le plâtre de coulée

Le plâtre est un biomatériau minéral dont la composition chimique est de l'hémihydrate de sulfate de calcium : $\text{CaSO}_4, \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$. Il a la caractéristique de porter le même nom en produit initial qu'en produit final.

Mis en présence d'eau le plâtre durcit: c'est le phénomène de prise.

Ce temps de prise varie en fonction de facteurs physiques (température, rapport eau/poudre, temps de spatulation, taille des particules) et de facteurs chimiques (accélérateurs, retardateurs). Il est important de connaître ce temps pour optimiser sa mise en œuvre.

Cette prise est accompagnée d'une réaction exothermique du plâtre et un phénomène d'expansion, influencée par les mêmes facteurs que le temps de prise.

Il existe 2 plâtres différents : le plâtre α pour la coulée des modèles et le plâtre β pour l'empreinte primaire chez l'édenté total. Ces plâtres n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques ni les mêmes caractéristiques d'utilisation.

Seul le plâtre α est utilisé en laboratoire, on l'appelle également plâtre à moulage ou plâtre dur. On en distingue plusieurs types. Le plâtre de type IV est le « gold standard » pour la coulée des modèles en prothèse fixée.

Avant la coulée, le prothésiste réalise un coffrage de l'empreinte. Plâtre et eau sont pesés et spatulés sous vide. L'empreinte est ensuite coulée.

Le temps de prise est compris entre 5 et 8 minutes. Le durcissement n'étant complet qu'entre 30 et 60 minutes selon les données du fabricant.

Le technicien de laboratoire doit pouvoir manipuler le modèle et travailler dessus sans le dégrader. Afin d'améliorer la résistance à l'abrasion et aux rayures, le prothésiste peut appliquer une couche de cyanoacrylate sur le modèle qui permet d'augmenter la dureté (30%). La surépaisseur créée est négligeable (1 à 1,5 μm)

Pour augmenter les propriétés physique, des plâtres synthétiques ont été mis au point avec une dureté Brinell supérieure de plus de 30% par rapport aux plâtres minéraux, une expansion 3 fois plus faible avec une résistance à l'abrasion doublée. Les modèles ne sont pas dégradés au cours des réglages d'occlusion sur articulateur.

La prise d’empreinte est sujette à variations tout au long de son traitement :

- mélange mal dosé ou mal amalgamé
- déformation du matériau
- porte-empreinte non adapté
- décollement du matériau du porte-empreinte
- étape de décontamination
- temps de traitement limité de l’empreinte une fois réalisée
- défaut lors de la coulée

Toutes ces étapes peuvent être source d’erreur car elles sont opérateurs-dépendantes. La CFAO permet une mécanisation de la chaîne prothétique et réduit les erreurs.

2. La méthode numérique

L’empreinte optique permet de s’affranchir de la réalisation d’un modèle physique dans certaines conditions. Les couronnes unitaires monolithiques, les bridges monolithiques, les inlays, les onlays et les inlay-cores peuvent être fabriqués selon une conception virtuelle pure. (15)

Certaines situations cliniques impliquent la nécessité d’un modèle physique: couronnes stratifiées, bridges stratifiés, éléments pluraux et facettes stratifiées.

Le prothésiste peut soit concevoir et fabriquer l’armature de la prothèse sur ordinateur ; il procède ensuite à la stratification d’une céramique feldspathique cosmétique sur le modèle.

Soit réaliser un « cut back » (retrait d’une épaisseur de matériau suivi d’une stratification feldspathique) sur sa pièce monolithique réalisée par CFAO.

Un système a été mis au point de la société 3M™ afin de réaliser les cas esthétiques par CFAO : c’est le système Lava Digital Veneering System® (DVS®), 3M™. Son principe repose sur l’usinage d’une chape en zircone et d’une coque esthétique en vitrocéramique (21, 22).

Ces deux éléments sont ensuite solidarités par un matériau dit « céramique de fusion » après cuisson. Un maquillage externe est réalisé à l'aide de céramiques cosmétiques et la couronne est à nouveau passée au four.

Dans certains cas plus complexes une analyse de l'occlusion est indispensable. Le développement des arcs faciaux digitaux et des articulateurs virtuels permettent cette étude occlusale sur ordinateur (23-25). Le but de ces nouvelles technologies est d'améliorer la communication entre le dentiste et son technicien de laboratoire, de simuler la physiologie statique et dynamique du patient et permettre une navigation en 3D (26). D'autres études doivent être menées pour pouvoir conclure sur l'efficacité de ces méthodes.

Bien que des solutions sont recherchées pour traiter tous les cas entièrement de manière numérique, certaines conditions cliniques peuvent imposer de travailler sur un modèle physique.

III. LES MODELES PAR PROTOTYPAGE RAPIDE

1. Le Prototypage Rapide

Le principe du Prototypage Rapide ou « Rapid Prototyping » (RP) repose sur la décomposition d'une construction 3D complexe en un ensemble de coupes horizontales simples. La fabrication passe par la création de couches dans le plan horizontal (x ; y) (27). La dimension verticale « z » résulte de la superposition de ces différentes couches.

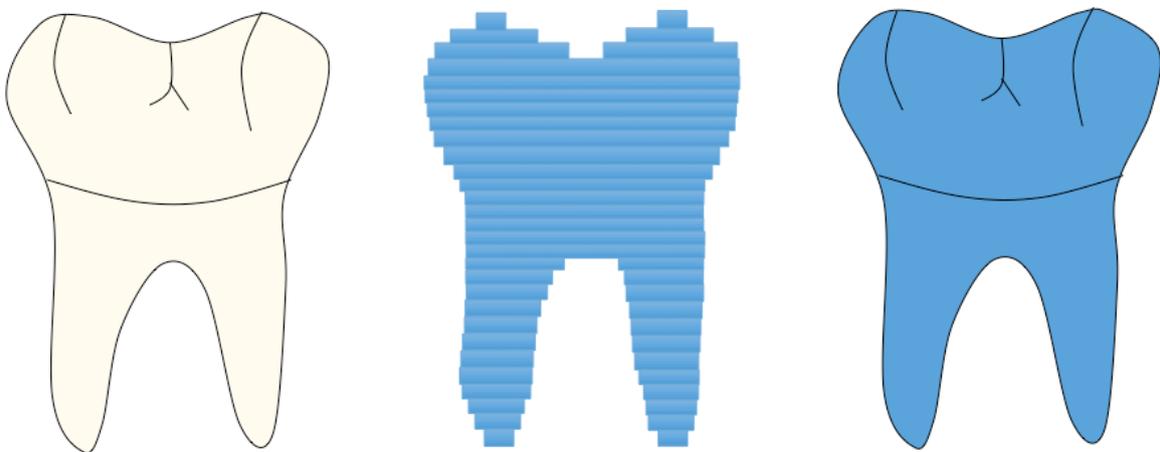


Figure 2 : Principe du Prototypage Rapide

Les matériaux utilisés sont nombreux et variés : métaux, polymères plastiques, céramiques, cires et bois.

Cette méthode de fabrication peut être réalisée selon 2 procédés:

- par soustraction: l'usinage (Computerized Numerically Controlled ou CNC)
- par addition: la stéréolithographie (SLA)
 la fusion par frittage laser (Selective Laser Sintering ou SLS)
 le dépôt de matière en fusion (Fused Deposition Modeling ou FDM)
 l'impression 3D
 la technique LOM (Laminated Object Manufacturing)
 la technique Inkjet
 la technique Polyjet

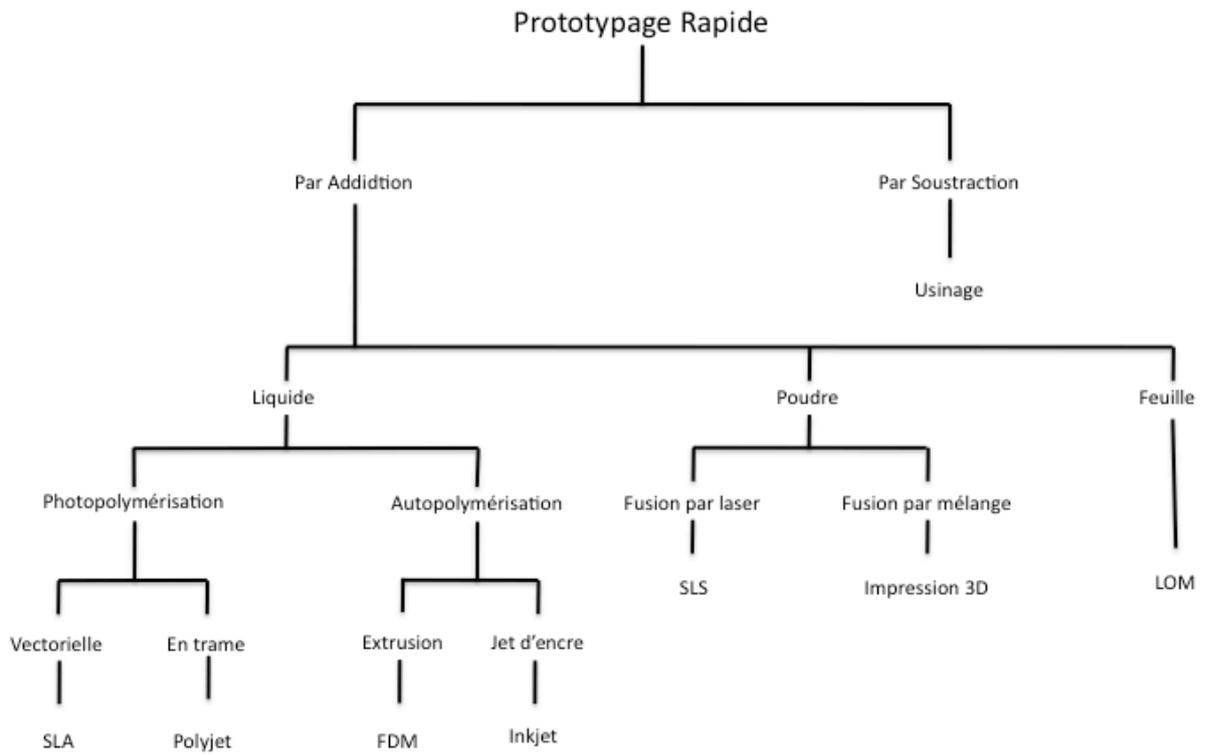


Figure 3 : Techniques de Prototypage Rapide

L'usinage, la SLA, la FDM, l'impression 3D, la LOM, la technique Inkjet et la technique Polyjet permettent la réalisation de modèles dentaires.

2. Les techniques

1. L'usinage

Le principe de l'usinage est de fraiser un bloc de matériau pour lui donner une forme souhaitée (15). Un bloc de matériau est positionné dans une usineuse, l'ordinateur le calibre et démarre le fraisage (précision de $12\mu\text{m}$). Cet usinage se fait selon plusieurs axes, et en fonction de l'usineuse le nombre d'axes peut changer (3, 4 ou 5 axes). (5)

Cette technique peut présenter un certain manque de précision au niveau des collets des dents et des espaces inter-dentaires car les fraises ne peuvent pas usiner de façon nette dans ces zones de contre-dépouille. (28)

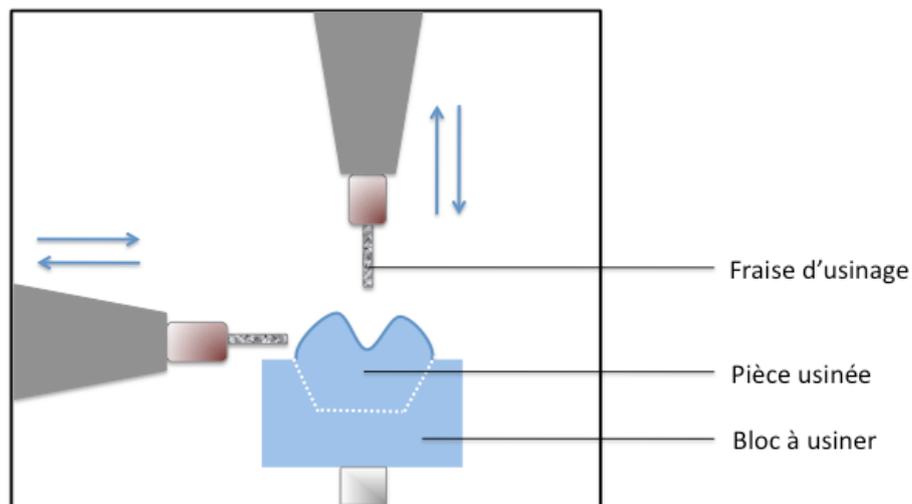


Figure 4 : Technique d'usinage

2. La stéréolithographie (SLA)

La stéréolithographie (SLA) est la première méthode additive de Prototypage Rapide à avoir été développée (Charles Hull en 1986) (29, 30). Les matériaux pour la production de modèles 3D sont des photopolymères (polyacrylique ou époxy). (30)

Ce système est composé d'un bain de résine liquide photopolymérisable, d'une plate-forme de fabrication et d'un laser ultra-violet (UV). Lorsque le laser UV impacte la résine acrylique liquide, une couche de résine est polymérisée (29, 31). L'épaisseur de cette couche est fonction de la puissance de la source UV et de la rapidité de scannage. La plate-forme descend d'une faible distance connue (entre 25 et 100 μm) et le processus est répété jusqu'à l'obtention du modèle physique définitif (32). La propriété auto-adhésive du matériau permet aux différentes couches d'être liées entre elles (29, 31).

Une fois terminée la pièce est placée dans un four à UV stroboscopique pour une polymérisation complète de la résine acrylique et une amélioration de ses propriétés mécaniques (32).

Certains objets peuvent présenter des surplombs et/ou des contre-dépouilles, et nécessitent des supports de fabrication afin d'obtenir la forme souhaitée sans déformation.

Les avantages de la SLA sont la précision du laser UV, la possibilité de réaliser des détails (jusqu'à 10 μm), un état de surface lisse avec une microgéographie de surface striée. La SLA est généralement considérée comme étant la technique avec la plus grande précision. L'objet obtenu est résistant et léger (29).

Les inconvénients sont le coût de la machine, des matériaux, et la déformation au bout de quelques mois si le milieu de conservation est humide. (28, 33)

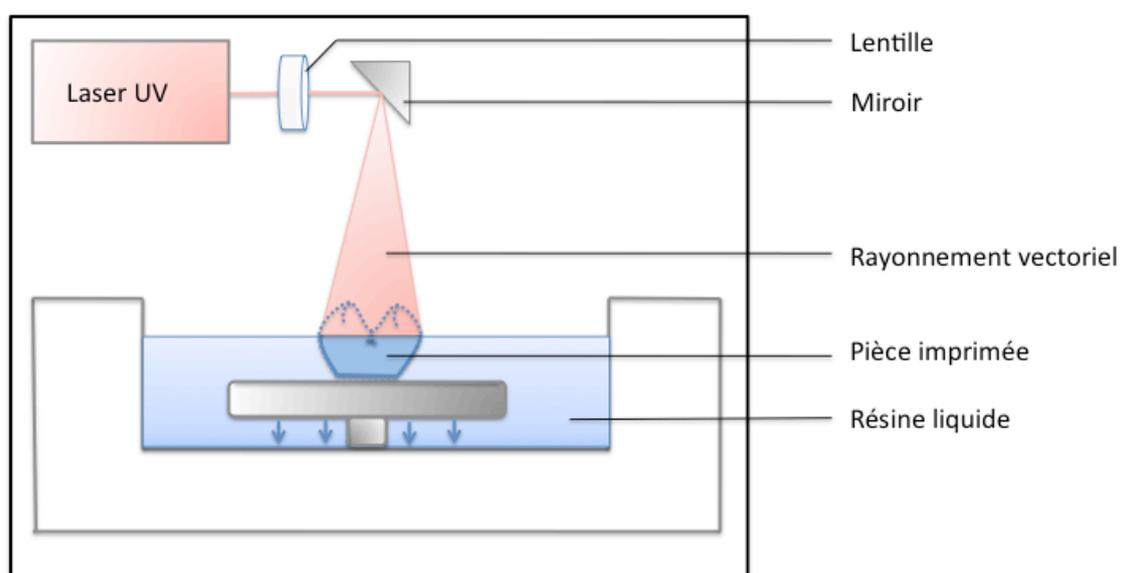


Figure 5 : Technique de stéréolithographie

3. La technique Fused Deposition Modeling (FDM)

Le dépôt de matière en fusion (Fused Deposition Modeling ou FDM) est la technologie la plus utilisée après la SLA. Elle a été mise au point par Scott Crump à la fin des années 80 (30). Le matériau utilisé est sous forme de filament, il est ensuite chauffé pour devenir liquide. L'ensemble du système est maintenu à température pour que le filament soit proche de sa fusion. Il est déposé par une buse d'éjection.

Le matériau le plus utilisé est l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). C'est un matériau rigide, sans expansion et stable dans le temps (28, 31, 34).

Une buse réalise des apports liquides couche par couche avec une épaisseur comprise entre $178\mu\text{m}$ et $356\mu\text{m}$. La précision de système est de $127\mu\text{m}$. (28, 31)

La solidification du matériau thermoplastique n'est pas immédiate. Pour les objets avec des surplombs, un système de support est nécessaire. Une seconde buse dépose le matériau de support, de couleur différente et qui n'adhère pas afin de pouvoir le distinguer de l'objet fabriqué. Ce matériau sera éliminé soit à l'aide de solvant, d'eau ou en le fracturant. (28) Les matériaux support peuvent être les polycarbonates, l'ABS et les cires.(30)

L'avantage est la rapidité de production. Les inconvénients sont la nécessité d'un matériau thermoplastique, une surface rugueuse, la taille réduite des pièces produites, la densité n'est pas totale (29) et la nécessité d'un support.

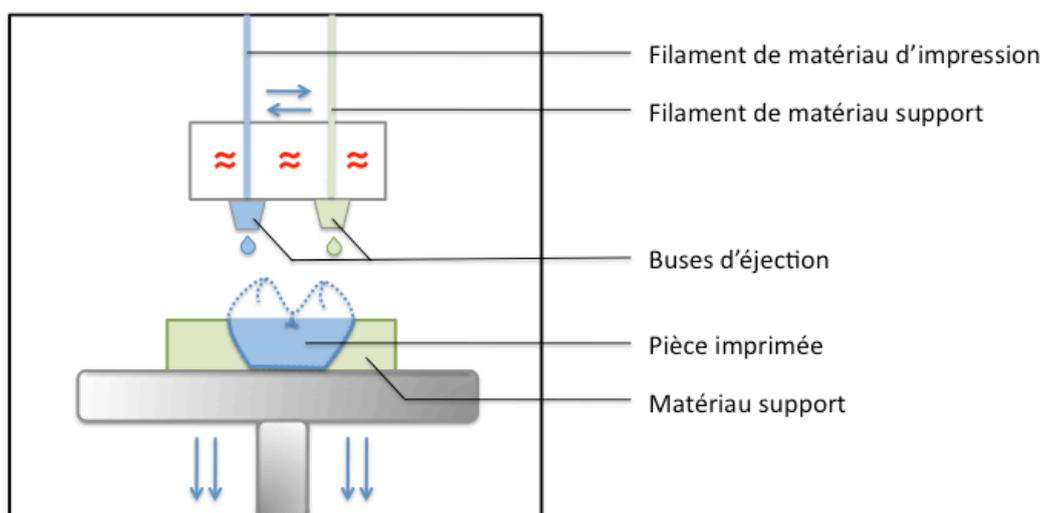


Figure 6: Technique de Fused Deposition Modeling

4. L'impression 3D

L'impression 3D est une technique par dépôt de monomère sur de la poudre polymère afin d'initier la polymérisation. La tête de l'imprimante se situe au dessus d'une chambre remplie de poudre et se déplace dans le plan (x ; y) pour déposer de façon sélective le monomère. Une fois la couche réalisée, la chambre descend et un rouleau apporte de la nouvelle poudre dans la chambre. Le processus s'effectue jusqu'à l'obtention de l'objet (31). La précision est de 200µm dans le plan (x ; y) et de 100µm sur l'axe z. (35)

Cette méthode ne nécessite pas de support car l'objet est plongé dans le bain de poudre qui fait office de support. La poudre non polymérisée est aspirée et réutilisée. Cette technique provoque peu de perte de matériau. L'objet subi ensuite un traitement à base de cyanoacrylate pour renforcer sa structure (30, 36).

Le coût est réduit tant pour la machine que pour l'impression de la pièce (3 fois moins élevé que la SLA) (35, 37).

Les objets obtenus peuvent être durs, mous ou flexibles. L'état de surface est rugueux de par la présence d'agrégats poudre/liquide.

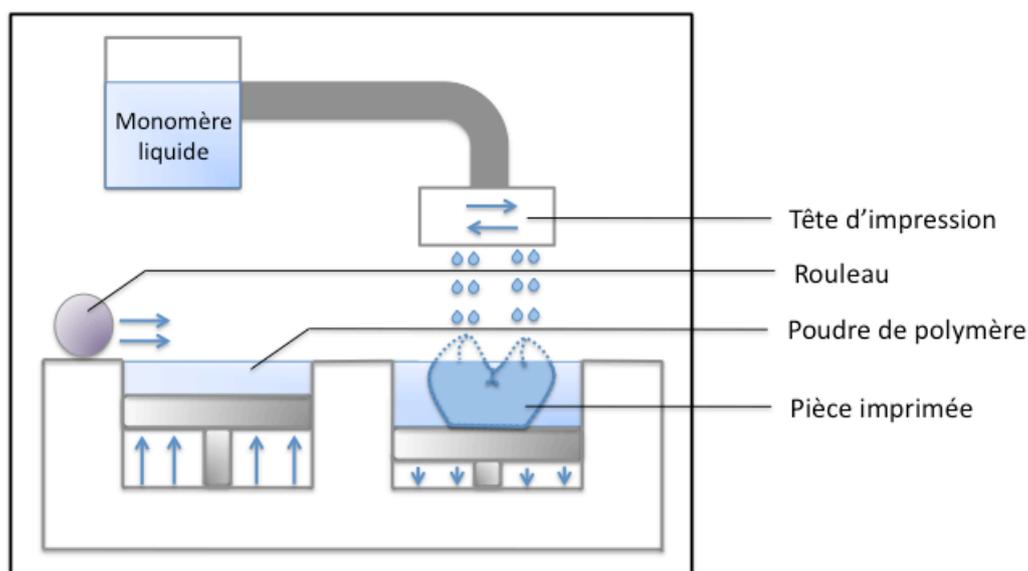


Figure 7 : Technique d'impression 3D

5. La Laminated Object Manufacturing (LOM)

Elle a été développée par Helisync. Elle utilise un laser CO₂, un matériau sous forme de feuille et un rouleau chauffé.

Le matériau est placé sur la plate-forme de fabrication. Le laser frappe la feuille et la découpe. La plate-forme descend, une nouvelle feuille est déroulée puis touchée par le laser. Le rouleau chauffé vient compresser les différentes feuilles et les unir grâce à un adhésif thermo-sensible. La précision est de 127 µm dans le plan (x ; y) et de 51 µm sur l'axe z (31).

Pas besoin de support dans cette méthode, car le papier reste autour de la découpe. Le temps de fabrication est court (5 à 10 fois plus rapide que les méthodes classiques de prototypage) et son coût est faible. (38)

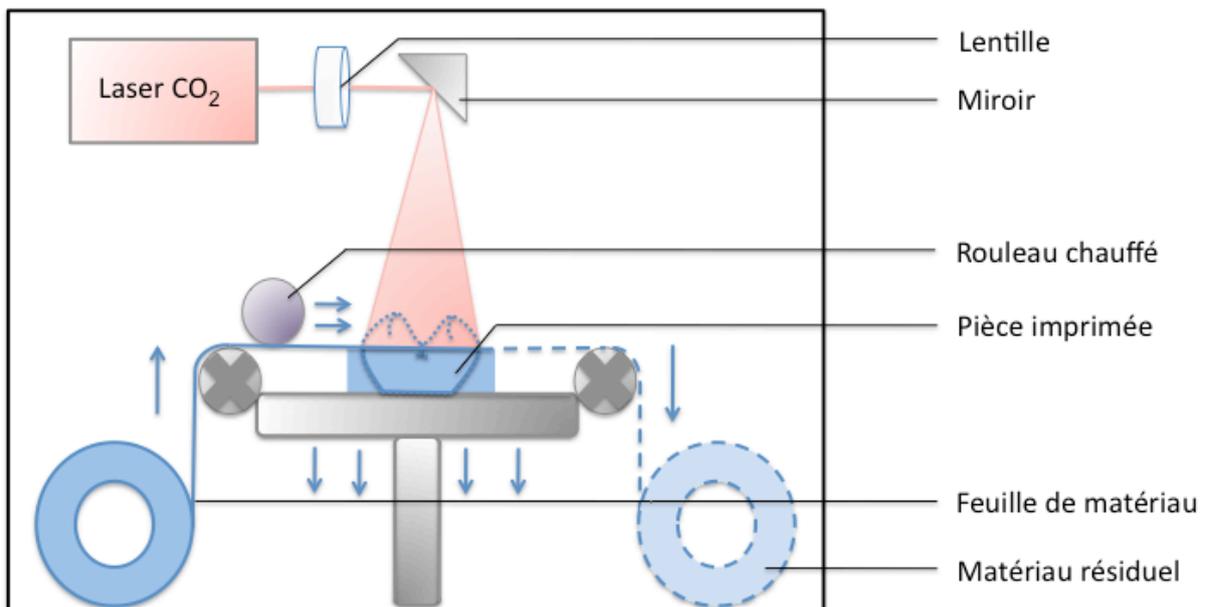


Figure 8 : Technique LOM

6. La technique Inkjet

Le système Inkjet est une technologie qui ressemble de près au système d'impression 2D classique. Elle utilise un matériau thermoplastique type polyuréthane conservé sous forme liquide et déposé couche par couche. Entre chaque couche, un fraisage est réalisé pour que chaque couche ait une épaisseur uniforme. Les particules persistantes sont éliminées par aspiration. (29)

Comme le matériau de l'objet ne se solidifie pas immédiatement une fois déposé, un support de fabrication est nécessaire.

L'objet et le matériau support sont gardés en fusion dans 2 réservoirs distincts avec chacun sa propre buse d'éjection.

Les avantages sont la précision de fabrication ($12\mu\text{m}$, équivalent à l'usinage (29)), la faible rugosité de surface ($0,8$ à $1,6\mu\text{m}$), la finesse des couches et le coût réduit (31).

L'inconvénient majeur est la lenteur du processus pour des pièces de grande taille. La machine est bruyante à cause du fraisage et n'est utilisable qu'avec un nombre réduit de matériaux.

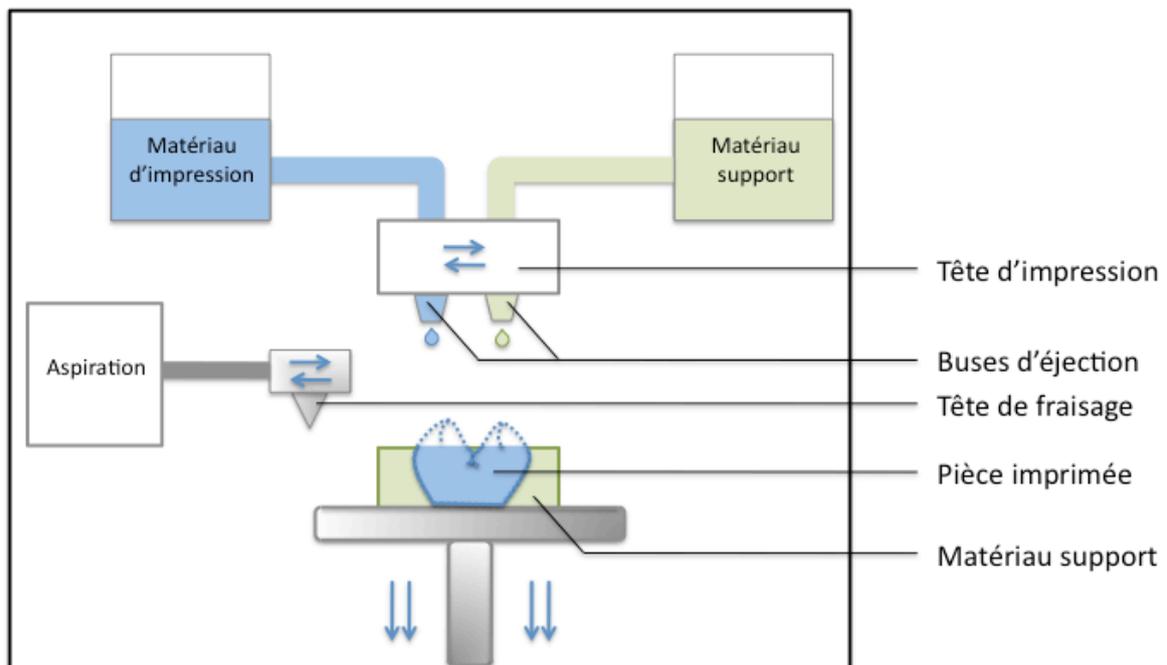


Figure 9 : Technique d'Inkjet

7. La technique Polyjet

La technique Polyjet est un mélange technique SLA et de l'Inkjet. Comme l'Inkjet, la matière est déposée sous forme liquide, mais elle est photopolymérisée par des rayons UV comme dans la SLA. Le matériau de choix est la résine polyacrylique. Une couche de 20 μ m de matériau liquide est déposée, et un niveau vient diminuer l'épaisseur de la couche jusqu'à 16 μ m avant polymérisation. L'ajustage ne s'effectue que dans le sens vertical et ne corrige pas les erreurs de dimensions dans le plan horizontal. Avec la technique Polyjet, la précision (16 μ m) (35, 37) n'atteint pas celle de la SLA (10 μ m). Elle est plus rapide et donne un état de surface lisse.

Le coût du processus reste élevé (mais 2 fois moins que la SLA) et ne peut pas être utilisé pour des pièces volumineuses.

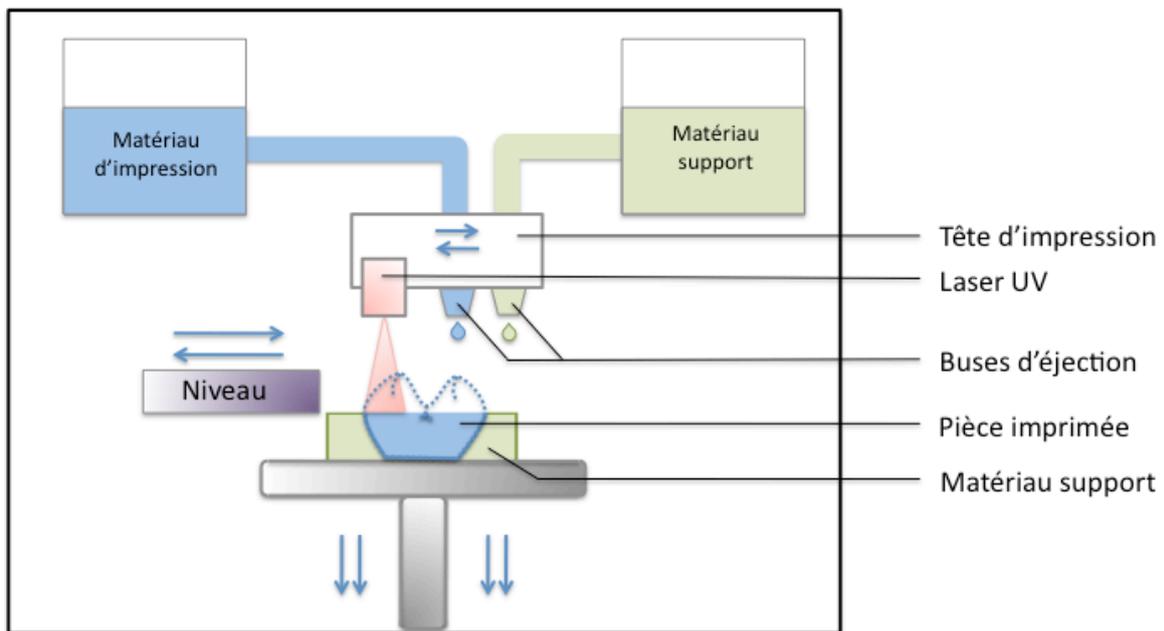


Figure 10 : Technique de Polyjet

Toutes ces techniques permettent la réalisation de modèles dentaires. Chacune d'entre elles présente ses avantages et ses inconvénients. Le choix repose sur la situation clinique à reproduire.

Méthode	Type	Matériau	Précision	Avantages	Inconvénients
Soustractive	Usinage	Solide	12 µm	Mise en œuvre aisée Précision Pas de matériau support	Usinage difficile des contre-dépouilles Usinage difficile des zones étroites
	SLA	Photopolymérisable	10 µm	Précision Surface lisse Pas de matériau support	Coût Déformation dans le temps
	FDM	Liquide	127µm	Rapide	Matériau thermoplastique uniquement Densité faible Manque de précision Surface rugueuse Nécessité d'un matériau support
Additive	Impression 3D	Poudre/liquide	200 µm (x;y) 100 µm (z)	Coût Objets mous, durs ou flexibles Pas de matériau support	Manque de précision Etat de surface rugueux
	LOM	Feuille	127 µm (x;y) 51 µm (z)	Rapide Coût Pas de matériau support	Manque de précision
	Inkjet	Liquide	12 µm	Coût Précision Surface lisse	Nécessité d'un matériau support
	Polyjet	Photopolymérisable	16 µm	Rapide Coût Précision Surface lisse	Nécessité d'un matériau support

Figure 11 : Récapitulatif des technique de prototypage rapide

IV. EXPERIMENTATION

1. Objectifs

L'objectif de cette étude était de quantifier les variations dimensionnelles qui peuvent exister entre différents modèles physiques. Dans notre recherche nous avons comparé l'exactitude entre les répliques obtenus par technique Polyjet (issus d'une empreinte optique) et des modèles en plâtre type IV (Fujirock®, GC™) (issus d'une empreinte conventionnelle).

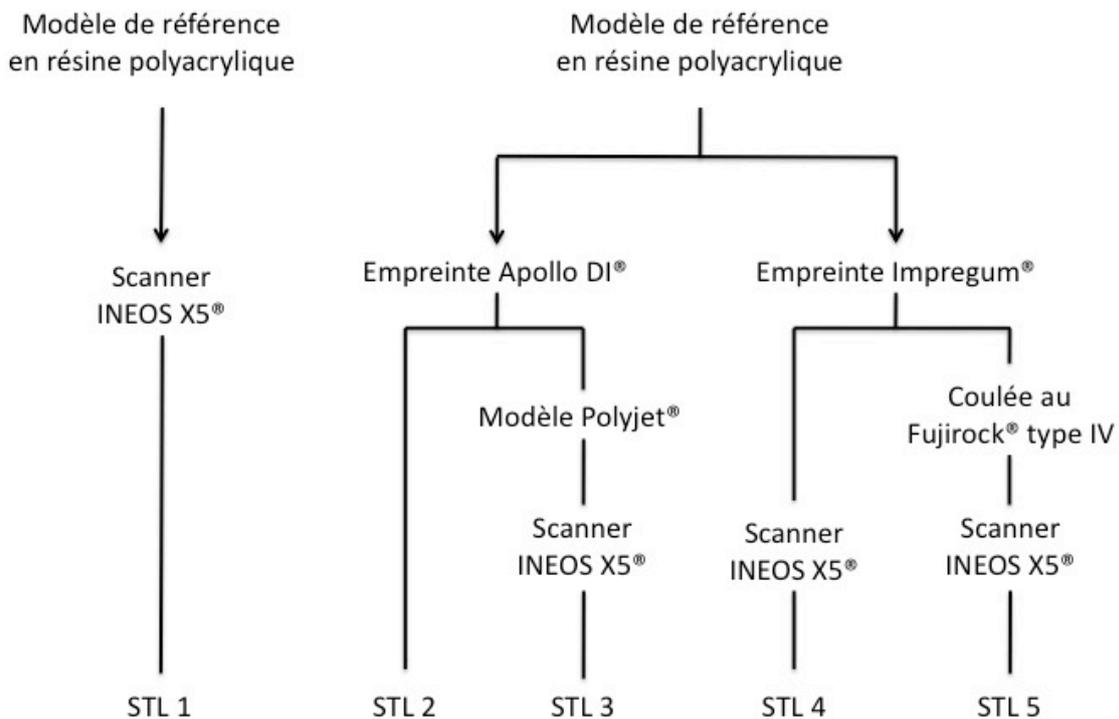


Figure 12 : Schéma du protocole expérimental

2. Matériel et méthode

1. Matériel

1. Scanner de laboratoire : INEOS X5® (Sirona™)

Le but de ce scanner est d'obtenir une acquisition de l'ensemble des surfaces à enregistrer. Pour se faire, le scanner doit posséder un plateau rotatif pour acquérir le modèle selon différents angles. Il a permis d'acquérir 1,2 millions de points par arcade en quelques minutes. Dans leurs études Ender et al. (39, 40) utilisent un scanner qui enregistre une arcade en 21 à 29 heures avec une résolution de 20 millions de points.

L'INEOS X5 est capable de scanner des modèles positifs (modèles en plâtre) et des modèles négatifs (empreintes avant coulée). Lors de l'acquisition, les informations sont enregistrées au format STL.

2. Caméra intra buccale : Apollo DI® (Sirona™)

Cette caméra intra-buccale qui utilise la technologie AWS nécessite un poudrage préalable des surfaces pour diminuer la réflexion de la lumière.

Lors de l'acquisition, les informations sont enregistrées au format STL.

3. Système de prototypage rapide : Projet 3000 DP® (3D Systems™)

Le choix s'est porté vers la technique Polyjet car la précision est de 16µm et la surface obtenue est lisse

Le matériau imprimé a été une résine polyacrylique photopolymérisable de couleur vert foncé : Visijet 3M Dentcast® (3D Systems™).

Le matériau support a été une cire blanche : Visijet S300® (3D Systems™). Son élimination est permise par montée en température dans un bain bouillant.

4. Matériau d’empreinte conventionnelle : Impregum Regular® (3M™)

Le choix a été fait d’utiliser un élastomère de type polyéther monophasé (Impregum®, 3M™). Il présente une justesse de $60,2 \pm 25 \mu\text{m}$ et une précision de $66,7 \pm 18,5 \mu\text{m}$ (40). Il est peu sensible aux variations hydriques et est stable dans le temps. Le porte-empreinte est standard remplissant les conditions nécessaires. (19, 20, 41-43)

Après vérification et encollage du porte-empreinte, le matériau a été malaxé par un auto-mélangeur (Pentamix®, 3M™) pour obtenir un matériau homogène et exempt de bulles. (44)

L’empreinte est retirée une fois le temps de prise écoulé (5 minutes).

5. Plâtre type IV : Fujirock EP OptiXscan® (GC™)

Le « gold standard » pour la coulée des modèles de prothèse fixée est le plâtre dur type IV. Il présente des propriétés mécaniques importantes (dureté et résistance à l’abrasion) et un coefficient d’expansion faible.

Le plâtre choisi pour l’expérimentation a été le Fujirock EP OptiXscan® dont les propriétés optiques permettent de favoriser l’acquisition des données par les scanners de laboratoire.

Fujirock EP OptiXscan	
Ratio Poudre / Liquide	20-21 mL / 100g
Malaxage sous-vide	45 sec
Temps de travail	7-9 min
Temps de démoulage	20 min
Expansion (après 2 heures)	$\leq 0,09\%$
Résistance à la compression	$\approx 53 \text{ MPa}$

Figure 13 : Propriétés du Fujirock EP OptiXscan® (d’après la firme GC™)

2. Méthode

Le choix s'est porté vers 20 modèles en résine polyacrylique qui présente l'avantage de ne pas subir de dégradation lors des diverses manipulations. Hazeveld et al. (45) utilisent les modèles en plâtre présentant un risque de fracture et d'usure, alors qu'Ender et al. (39, 40, 46) et Seelbach et al. (10) travaillent avec des modèles en métal pouvant être source d'artefacts d'enregistrement lors de l'acquisition avec le scanner ou la caméra optique.

A partir de ces modèles, 5 fichiers au format STL ont été obtenus comme suit :

STL 1 : Le modèle de référence (MR) a été passé au scanner INEOS X5®.

STL 2 : Le MR a été poudré puis scanné par la caméra Apollo DI®.

STL 3 : Le STL 2 a été prototypé par technique Polyjet, puis ce nouveau modèle physique a été scanné par l'INEOS X5®.

STL 4 : Empreinte à l'Impregum® du MR qui a ensuite été passée au scanner INEOS X5®.

STL 5 : Coulée de l'empreinte Impregum® au plâtre type IV OptiXscan® qui a ensuite été scanné par l'INEOS X5®.

Notre expérimentation a été menée in-vitro car l'enregistrement d'une arcade à l'aide d'un scanner de laboratoire ne peut pas s'effectuer in-vivo (10, 39, 40, 45, 47). Afin de diminuer les biais, toutes les étapes ont été réalisées par le même opérateur et dans des conditions identiques.

La quantification des variations dimensionnelles a consisté à comparer les fichiers STL issus du protocole et à vérifier leur exactitude.

L'exactitude d'une technique est la réunion de deux notions : la « justesse » et la « précision ». (40)

La justesse décrit la déviation de la technique testée par rapport à la technique témoin.

La précision décrit les variations au sein de la technique testée.

Ensemble, justesse et précision définissent l'exactitude d'une technique.

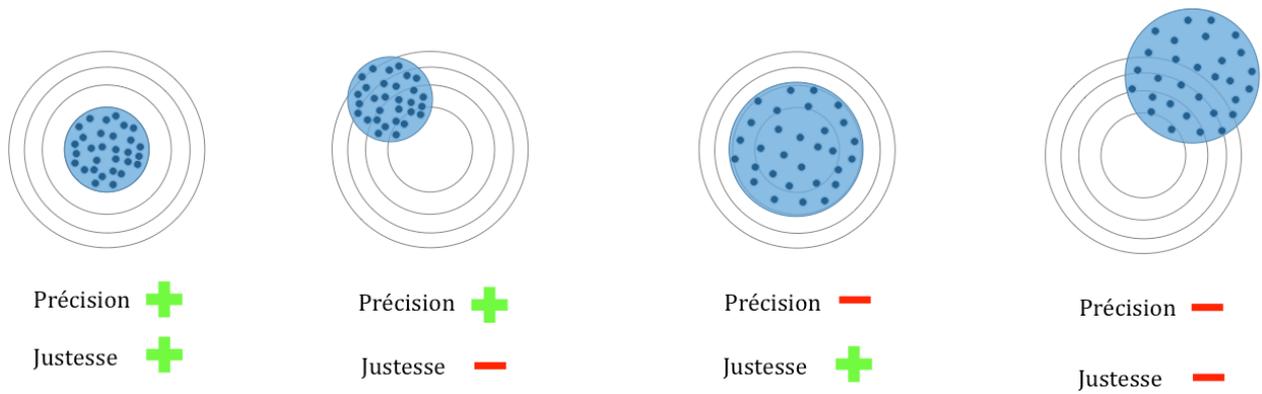


Figure 14 : Exactitude, justesse et précision (d'après Jean Frédéric GUTH)

3. Critères d'exclusion

Les arcades utilisées sont des arcades maxillaires uniquement (dont l'obtention a été réalisée pour la réalisation de restaurations prothétiques mandibulaires).

Aucune agénésie ni encombrement n'est observable. Les dents présentant une morphologie atypique ou une atteinte parodontale pouvant perturber la prise d'empreinte ont été exclues.

4. Recueil de données

Les données ont été traitées à l'aide d'un logiciel d'ingénierie (Geomagic Qualify 12®, Geomagic™) souvent utilisé dans le domaine médical (25, 43, 48-51).. Ce système superpose automatiquement les fichiers STL (par reconnaissance de 100 000 points communs) et quantifie les variations dimensionnelles qui existent entre les deux modèles comparés (moyenne et écart-type).(20, 39, 48, 52)

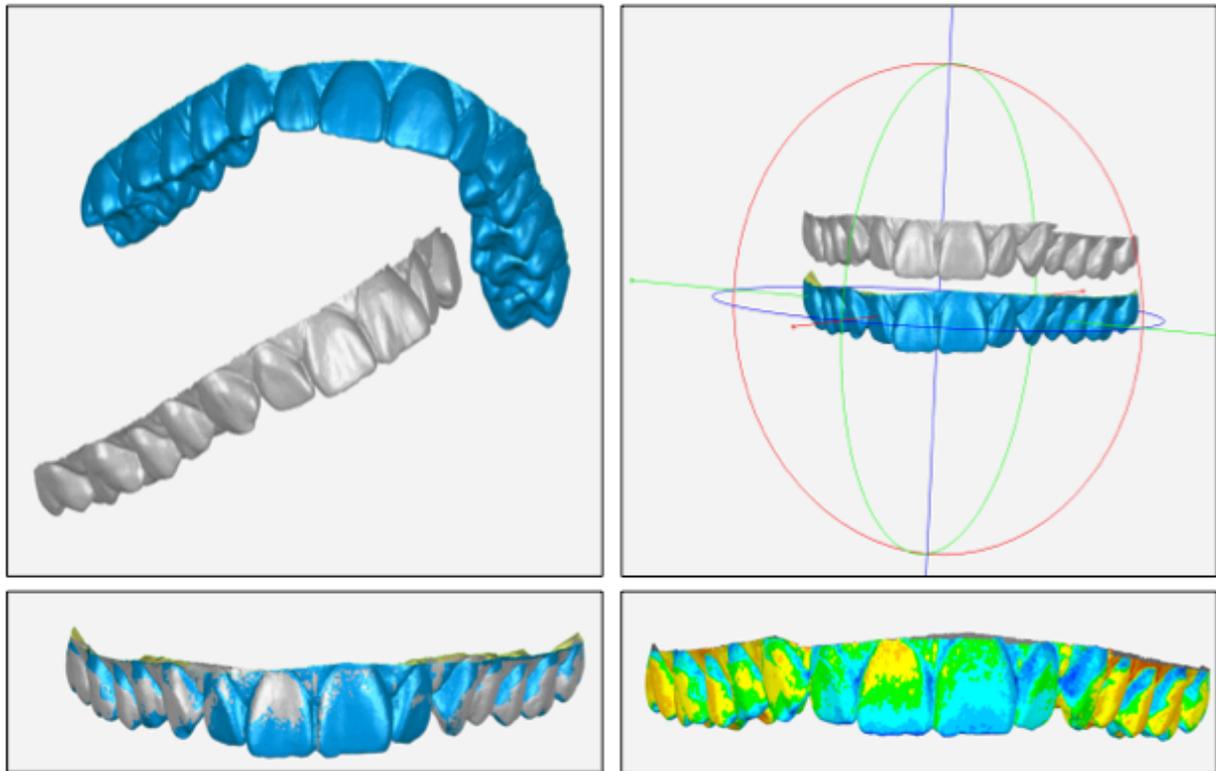


Figure 15 : Set-up du logiciel Geomagic Qualify 12®

3. Analyse statistique

Les tests statistiques paramétriques utilisés représentent des tests de comparaison. Le test de Student a été appliqué pour la moyenne et l'écart-type.

La validation de l'hypothèse nulle H_0 signifie qu'il n'existe pas de différence entre les différentes techniques d'empreinte et que la seule différence existante avec un risque d'erreur de 5% ne peut être le fait que du hasard.

4. Résultats

Afin d'augmenter la taille de l'échantillon pour nous permettre d'utiliser des tests statistiques paramétriques nous avons choisi d'inverser le signe des résultats lorsque la différence obtenue par rapport à une méthode se faisait dans le sens inverse de l'examen initial (ex : nous avons comparé STL1/STL2 et STL2/STL1, alors nous avons choisi de regrouper les données en inversant le signe des résultats de STL2/STL1).

Les résultats statistiques sont présentés sous forme de tableaux en indiquant les paramètres de l'analyse descriptive.

Une représentation graphique a été réalisée afin de mieux appréhender la dispersion des valeurs pour permettre le comparatif entre deux méthodes en fonction de la moyenne et de l'écart-type.

Une analyse interprétative des résultats est possible. A l'issue du test t de Student, le calcul du degré de significativité p permet d'accepter ou rejeter H_0 au risque de 1^{ère} espèce 5%.

Comparaison de STL1/STL2 :

La différence moyenne observée entre les fichiers STL issus du scanner de référence INEOS X5® et de l'Apollo Di® est de $-0,003 \pm 0,065$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	-,003	,065
Dév. Std	,015	,022
Erreur Std	,002	,003
Nombre	40	40
Minimum	-,043	,033
Maximum	,025	,121
# Manquants	0	0

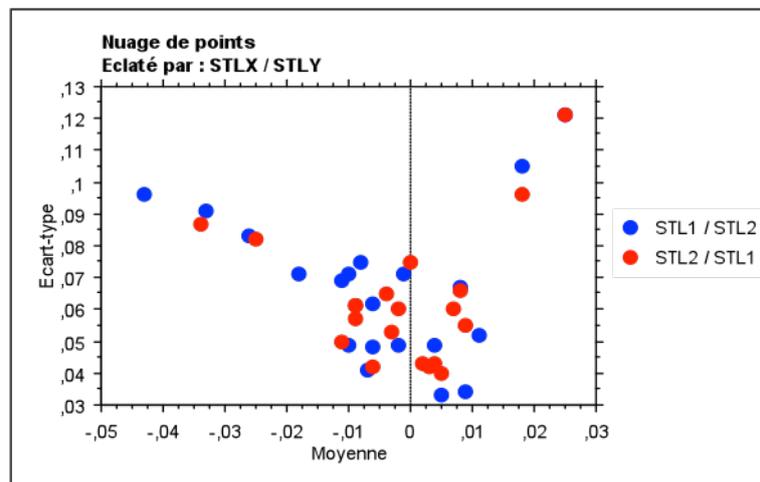


Figure 16 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL1/STL2)

D'après le graphique, nous pouvons constater qu'un nuage de points existe entre -0,015 mm et 0,015 mm. 9 résultats sont dits « outliers » (= en dehors du nuage) sans dépasser 0,045mm.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,4652$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre le scanner INEOS X5® et l'Apollo DI®.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL1 / STL2, STL2 / STL1	-,004	38	-,738	,4652	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL2	20	-,005	2,734E-4	,017	,004
STL2 / STL1	20	-,002	1,768E-4	,013	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL1 / STL2, STL2 / STL1	,004	38	,554	,5826	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL2	20	,067	,001	,024	,005
STL2 / STL1	20	,063	4,291E-4	,021	,005

Figure 17 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL1/STL2)

Comparaison de STL1/STL3 :

La différence moyenne observée entre les fichiers STL issus du scanner de référence INEOS X5® et de la séquence Apollo DI®/impression Polyjet est de $0,016 \pm 0,105$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	,016	,105
Dév. Std	,014	,023
Erreur Std	,002	,004
Nombre	40	40
Minimum	-,026	,074
Maximum	,041	,165
# Manquants	0	0

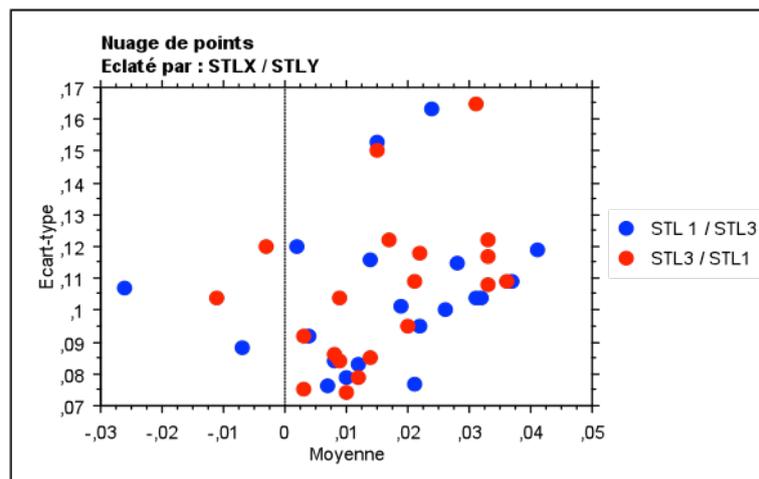


Figure 18 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL1/STL3)

Nous constatons un nuage de points entre 0 et 0,040 mm de moyenne. Nous pouvons observer 8 «outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,9568$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre le scanner INEOS X5® et la séquence Appolo DI®/ impression par Polyjet.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL 1 / STL3, STL3 / STL1	2,500E-4	38	,055	,9568	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL 1 / STL3	20	,016	2,505E-4	,016	,004
STL3 / STL1	20	,016	1,692E-4	,013	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL 1 / STL3, STL3 / STL1	-,002	38	-,222	,8252	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL 1 / STL3	20	,104	,001	,023	,005
STL3 / STL1	20	,106	,001	,024	,005

Figure 19 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL1/STL3)

Comparaison de STL1/STL4 :

La différence moyenne observée entre les fichiers STL issus du scanner de référence INEOS X5® et de l’empreinte à l’Impregum® est de $-0,002 \pm 0,078$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	-,002	,078
Dév. Std	,010	,010
Erreur Std	,002	,002
Nombre	40	40
Minimum	-,024	,058
Maximum	,015	,096
# Manquants	0	0

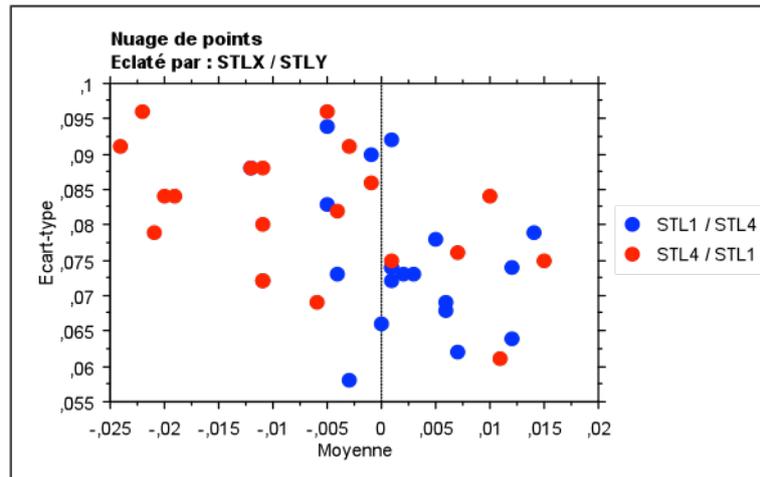


Figure 20 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL1/STL4)

Aucune description du nuage de points n’est possible de part la dispersion de valeurs observées.

Une différence significative est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,0046$ inférieure à 5%.

Il est possible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre le scanner INEOS X5® et l'empreinte à l'Impregum® avec un risque d'erreur de 5%.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
		Ecart moyen	DDL	t	p
STL1 / STL4, STL4 / STL1		,009	38	3,012	,0046

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL4	20	,002	4,121E-5	,006	,001
STL4 / STL1	20	-,007	1,334E-4	,012	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
		Ecart moyen	DDL	t	p
STL1 / STL4, STL4 / STL1		-,006	38	-2,058	,0465

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL4	20	,075	1,001E-4	,010	,002
STL4 / STL1	20	,081	8,447E-5	,009	,002

Figure 21 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL1/STL4)

Comparaison de STL1/STL5 :

La différence moyenne observée entre les fichiers STL issus du scanner de référence INEOS X5® et de la méthode conventionnelle (Impregum® + plâtre) est de $0,009 \pm 0,082$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	,009	,082
Dév. Std	,013	,011
Erreur Std	,002	,002
Nombre	40	40
Minimum	-,023	,064
Maximum	,027	,114
# Manquants	0	0

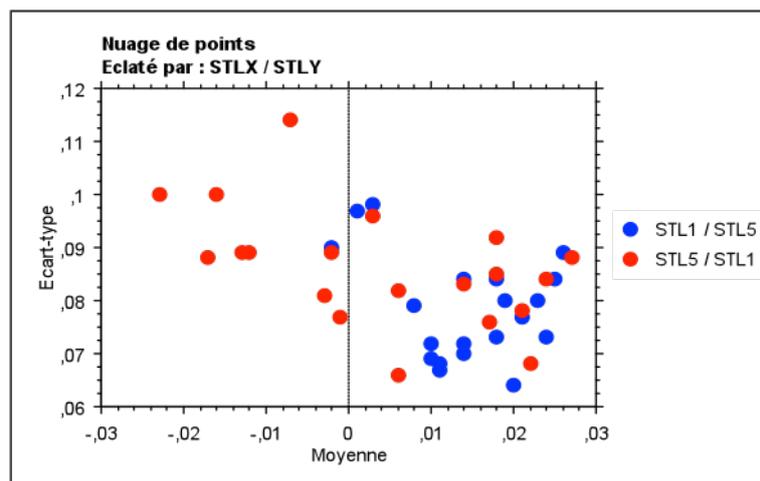


Figure 22 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL1/STL5)

Il existe un nuage de points entre 0,010 et 0,030 mm de moyenne. Nous observons 16 « outliers » sur le graphique.

Une différence significative est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,0119$ inférieure à 5%.

Il est possible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre le scanner INEOS X5® et la méthode conventionnelle.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL1 / STL5, STL5 / STL1	,010	38	2,642	,0119	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL5	20	,014	6,404E-5	,008	,002
STL5 / STL1	20	,004	2,399E-4	,015	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL1 / STL5, STL5 / STL1	-,008	38	-2,333	,0250	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL1 / STL5	20	,079	9,595E-5	,010	,002
STL5 / STL1	20	,086	1,247E-4	,011	,002

Figure 23 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL1/STL5)

Comparaison de STL2/STL3 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de l'Apollo DI® et de la séquence Apollo DI®/impression Polyjet est de $0,015 \pm 0,087$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	,015	,087
Dév. Std	,008	,018
Erreur Std	,001	,003
Nombre	40	40
Minimum	,003	,062
Maximum	,039	,152
# Manquants	0	0

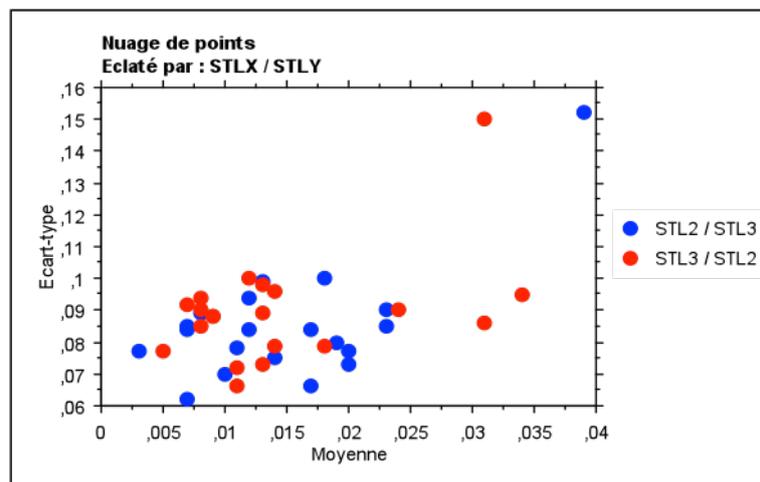


Figure 24 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL2/STL3)

Nous pouvons décrire un nuage de points entre 0 et 0,025 mm de moyenne et la présence de 4 « outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,8950$ supérieure à 5%. Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre la caméra Apollo DI® et la séquence Apollo DI®/ impression Polyjet.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL2 / STL3, STL3 / STL2	3,500E-4	38	,133	,8950	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL2 / STL3	20	,015	6,505E-5	,008	,002
STL3 / STL2	20	,015	7,361E-5	,009	,002

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL2 / STL3, STL3 / STL2	-,004	38	-,736	,4663	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL2 / STL3	20	,085	3,471E-4	,019	,004
STL3 / STL2	20	,089	2,888E-4	,017	,004

Figure 25 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL2/STL3)

Comparaison de STL2/STL4 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de l'Apollo DI® et de l'empreinte à l'Impregum® est de $0,001 \pm 0,089$ mm.

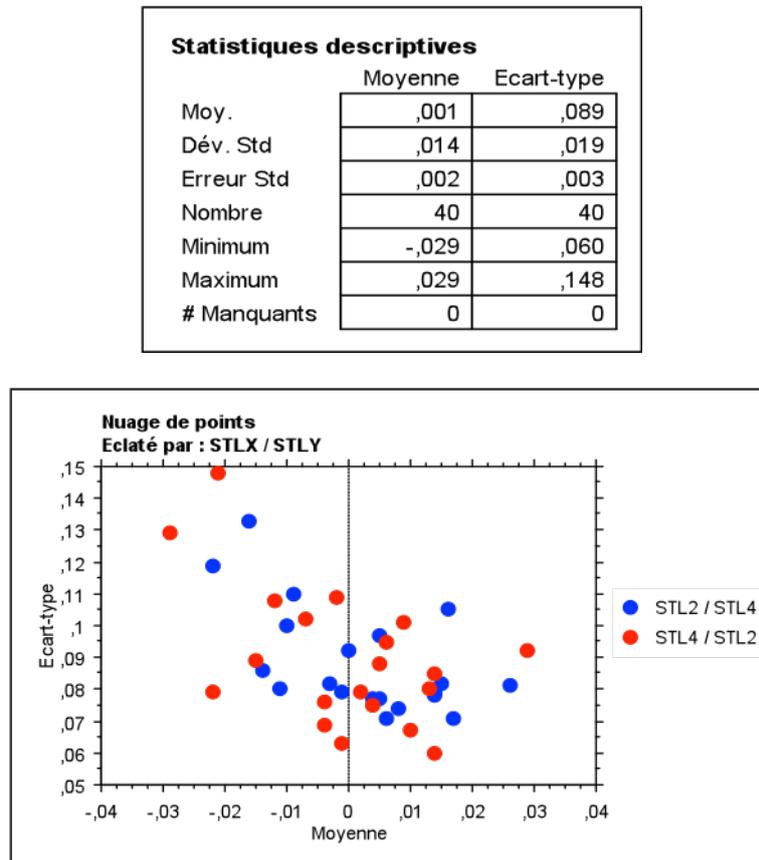


Figure 26 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL2/STL4)

Nous pouvons décrire un nuage de points entre -0,020 et 0,020 mm de moyenne et la présence de 6 « outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,5265$ supérieure à 5%. Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre la caméra Apollo DI® et l'empreinte à l'Impregum®.

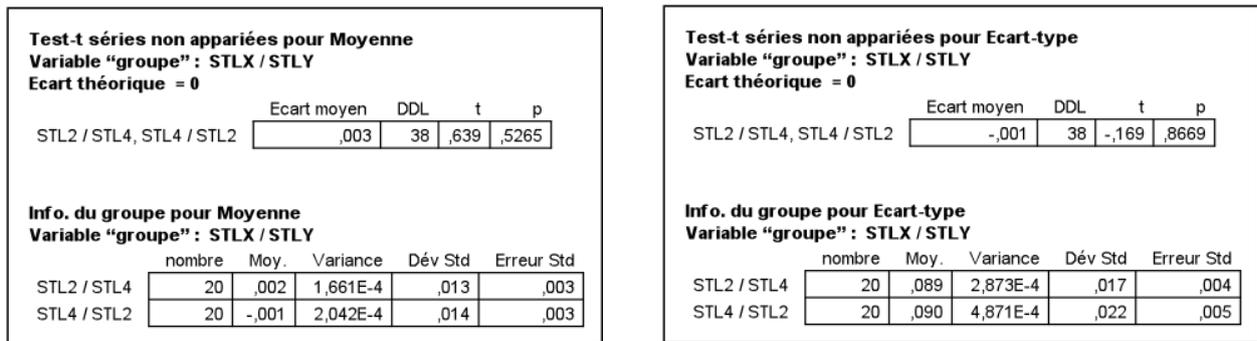


Figure 27 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL2/STL4)

Comparaison de STL2/STL5 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de l'Apollo DI® et de la séquence conventionnelle (Impregum® + plâtre) est de $0,012 \pm 0,092$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	,012	,092
Dév. Std	,014	,016
Erreur Std	,002	,003
Nombre	40	40
Minimum	-,020	,067
Maximum	,037	,136
# Manquants	0	0

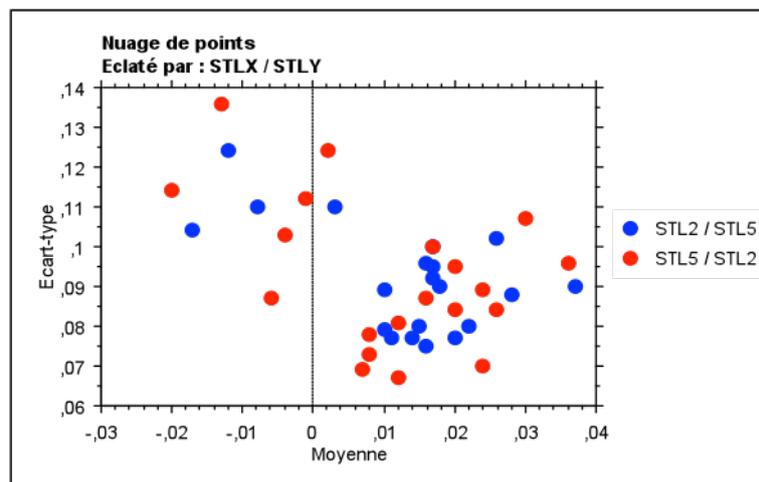


Figure 28 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL2/STL5)

Il existe un nuage de points entre 0,005 et 0,030 mm de moyenne. 14 « outliers » sont observables sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,6362$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre la caméra Apollo DI® et la méthode conventionnelle.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL2 / STL5, STL5 / STL2	,002	38	,477	,6362	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL2 / STL5	20	,013	1,728E-4	,013	,003
STL5 / STL2	20	,011	2,149E-4	,015	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL2 / STL5, STL5 / STL2	-,001	38	-,202	,8407	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL2 / STL5	20	,092	1,820E-4	,013	,003
STL5 / STL2	20	,093	3,563E-4	,019	,004

Figure 29 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL2/STL5)

Comparaison de STL3/STL4 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de la séquence Apollo DI®/impression Polyjet et de l’empreinte à l’Impregum® est de $-0,014 \pm 0,114$ mm.

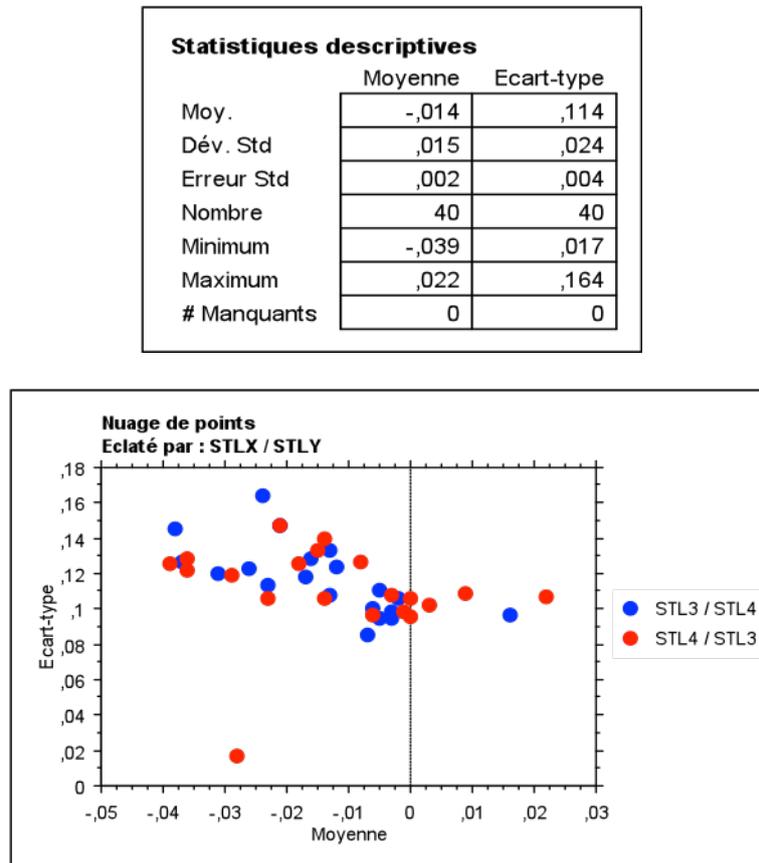


Figure 30 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL3/STL4)

Le nuage de points est compris entre -0,040 et 0,005 mm de moyenne. Nous observons 4 « outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,7591$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre la séquence Apollo DI®/ impression Polyjet et l'empreinte à l'Impregum®.

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL3 / STL4, STL4 / STL3	-,001	38	-,309	,7591	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL3 / STL4	20	-,014	1,761E-4	,013	,003
STL4 / STL3	20	-,013	2,648E-4	,016	,004

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL3 / STL4, STL4 / STL3	,006	38	,784	,4377	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL3 / STL4	20	,117	4,084E-4	,020	,005
STL4 / STL3	20	,111	,001	,027	,006

Figure 31 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL3/STL4)

Comparaison de STL3/STL5 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de la séquence Apollo DI®/impression Polyjet et de l’empreinte à l’Impregum® est de $-0,001 \pm 0,108$ mm.

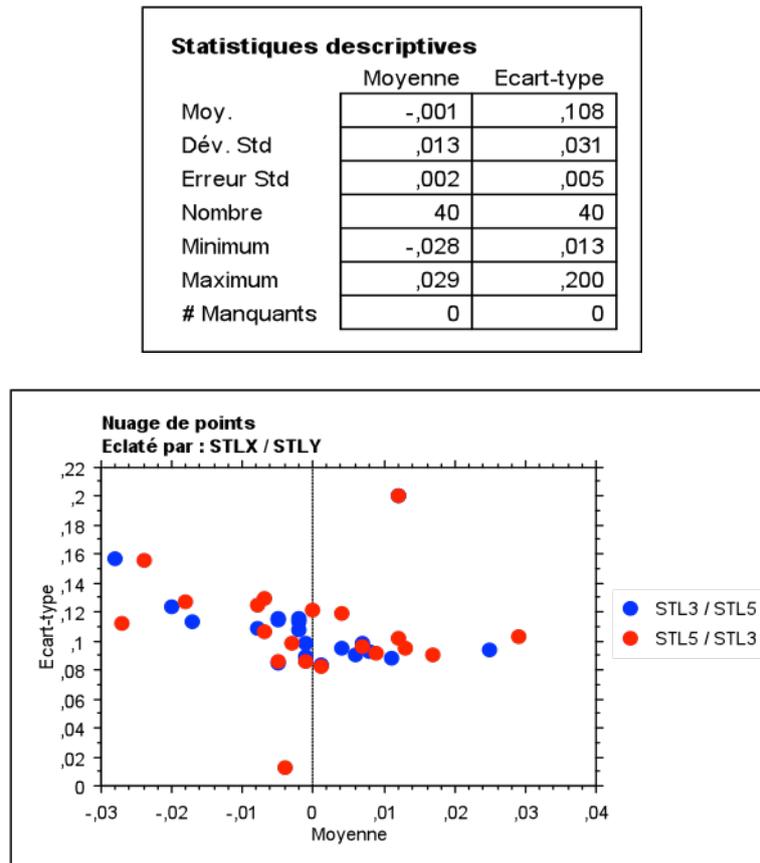


Figure 32 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL3/STL5)

Le nuage de points est compris entre $-10\mu\text{m}$ et $20\mu\text{m}$ de moyenne. Nous observons 8 « outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,7874$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre la séquence Apollo DI®/ impression Polyjet et la méthode conventionnelle (Impregum® + plâtre).

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL3 / STL5, STL5 / STL3	-,001	38	-,272	,7874	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL3 / STL5	20	-,001	1,399E-4	,012	,003
STL5 / STL3	20	1,735E-19	1,882E-4	,014	,003

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL3 / STL5, STL5 / STL3	,003	38	,251	,8032	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe" : STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL3 / STL5	20	,109	,001	,027	,006
STL5 / STL3	20	,107	,001	,035	,008

Figure 33 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL3/STL5)

Comparaison de STL4/STL5 :

La différence moyenne entre les fichiers STL issus de l’empreinte à l’Impregum® et de la méthode conventionnelle est de $0,013 \pm 0,063$ mm.

Statistiques descriptives		
	Moyenne	Ecart-type
Moy.	,013	,063
Dév. Std	,007	,013
Erreur Std	,001	,002
Nombre	40	40
Minimum	-,003	,045
Maximum	,027	,111
# Manquants	0	0

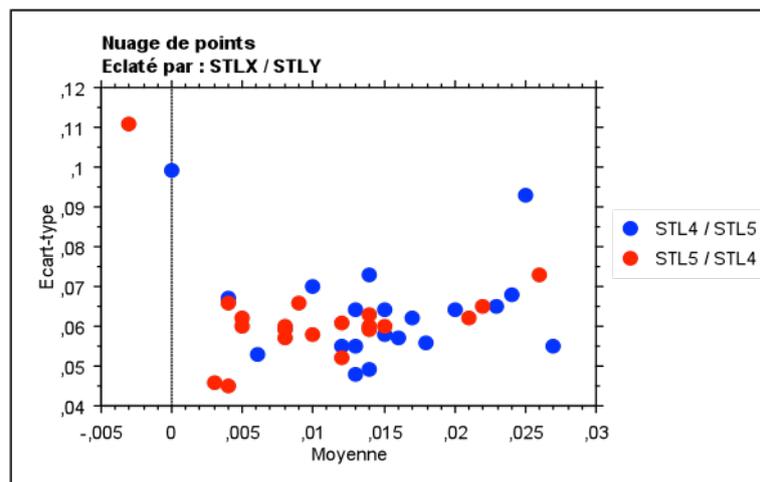


Figure 34 : Statistiques descriptives et nuage de points (STL4/STL5)

Le nuage de points est compris entre 0 et 25µm de moyenne. Nous observons 3 « outliers » sur le graphique.

Aucune différence significative n'est mise en évidence par le test de Student entre les deux techniques d'enregistrement car la valeur $p=0,0535$ supérieure à 5%.

Il est impossible de conclure sur l'existence d'une différence d'enregistrement entre l'empreinte à l'Impregum® et la méthode conventionnelle (Impregum® + plâtre).

Test-t séries non appariées pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL4 / STL5, STL5 / STL4	,004	38	1,993	,0535	

Info. du groupe pour Moyenne					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL4 / STL5	20	,015	4,752E-5	,007	,002
STL5 / STL4	20	,011	4,994E-5	,007	,002

Test-t séries non appariées pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
Ecart théorique = 0					
	Ecart moyen	DDL	t	p	
STL4 / STL5, STL5 / STL4	,001	38	,363	,7186	

Info. du groupe pour Ecart-type					
Variable "groupe": STLX / STLY					
	nombre	Moy.	Variance	Dév Std	Erreur Std
STL4 / STL5	20	,064	1,687E-4	,013	,003
STL5 / STL4	20	,062	1,728E-4	,013	,003

Figure 35 : Tests de Student sur les moyennes et écarts-types (STL4/STL5)

5. Discussion

Le but de notre étude était de quantifier les variations dimensionnelles des modèles physiques obtenus par méthode conventionnelle (empreinte physico-chimique avec coulée au plâtre) et par méthode numérique (empreinte optique suivie d'un Prototypage Rapide).

Nos résultats ont montré une différence significative lors de la comparaison entre le modèle de référence et l'empreinte à l'Impregum® ($p=0,0046$) avec un degré de significativité très inférieur à 5%. La comparaison entre le modèle de référence et le modèle coulé au plâtre montre une différence significative avec une valeur de $p=0,0119$ inférieure à 5%. Ces 2 résultats sont liés, les imprécisions de l'empreinte physico-chimique sont retrouvées sur le modèle coulé au plâtre. Les graphiques présentent une dispersion des valeurs, aucun nuage de points n'est descriptible.

Au sein de notre protocole, les résultats issus de la prise d'empreinte conventionnelle ne sont donc pas reproductibles.

Les empreintes physico-chimiques conventionnelles ont été réalisées à l'Impregum® en technique monophasée pour limiter les biais de manipulation du matériau. Cependant, nous avons constaté une difficulté de désinsertion du modèle de référence lors des empreintes. Sa tension de surface est faible sur une surface dentaire, mais ce paramètre nous est inconnu sur la résine polyacrylique du modèle de référence. Ceci a provoqué dans certains cas un tirage au niveau de l'empreinte et un décollement du porte-empreinte bien que celui-ci ait été encollé (40).

Un produit d'empreinte a fait son apparition : le vinyl-siloxanéther. Ses propriétés d'enregistrement allient celles des silicones et des polyéthers. Il serait intéressant de travailler avec ce matériau afin de comparer les résultats avec ceux obtenus avec le polyéther.

Tous les autres résultats obtenus ne permettent pas de conclure sur des différences significatives entre les techniques utilisées car le test de Student a révélé une valeur p supérieure à 5%. Pour vérifier si une différence significative existe ou non, il faudrait soit augmenter l'échantillon, soit donner des valeurs restrictives aux résultats obtenus.

Pour l’empreinte optique, les sources d’erreur peuvent se trouver à différents niveaux. L’Apollo DI® utilise comme format d’enregistrement le STL qui présente comme inconvénient de faire apparaître des distorsions lors de la conversion des fichiers (45). Nous avons aussi pu constater que nos modèles digitaux montraient des zones de superpositions: une mauvaise technique de scannage des surfaces (46) peut engendrer ce phénomène, tout comme le manque de puissance du logiciel d’acquisition lors de la corrélation des informations. Plus les zones enregistrées sont petites, plus les calculs algorithmiques de repositionnement des images acquises sont simples ce qui limite les imprécisions (10).

Malgré ces différents risques, l’empreinte optique montre une meilleure précision car elle diminue le nombre d’étapes et donc les sources d’erreur au cours du traitement (10, 39, 40, 46).

Dans la fabrication de répliques par technique Polyjet, les sources d’imprécision peuvent se retrouver au niveau de la conception du modèle ou de sa réalisation. Après acquisition des surfaces, le logiciel de prototypage conçoit la réplique de façon virtuelle et réalise une extrapolation au niveau des zones difficiles à enregistrer (points de contacts, embrasures) (47) ce qui engendre une perte de précision avant même de commencer le prototypage. Un phénomène de rétraction de la résine est décrit lors de sa polymérisation (45, 47, 53), cela provoque un sous dimensionnement des modèles imprimés. Au cours de nos manipulations, nous avons aussi constaté une mauvaise élimination du matériau support dans les zones de contre-dépouille rendant la surface rugueuse.

Les modèles conçus par Polyjet présentent des valeurs de justesse moyennes comprises entre $-89\ \mu\text{m}$ et $116\ \mu\text{m}$. Ender et al. évoquent une répercussion sur le traitement prothétique final, si la variation dimensionnelle de l’arcade est supérieure à $100\ \mu\text{m}$ (40). Alors que Fleming considère que $200\ \mu\text{m}$ de déviation sont cliniquement acceptables en Orthopédie Dento-Faciale (12).

V. CONCLUSION

Notre étude a permis de quantifier les variations dimensionnelles entre différents types de modèles physiques. D'après les résultats de notre protocole expérimental, les différentes méthodes montrent des variations entre elles.

Nous pouvons conclure que les modèles physiques obtenus par méthode numérique ont montré des résultats plus précis que ceux en plâtre issus d'une méthode conventionnelle. Ces modèles fabriqués par Polyjet ont des résultats plus reproductibles et prévisibles. Cependant, ils présentent une justesse trop faible pour les utiliser dans la réalisation d'un traitement prothétique.

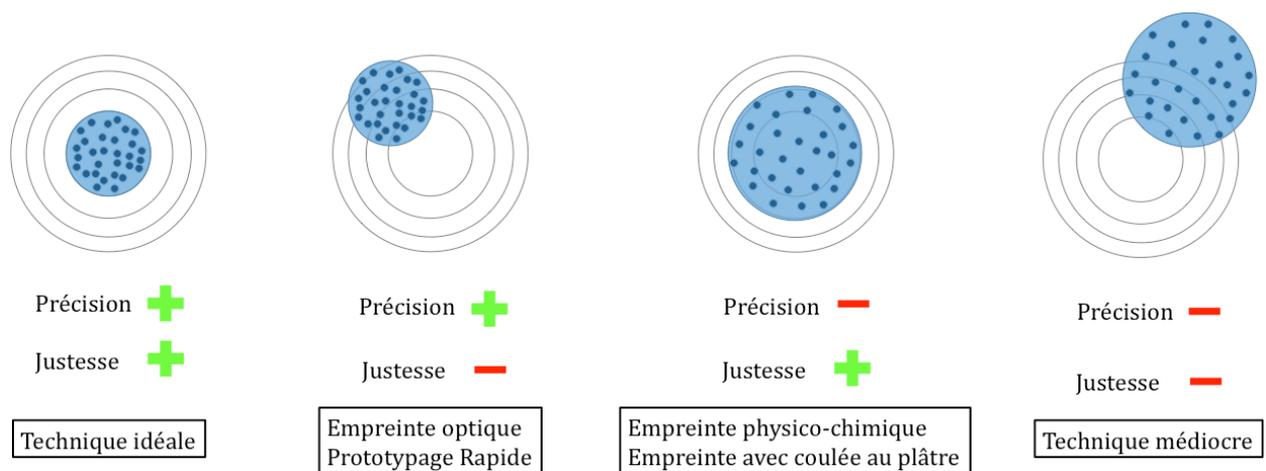


Figure 36 : Exactitude des techniques (d'après Jean-Frédéric GUTH)

BIBLIOGRAPHIE

1. Persson AS, Oden A, Andersson M, Sandborgh-Englund G. Digitization of simulated clinical dental impressions: virtual three-dimensional analysis of exactness. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*. 2009;25(7):929-36.
2. Contrepois M, Soenen A, Bartala M, Laviolle O. Marginal adaptation of ceramic crowns: a systematic review. *J Prosthet Dent*. 2013;110(6):447-54.e10.
3. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *British dental journal*. 2008;204(9):505-11.
4. Duret F, Péliissier B. Différentes méthodes d'empreinte en CFAO dentaire. *EM-Consulte*. 2010;28-740-R-10.
5. Pennard J, Pennard F. Comment évaluer les systèmes CAO-CFAO pour faire le meilleur choix ? *Quintessence revue internationale de prothèse dentaire*. 2012;4:280-88.
6. Akyalcin S, Cozad BE, English JD, Colville CD, Laman S. Diagnostic accuracy of impression-free digital models. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2013;144(6):916-22.
7. Grünheid T, Patel N, De Felipe NL, Wey A, Gaillard PR, Larson BE. Accuracy, reproducibility, and time efficiency of dental measurements using different technologies. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2014;145(2):157-64.
8. Moussaly C, Cazier S, Attal JP. L'empreinte optique. *Entretiens de Bichat*. 2010:46-8.
9. Schweiger J, Beuer F, Edelhoff D. Le flux numérique (première partie) De la prise d'empreinte endobuccale à la confection du modèle. *Quintessence revue internationale de prothèse dentaire*. 2010;4:260-7.
10. Seelbach P, Brueckel C, Wostmann B. Accuracy of digital and conventional impression techniques and workflow. *Clinical oral investigations*. 2013;17(7):1759-64.
11. Moussaly C, Coudray L, Attal JP. L'empreinte optique. *Altern*. 2007;33:23-32.
12. Fleming PS, Marinho V, Johal A. Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models: a systematic review. *Orthodontics & craniofacial research*. 2011;14(1):1-16.
13. Marcel TJ. Three-dimensional on-screen virtual models. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2001;119(6):666-8.

14. Pani SC, Hedge AM. Impressions in cleft lip and palate--a novel two stage technique. *The Journal of clinical pediatric dentistry*. 2008;33(2):93-6.
15. Zandparsa R. Digital imaging and fabrication. *Dental clinics of North America*. 2014;58(1):135-58.
16. Perié B, Delfine B, Bohin F. Comment éviter le tirage ? Stratégie prothétique. 2004;4(5):363-8.
17. Lacroix P LM, Margossian P, Laborde G. Quels sont les critères de choix des porte-empreintes et adhésifs ? Stratégie prothétique. 2004;4 (5):337-42.
18. Perié B, Delfine B, Bohin F. Quelles sont les causes de déformation des empreintes ? Stratégie prothétique. 2005;5(1):17-23.
19. Rajapur A, Dixit S, Hoshing C, Raikar SP. The influence of tray space and repeat pours on the accuracy of monophasic polyvinylsiloxane impression. *The journal of contemporary dental practice*. 2012;13(6):824-9.
20. Brosky ME, Major RJ, DeLong R, Hodges JS. Evaluation of dental arch reproduction using three-dimensional optical digitization. *J Prosthet Dent*. 2003;90(5):434-40.
21. Schweiger J, Beuer F, Edelhoff D. Le flux numérique (deuxième partie) Le processus CFAO, de l'infrastructure au revêtement cosmétique numérique. *Quintessence revue internationale de prothèse dentaire*. 2011;1:48-55.
22. Perelmuter S. Couronnes céramo-céramiques réalisées par assemblage d'une chape en zircon et d'une coiffe en vitrocéramique. Procédé DVS (3M ESPE). *Quintessence revue internationale de prothèse dentaire*. 2010;2:88-95.
23. Solaberrieta E, Minguez R, Barrenetxea L, Sierra E, Etxaniz O. Novel methodology to transfer digitized casts onto a virtual dental articulator. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2013;6(2):149-55.
24. Solaberrieta E, Otegi JR, Minguez R, Etxaniz O. Improved digital transfer of the maxillary cast to a virtual articulator. *J Prosthet Dent*. 2014;112(4):921-4.
25. Solaberrieta E, Minguez R, Barrenetxea L, Otegi JR, Szentpetery A. Comparison of the accuracy of a 3-dimensional virtual method and the conventional method for transferring the maxillary cast to a virtual articulator. *J Prosthet Dent*. 2014.
26. Korlakunte PR, Aljanakh M. The role of virtual articulator in prosthetic and restorative dentistry. *Journal of clinical and diagnostic research : JCDR*. 2014;8(7):25-8.
27. Schweiger J, Beuer F, Edelhoff D, M E. Le flux numérique (troisième partie) De la prise d'empreinte endobuccale avec le CEREC AC à la réalisation de la couche cosmétique avec le procédé IPS e.max CAD-on. *Quintessence revue internationale de prothèse dentaire*. 2011;2:100-11.

28. Winder J, Bibb R. Medical rapid prototyping technologies: state of the art and current limitations for application in oral and maxillofacial surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2005;63(7):1006-15.
29. Madhav V.N.V DR. Rapid prototyping and its applications in dentistry. *Journal of Dental & Allied Sciences.* 2013;2(2):57-61.
30. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials.* 2012;28(1):3-12.
31. Liu Q, Leu MC, Schmitt SM. Rapid prototyping in dentistry: Technology and application. *Int J Adv Manuf Technol.* 2006;29(3-4):317-35.
32. Melchels FPW, Feijen J, Grijpma DW. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials.* 2010;31(24):6121-30.
33. Choi JY, Choi JH, Kim NK, Kim Y, Lee JK, Kim MK, et al. Analysis of errors in medical rapid prototyping models. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2002;31(1):23-32.
34. Olszewski R, Reychler H. Clinical Applications of Rapid Prototyping Models in Cranio-Maxillofacial Surgery. In: Hoque M, editor. *Advanced Applications of Rapid Prototyping Technology in Modern Engineering*,2011. p. 173-206.
35. Ibrahim D, Broilo TL, Heitz C, de Oliveira MG, de Oliveira HW, Nobre SMW, et al. Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet models in the reproduction of mandibular anatomy. *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery.* 2009;37(3):167-73.
36. Silva DN, Gerhardt de Oliveira M, Meurer E, Meurer MI, Lopes da Silva JV, Santa-Bárbara A. Dimensional error in selective laser sintering and 3D-printing of models for craniomaxillary anatomy reconstruction. *Journal of cranio-maxillo-facial surgery : official publication of the European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery.* 2008;36(8):443-9.
37. Cohen A, Laviv A, Berman P, Nashef R, Abu-Tair J. Mandibular reconstruction using stereolithographic 3-dimensional printing modeling technology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009;108(5):661-6.
38. Bhatnagar P, Jaspreet K, Arora P, Arora V. Rapid Prototyping in Dentistry - An update. *International Journal of Life Sciences.* 2014;3(2):50-3.
39. Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent.* 2013;109(2):121-8.
40. Ender A, Mehl A. In-vitro evaluation of the accuracy of conventional and digital methods of obtaining full-arch dental impressions. *Quintessence international (Berlin, Germany : 1985).* 2014.
41. Daou EE. The elastomers for complete denture impression: A review of the literature. *The Saudi dental journal.* 2010;22(4):153-60.

42. Piwowarczyk A, Ottl P, Buchler A, Lauer HC, Hoffmann A. In vitro study on the dimensional accuracy of selected materials for monophasic elastic impression making. *The International journal of prosthodontics*. 2002;15(2):168-74.
43. Schaefer O, Schmidt M, Goebel R, Kuepper H. Qualitative and quantitative three-dimensional accuracy of a single tooth captured by elastomeric impression materials: an in vitro study. *J Prosthet Dent*. 2012;108(3):165-72.
44. Margossian P LM, Lacroix P, Laborde G. Quels sont les avantages des distributeurs automatiques de matériaux d'empreinte. *Stratégie prothétique*. 2004;4(5):343-8.
45. Hazeveld A, Huddleston Slater JJ, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2014;145(1):108-15.
46. Ender A, Mehl A. Influence of scanning strategies on the accuracy of digital intraoral scanning systems. *International journal of computerized dentistry*. 2013;16(1):11-21.
47. Cuperus AM, Harms MC, Rangel FA, Bronkhorst EM, Schols JG, Breuning KH. Dental models made with an intraoral scanner: a validation study. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2012;142(3):308-13.
48. Lee SJ, Betensky RA, Gianneschi GE, Gallucci GO. Accuracy of digital versus conventional implant impressions. *Clinical oral implants research*. 2014.
49. Nedelcu RG, Persson AS. Scanning accuracy and precision in 4 intraoral scanners: An in vitro comparison based on 3-dimensional analysis. *J Prosthet Dent*. 2014;112(6):1461-71.
50. Patzelt SB, Emmanouilidi A, Stampf S, Strub JR, Att W. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners. *Clinical oral investigations*. 2014;18(6):1687-94.
51. Andriessen FS, Rijkens DR, van der Meer WJ, Wismeijer DW. Applicability and accuracy of an intraoral scanner for scanning multiple implants in edentulous mandibles: a pilot study. *J Prosthet Dent*. 2014;111(3):186-94.
52. Thiruvengkatachari B, Al-Abdallah M, Akram NC, Sandler J, O'Brien K. Measuring 3-dimensional tooth movement with a 3-dimensional surface laser scanner. *American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics*. 2009;135(4):480-5.
53. Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *Journal of orthodontics*. 2008;35(3):191-201;

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, la Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

Collège des Sciences de la Santé

UFR des Sciences Odontologiques

Serment

En présence de mes Maîtres et de mes condisciples, je promets et je jure d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de l'art dentaire.

Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un honoraire au-dessus de mon travail. Ma langue taira les secrets qui me seront confiés. Admis à l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe.

Mes connaissances et mon état ne serviront ni à diffuser des propos non avérés, ni à corrompre les mœurs, ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des conditions de croyance, de nation et de race viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Je promets et je jure de conformer strictement ma conduite professionnelle aux principes et aux règles prescrites par le code de déontologie.

Si je remplis ce serment sans l'enfreindre, qu'il me soit donné de jouir heureusement de la vie et de ma profession, honoré à jamais parmi les hommes. Si je le viole et que je me parjure, puissé-je avoir un sort contraire.

