### UNIVERSITE TOULOUSE III- PAUL SABATIER

## FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

ANNEE 2020 2020 TOU3 3026

## **THESE**

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

**Christophe Veyssiere** 

le 23 juin 2020

## APPORT DES TECHNOLOGIES NUMERIQUES DANS LA PLA-NIFICATION PROTHETIQUE DES REHABILITATIONS DE GRANDE ETENDUE

Directeur de thèse : Dr Antonin HENNEQUIN

#### **JURY**

Président : Pr Franck DIEMER

1<sup>er</sup> assesseur: Dr Karim NASR

2<sup>ème</sup> assesseur: Dr Florent DESTRUHAUT

3ème assesseur: Dr Antonin HENNEQUIN

4<sup>ème</sup> assesseur: Dr David MAILHES





#### Faculté de Chirurgie Dentaire

#### DIRECTION

#### **DOYEN**

M. Philippe POMAR

#### **ASSESSEUR DU DOYEN**

Mme Sabine JONIOT

Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

#### **CHARGÉS DE MISSION**

M. Karim NASR (Innovation Pédagogique)
M. Olivier HAMEL (Maillage Territorial)
M. Franck DIEMER (Formation Continue)
M. Philippe KEMOUN (Stratégie Immobilière)

M. Paul MONSARRAT (Intelligence Artificielle)

#### PRÉSIDENTE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Mme Cathy NABET

#### DIRECTRICE ADMINISTRATIVE

Mme Muriel VERDAGUER

#### -

#### PERSONNEL ENSEIGNANT

## DOYENS HONORAIRES M. Jean LAGARRIGUE +

M. Jean LAGARRIGUE +
M. Jean-Philippe LODTER +
M. Gérard PALOUDIER
M. Michel SIXOU
M. Henri SOULET

**HONORARIAT** 

### ÉMÉRITAT

M. Damien DURAN Mme Geneviève GRÉGOIRE M. Gérard PALOUDIER

### Section CNU 56: Développement, Croissance et Prévention

56.01 ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE et ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE (Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER)

#### **ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE**

Professeurs d'Université : Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER, M. Frédéric VAYSSE

Maîtres de Conférences : Mme Emmanuelle NOIRRIT-ESCLASSAN, Mme Marie- Cécile VALERA, M. Mathieu MARTY

Assistants: Mme Alice BROUTIN, Mme Marion GUY-VERGER Adjoint d'Enseignement: M. Sébastien DOMINE, M. Robin BENETAH

#### **ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

Maîtres de Conférences : M. Pascal BARON, Mme Christiane LODTER, Mme Christine MARCHAL, M. Maxime ROTENBERG

Assistants: Mme Isabelle ARAGON, Mme Anaïs DIVOL,

#### 56.02 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE (Mme NABET Catherine)

Professeurs d'Université : M. Michel SIXOU, Mme Catherine NABET, M. Olivier HAMEL

Maître de Conférences : M. VERGNES Jean-Noël Assistant: M. Julien ROSENZWEIG

Adjoints d'Enseignement : M. Alain DURAND, Mlle. Sacha BARON, M. Romain LAGARD, Mme FOURNIER Géromine, M. Fabien

BERLIOZ

## Section CNU 57: Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

#### 57.01 CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE (M. Bruno COURTOIS)

#### **PARODONTOLOGIE**

Maîtres de Conférences : M. Pierre BARTHET, Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN, Mme Alexia VINEL

Assistants: Mme. Charlotte THOMAS, M. Joffrey DURAN

Adjoints d'Enseignement : M. Loïc CALVO, M. Christophe LAFFORGUE, M. Antoine SANCIER, M. Ronan BARRE,

Mme Myriam KADDECH

#### **CHIRURGIE ORALE**

Professeur d'Université : Mme Sarah COUSTY

Maîtres de Conférences : M. Philippe CAMPAN, M. Bruno COURTOIS

Assistants: Mme Léonore COSTA-MENDES, M. Clément CAMBRONNE

Adjoints d'Enseignement : M. Gabriel FAUXPOINT, M. Arnaud L'HOMME, Mme Marie-Pierre LABADIE, M. Luc RAYNALDI,

M. Jérôme SALEFRANQUE

#### **BIOLOGIE ORALE**

Professeur d'Université : M. Philippe KEMOUN

Maîtres de Conférences : M. Pierre-Pascal POULET, M. Vincent BLASCO-BAQUE

Assistants: M. Antoine TRIGALOU, Mme Inessa TIMOFEEVA, M. Matthieu MINTY, Mme. Cécile BLANC

Adjoints d'Enseignement : M. Mathieu FRANC, M. Hugo BARRAGUE

## Section CNU 58: Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX (M. Serge ARMAND)

#### DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeur d'Université : M. Franck DIEMER

Maîtres de Conférences : M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN, Mme Delphine MARET-COMTESSE Assistants : Mme Pauline PECQUEUR, M. Jérôme FISSE, M. Sylvain GAILLAC, Mme Sophie BARRERE

M. Dorian BONNAFOUS, Mme. Manon SAUCOURT

Adjoints d'Enseignement : M. Eric BALGUERIE, M. Jean-Philippe MALLET, M. Rami HAMDAN

#### **PROTHÈSES**

Professeurs d'Université : M. Serge ARMAND, M. Philippe POMAR

Maîtres de Conférences : M. Jean CHAMPION, M. Rémi ESCLASSAN, M. Florent DESTRUHAUT
Assistants: M. Victor EMONET-DENAND, M. Antonin HENNEQUIN, M. Bertrand CHAMPION,

Mme Caroline DE BATAILLE, Mme Margaux BROUTIN

Adjoints d'Enseignement : M. Antoine GALIBOURG, M. Christophe GHRENASSIA, Mme Marie-Hélène LACOSTE-FERRE,

M. Laurent GINESTE, M. Olivier LE GAC, M. Louis Philippe GAYRARD, M. Jean-Claude

COMBADAZOU, M. Bertrand ARCAUTE, M. Eric SOLYOM, M. Michel KNAFO, M. Alexandre HEGO

DEVEZA

#### FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Maîtres de Conférences : Mme Sabine JONIOT, M. Karim NASR, M. Paul MONSARRAT
Assistants : M. Thibault CANCEILL. M. Damien OSTROWSKI, M. Julien DELRIEU

Adjoints d'Enseignement : M. Yasin AHMED, Mme Sylvie MAGNE, M. Thierry VERGÉ, Mme Josiane BOUSQUET

-----

Mise à jour pour le 02 mars 2020

#### REMERCIEMENTS

#### A mes parents,

Claudou, Jeannette votre vœux le plus cher était que mes frères et moi réalisions de longues études synonymes de liberté et d'émancipation selon vous. Je crois avoir réalisé ce vœu au-delà de vos espérances concernant les études. Si ce projet, à 40 ans, de reprendre des études plutôt longues, vous a paru complètement fou, vous avez toujours respecté ce choix. Merci pour votre soutien indéfectible.

#### Zoé

Merci pour ta patience, ton aide et tout ton amour sans lesquels je n'aurai pu réussir.

#### Marnie, Léna, Colin et Tizio

Vous m'avez souvent donné du courage quand il m'en manquait parfois. Il me suffisait de penser à vous. Le choix que j'ai fait vous a demandé à vous aussi quelques sacrifices. J'espère en retour que cette aventure vous montrera l'importance de suivre son désir et vous permettra d'élargir le domaine des possibles.

#### Crocos, Rob

Mes deux grands potes! A tous ces bons moments partagés, qu'ils durent encore longtemps. Je vous dédie une part de ce travail.

#### Mes frangins,

Je pense à vous. Vous aussi vous avez pris une part à ce travail.

Mes amis, mes copains et tous les autres à qui je pense aujourd'hui.

#### A notre Président de Jury de Thèse, Monsieur le Professeur Franck Diemer

- Professeur des Universités.
- -Praticien Hospitalier d'Odontologie.
- Diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université de TOULOUSE III.
- -D.E.A. de Pédagogie (Education, Formation et Insertion), Toulouse Le Mirail
- -Docteur de l'Université Paul Sabatier.
- -Responsable du Diplôme Inter Universitaire d'Endodontie à Toulouse.
- -Responsable du Diplôme Universitaire d'Hypnose
- Co-responsable du diplôme Inter-Universitaire d'odontologie du Sport
- -Vice-Président de la Société Française d'Endodontie
- -Lauréat de l'Université Paul Sabatier

« Je vous remercie infiniment d'avoir accepté de présider ce jury de thèse. C'est pour moi un grand honneur. Je vous adresse toute ma reconnaissance pour la qualité de vos enseignements, toujours très riches d'applications, vos conseils avisés, ainsi que pour votre grande bienveillance. Soyez assuré de ma profonde gratitude et de mon respect le plus sincère »

#### A notre jury de thèse, Monsieur le Docteur Karim NASR

- -Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université de TOULOUSE III
- -Master 1, mention Biotechnologie-Biostatistiques
- -Master 2, Recherche en Science des Matériaux
- -Certificat d'Etudes Supérieures de technologie des matériaux employés en Art Dentaire
- -Certificat d'Etudes Supérieures de prothèse Dentaire (Option prothèse Scellée)
- -Responsable du domaine d'enseignement Imagerie et Numérique
- -Responsable de l'Attestation d'Etudes Universitaires d'Imagerie Maxillo-Faciale (CBCT).
- -Responsable du Diplôme Universitaire de CFAO en Odontologie
- -Chargé de mission à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse
- -Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

« Je vous remercie d'honorer ce travail en participant à ce jury de thèse. J'ai pu apprécier au cours de ma formation votre rigueur, votre compétence ainsi que votre grande implication pédagogique, soucieux de nous apporter des connaissances claires et de réelles compétences adaptées à notre pratique clinique. Merci pour l'ouverture de vos enseignements sur une dentisterie moderne et contemporaine. Merci aussi pour votre disponibilité et votre grande sympathie. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance ainsi que de mon sincère respect »

#### A notre jury de thèse, Monsieur le Docteur DESTRUHAUT Florent

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie.
- Expert près la Cour d'Appel de Toulouse.
- Diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université de TOULOUSE III.
- Docteur de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales en Anthropologie sociale et historique.
- Certificat d'Études Supérieures en Prothèse Maxillo-Faciale.
- Certificat d'Études Supérieures en Prothèse Conjointe.
- Diplôme Universitaire de Prothèse Complète Clinique de Paris V.
- Responsable du diplôme universitaire d'occlusodontologie et de réhabilitation de l'appareil manducateur
- Membre de la Compagnie des Experts de justice de Toulouse
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

« Je vous remercie d'honorer ce travail en participant à ce jury de thèse. Merci pour vos enseignements très riches. Je fus très sensible à la façon dont vous rendez compte de cas cliniques concrets tout en les articulant subtilement avec des notions de portées beaucoup plus globales, théoriques et même humanistes. Merci aussi de la confiance dont vous m'avez toujours témoigné, ainsi que de votre grande disponibilité. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance ainsi que de mon sincère respect »

#### A notre directeur de thèse, Monsieur le Docteur Antonin Hennequin

- -Assistant Hospitalo-Universitaire, Faculté d'Odontologie de Toulouse.
- -Diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université de TOULOUSE III
- -DU de Prothèse et Occlusodontologie, Université de TOULOUSE III
- -DU de Recherche Clinique en Odontologie, Université de TOULOUSE III
- -Co-Responsable du DU d'occlusodontologie et de réhabilitation de l'Appareil manducateur
- -Lauréat de l'Université Paul Sabatier TOULOUSE III
- -CES de Prothèse Conjointe-classement : 3ème national
- -CES de Biologie de la Bouche

« Vous m'avez fait l'honneur de diriger cette thèse. Merci de votre soutien et de votre cordiale attention. Les échanges au cours desquels vous m'avez fait partager votre passion, votre érudition envers la dentisterie raisonneront en moi comme une grande source de motivation et d'exigence pour ma pratique. Soyez assuré de mon profond respect. »

#### A notre jury de thèse , Monsieur le Docteur David Mailhes

- Diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire, Université de TOULOUSE III
- Diplôme Universitaire de Prothèse et Occlusodontologie, Université de TOULOUSE III
- Diplôme Universitaire d'odontologie légale et d'expertise, Université de TOULOUSE III
- -Diplôme Universitaire de réhabilitation des maxillaires- Implantologie et greffe osseuse, Université de TOULOUSE III
- -Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

« Je vous remercie d'honorer ce travail en participant à ce jury de thèse. Merci pour votre contribution ainsi que pour le temps important que vous m' avez généreusement consacré. J'ai eu beaucoup de plaisir à partager vos réflexions sur l'implantologie guidée et votre pratique. J'ai beaucoup apprécié votre façon percutante d'expliquer les choses avec humour et un sens éminent de la métaphore. Un grand merci pour tout cela et aussi un grand merci pour l'accueil chaleureux et très convivial au sein de votre cabinet. Soyez assuré de ma profonde reconnaissance ainsi que de mon sincère respect »

« L'autre n'est pas une donnée »

David Pucheu

## Table des matières

Table des matières	13
ntroduction	16
-Première étape de la réhabilitation : l'acquisition et la mise en forme de données numériques	17
I.1- Notion de chaîne numérique ou « digital work flow »	17
I.2- Scanner intra buccal : « l'empreinte optique »	17
I.2.1-Principes et bases théoriques (2,3)	17
I.2.2- Application : Stratégie de scannage d'une arcade complètement édentée en vue d'une réhabilita implantaire	
I.3- La photographie numérique	20
I.3.1-Matériel et réglages.	20
I.3.2-Protocole de prises de vue (6)	21
I.3.3- Eléments d'analyse du sourire. (7,8)	21
I.4-Scanners faciaux.	24
I.4.1-Principes.(14,14,15)	25
I.4.2- Scan facial avec un smart phone : l'application bellus 3D (16)	26
I.4.3-A partir de photos (face , gauche 45°, droite 45°) et logiciel de conception 3D (Meshmixer)	26
I.4.4-A partir du CT-Scan et image 2D de face du patient. (Dolphin 3D Surgery; Dolphin Imaging & Management Solutions(17))	27
I.5-Radiographie 3D	28
I.5.1-CT scan	28
I.5.2- Cone Beam Computed Tomography(20) ou TVFC (Tomographie volumique à faisceau conique)	28
I.5.3-Etude comparative T-Scan et CBCT	30
I.6- Les dispositifs d'enregistrement des mouvements mandibulaire : « JMT Systems ( Jaw Mouvement Tracking Systèmes )»(22–35)	30
I.6.1-Différents principes.	30
I.6.3-Notion d'articulateur complètement adaptable. La dentisterie 4D	37
I.6.4- Différentes façons d'intégrer les données numériques de la cinématiques mandibulaire à un logi de CAO	
I.7-Précision des systèmes d'acquisition de données numériques	38
II. Aide des outils numériques à la planification prothétique	41
II.1-Introduction	41
II.2 L'octa 1 : plan de référence	42
II.2.1- Les articulateurs virtuels. Problématique du transfert du plan de référence.(35,47,48)	42
II.2.2-Protocole de transfert des modèles numériques vers un articulateur virtuel	43
II.2.3-Fusion des différents fichiers numériques afin de créer un « patient virtuel »(50)	44
II.3- L'octa 2 et 3 : position mandibulaire de référence et position thérapeutique	52

II.3.1-Introduction	52
II.3.2- Positions de référence Mandibulaire ; La relation centrée : Méthode d'enregistrement	54
II.3.3 Position mandibulaire thérapeutique	56
II.4-L'octa 4 : situation des dents antéro mandibulaires	71
II.4.1-Introduction(46)	71
II.4.2- Planification numérique de la reconstruction du bloc antérieur mandibulaire	72
II.4.3-Planification / volume osseux : Implantologie guidée	73
II.5-L'octa 5 situation des dents antéro-maxillaire. Aspect esthétique. Face vestibulaire	79
II.5.1-Introduction -ligne des collets, situation du bord libre, situation du bombé vestibulaire	79
II.5.2-DSD.(11,85–96)	80
II.5.3-Chirurgie muco gingivale Planifiée : masques de correction par impression 3D(99,100)	83
II.5.4-Apport combiné des techniques numériques CFAO et CBCT pour le maintien du profil d'émergence.(101)	85
II.5.5- La prise de teinte ( Protocole elab Sasha Hein)(102)	87
II.6-Octa 6 Courbe de spee et plan d'occlusion	92
II.6.1-Interprétation biomécanique de la courbe de Spee. Méthode de construction	92
II.6.2- Prise en compte de la cinématique mandibulaire pour la détermination des courbes occlusale	s 94
II.6.3- Calotte occlusale générée numériquement	94
II.6.4 Reconstitution provisoire pour essayage clinique. Technique de la résine injectée (108–111)	95
II.7-Octa 7 Pentes de guidage et Octa 8 courbes de Wilson et concept de guidage	96
III-Exemple de planification numérique sur des cas cliniques	99
III.1- Cas clinique n°1 : réhabilitions minimalement invasive d'usures généralisées	99
III.1.1-Anamnèse et examen clinique.	99
III.1.2- Position mandibulaire thérapeutique	100
III.1.3- Plan de traitement	100
III.2- Cas clinique n°2 : Implantologie guidée. Pose en MCI d'un bridge complet maxillaire	105
III.2.1- Anamnèse et examen clinique.	105
III.2.2- Plan de traitement	106
V- Perspectives	111
CONCLUSION	117
Tables des illustrations :	119
BIBLIOGRAPHIE : Erreur ! Signet no	on défini.
Titre : Apport des technologies numériques dans la planification prothétique des réhabilitations de gra	
étendue.	
Résumé :	
Mots clés :	
Title: Bringing digital technologies to prosthetic planning for large-scale rehabilitations	131

Summary:......131

## Introduction

Ces dernières décennies, les réhabilitations prothétiques dentaires ont connus une forte évolution ; liées à la fois à la progression des matériaux et à l'amélioration des techniques (comme celle du collage). Evolution liée aussi à la forte progression des outils numériques dans notre profession. La plus forte innovation est sans nul doute la conception et fabrication assistées par ordinateur (CAD/CAM: Computer Aided Design / Computer Aided Manufacturing). Des capteurs (scanner intra buccaux, appareils photographiques numériques, scanner faciaux, CBCT...) permettent d'acquérir des données numériques sur l'anatomie dentaire, osseuse, gingivale et faciale. Des logiciels permettent de recueillir ces données digitalisées, de les utiliser pour planifier et concevoir des prothèses à la fois fonctionnelles et esthétiques de façon complétement virtuelle. Enfin, les outils numériques de fabrication (usineuses, imprimantes 3D) permettent d'effectuer la réalisation et ainsi de repasser de l'espace virtuel à la réalité clinique du patient.

Cette chaîne numérique a permis en outre de faciliter et de rendre plus prévisible le travail du praticien et de son prothésiste, et ainsi de simuler avant tous travaux le résultat attendu ce qui permet au patient de visualiser le traitement proposé. Ces nouveaux outils numériques favorisent ainsi la communication et l'adhésion du patient.

De la même façon, les fichiers numériques, facilement interchangeables, assurent une transmission de l'information rigoureuse et précise entre le prothésiste et le praticien.

L'objectif de ce travail est de faire un inventaire le plus exhaustif possible de ces outils numériques désormais accessibles au cabinet d'omni pratique, et de montrer leurs apports en ce qui concerne la planification prothétique dans les cas de réhabilitations étendues.

Dans un premier temps, j'aborderai les différents moyens d'acquisitions mis à notre disposition afin de collecter les données cliniques du patient, préalable à toute réflexion.

Dans une deuxième partie je détaillerai comment ces outils peuvent être utilisés pour la planification prothétique et comment ils permettent au binôme praticien-prothésiste d'optimiser les traitements.

Enfin la dernière partie illustrera la réalité de ces technologies au cabinet dentaire, avec la présentation de cas cliniques réalisés de façon complètement numérique : « complet digital workflow ».

I-Première étape de la réhabilitation : l'acquisition et la mise en forme de données numériques.

#### I.1- Notion de chaîne numérique ou « digital work flow ».

Les trois étapes fondamentales de la dentisterie numérique sont (1):

L'acquisition de données sur l'environnement buccal du patient et la conversion de ces données en un format numérique, pouvant être ensuite manipulé informatiquement : scanners extra/intra oraux, cbct, instrumentation permettant d'enregistrer la cinématique mandibulaire, images IRM...

Le traitement de ces données par des logiciels dédiés CAO (Conception Assisté par Ordinateur), visant à produire une prothèse à la fois fonctionnelle et esthétique en fournissant des outils de planification

La fabrication assistée par ordinateur par méthode additive (impression 3D) ou soustractive (usineuse) en utilisant des machines-outils à commandes numériques.

Ces trois étapes peuvent intervenir au stade de la planification prothétique concernant des réhabilitations étendues et complexes

#### I.2- Scanner intra buccal: « l'empreinte optique »

#### I.2.1-Principes et bases théoriques (2,3)

L'empreinte optique permet de capturer un objet 3D ou un ensemble de points (surface des dents et muqueuses) et de le convertir en un fichier numérique pouvant être ensuite stocké et manipulé informatiquement. Le format de fichier choisi par la CFAO a été le STL (« Standard Tessellation Language »), correspondant à un standard déjà utilisé dans de nombreux domaines industriels : il permet de coder une surface par une juxtaposition de triangles orientés par un vecteur normal et dirigé vers l'extérieur de la surface fermée ainsi modélisée.

D'autres formats ont été développés par certains fabricants pour rendre compte de la texture et de la couleur de la surface (ex .PY, .OBJ)

Le principe de la capture est de générer dans un repère orthonormé, les 3 coordonnées (x,y,z) d'un ensemble de points appartenant à la surface de l'objet. Pour cela il faut déterminer la distance de l'objet à la caméra :

#### -Différentes méthodes :

- Par triangulation laser (une fois connue la distance entre deux points A et B et les angulations par rapport à un troisième point alors on peut déterminer par trigonométrie les distances de la caméra C à l'objet : AC et BC )
- Par triangulation avec lumière structurée monochromatique ou polychromatique (rendu des couleurs en sus) : on projette une grille sur l'objet et l'analyse de la déformation de la grille permet de remonter à la forme de l'objet
- Par focus/défocus. La distance de la caméra à l'objet est déterminée par rapport au plan focal de l'optique. Lorsque le point est net il est alors à la distance focale connue de la caméra. En faisant varier la mise au point on peut déterminer la distance de l'ensemble des points décrivant la surface.
- Par interférence : En mesurant la différence de phase d'une lumière cohérente entre deux trajets, dont un se réfléchissant sur l'objet, on retrouve la distance à l'objet.

Une fois la capture des points effectuée, il s'agit de reconstruire un fichier numérique 3D représentant l'objet à partir de cet ensemble de vues ou « nuage de points ». Pour cela les différentes images doivent être mise en correspondance. Des points d'intérêts (zone de contraste, de transition, de forte courbure) sont reconnus sur chaque vue et un algorithme permet de les mettre en concordance sur les différentes vues, ce qui permet d'associer les différentes images prises par la caméra. Ainsi seuls les points d'intérêts reconnus sur les différentes images sont conservés pour reconstituer un modèle numérique 3D de l'objet, ce qui permet d'alléger le fichier et faciliter les manipulations numériques ultérieures (CAO).

Les scanners actuels fonctionnent la plupart du temps en « full motion » ou enregistrement dynamique ; au lieu d'acquérir plusieurs images type photographies, ils filment et enregistrent un plus grand nombre d'images et de points par secondes, sous un plus grand nombre d'angles. Cela permet de gagner en précision sur la modélisation 3D finale. L'enregistrement dynamique laisse aussi la possibilité d'analyser l'occlusion dynamique du patient. Mais un surplus d'image peut provoquer au contraire un manque de précision, voire des aberrations (mauvais recalage d'images ; trop d'informations risquant de provoquer de mauvaises interprétations et ralentir le logiciel de traitement d'image). Plus il y a d'images capturées, plus il y aura de procédures de réalignements pour juxtaposer correctement ces différentes images, ce qui à chaque fois provoque une erreur et nuit à la précision finale du modèle numérique 3D. Les constructeurs ont donc, dans leur notice, prodigué des conseils de scannage afin d'optimiser le ratio acquisition de point d'intérêts / nombre d'images à réaligner.



## Exemple I : Arcade complète inférieure, antagoniste

- ▶ Étape 1 : Antagoniste : commencez directement sur l'occlusion (première molaire), puis déplacez le scanner le long de l'occlusion. Retournez lentement le scanner lorsque vous passez les incisives.
- ▶ Étape 2 : Mandibule : tournez de 45 à 90 degrés vers la face linguale et déplacez le scanner vers la deuxième molaire. Utilisez l'embout pour écarter la langue.
- **Étape 3 :** Déplacez le scanner vers la face vestibulaire et terminez le balayage vestibulaire.

Figure 1 exemple de stratégie de scannage tiré du manuel d'utilisation de Trios 3 shape

## I.2.2- Application : Stratégie de scannage d'une arcade complètement édentée en vue d'une réhabilitation implantaire.

Scanner une arcade complète, qui de plus est édentée (donc avec des courbes douces, et peu ou pas de points d'intérêts permettant un recalage précis des différentes images acquises) reste un défi pour obtenir une précision suffisante permettant de planifier une réhabilitation implantaire et réaliser une suprastructure pouvant s'ajuster passivement sur les piliers implantaires sans réaliser de modèle physique.

La technique consiste à faire deux scans(4) :

Le premier scan pour situer les implants (scan body) sur lequel on effacera les tissus mous :



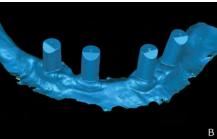
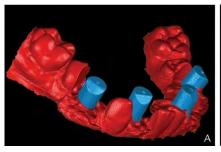


Figure 2 (A) vue intra buccale de l'arcade (B) Scan des implants avec scan body(4)

On réalise ensuite via un logiciel de conception d'objet 3D et en partant de ce premier scan, un objet annexe figurant une arcade dentée et s'adaptant aux tissus mous du patient. On fabrique cette gouttière par impression 3D et on la met en place sur l'arcade, les scans body dépassant la surface de cet objet annexe.



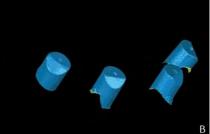


Figure 3 (A) Scan avec objet annexe (B) Objet annexe effacé (4)

Un deuxième scan est effectué avec l'objet annexe en place. Les nombreux points d'intérêts figurant sur cet objet annexe permettent d'effectuer un réalignement beaucoup plus précis des différentes vues acquises. La position relative des implants est alors repérée avec une précision accrue.

Finalement, afin d'obtenir l'empreinte complète sur le deuxième scan, l'objet annexe est effacé et remplacé par les tissus mous du patients (issus du premier scan).

#### I.3- La photographie numérique.

#### I.3.1-Matériel et réglages.

La photographie numérique va apporter des éléments objectifs à l'examen de la cavité buccale et de l'expression du visage. Elle va nous permettre d'examiner les proportions du visage, le cadre labial du sourire, les rapports des dents avec la gencive, leurs proportions, leurs structures de surface ainsi que leur colorimétrie. Elle représente un examen complémentaire fondamental pour toute réhabilitation esthétique, en synergie avec les logiciels d'analyse esthétique du sourire (DSD : Dental Smile Design)

#### Le matériel nécessaire (5) :

- un appareil photographique de type reflex.
- un objectif dit « macro » dont la focale est comprise entre 85 et 105 mm.
- un système d'éclairage (flash annulaire, déporté, cobra ou de studio) et filtres polarisants afin d'éliminer les reflets spéculaires.



Figure 4 Matériel nécessaire

• accessoires nécessaires à la prise de vue tels que des supports de lèvres, des contrasteurs et des miroirs.

Les réglages : que ce soit pour réaliser des photographies intrabuccales ou extrabuccale, les réglages au niveau de la vitesse d'obturation (1/125 s), de la sensibilité du capteur ccd (200 iso), de la balance des blancs, sont les mêmes.

Pour les photographies intra buccale, on a besoin d'une grande profondeur de champ, on privilégiera des petites ouvertures (f 20 à 29), alors que pour le portrait on jouera sur les valeurs artistiques d'une faible profondeur de champ en choisissant une plus grande ouverture (f4 à f13).

#### 1.3.2-Protocole de prises de vue (6)

Nous photographions le visage de face, de trois quarts et de profil selon 4 expressions (lèvres au repos, sourire léger, sourire forcé, sourire forcé bouche ouverte). Cela nous permet d'envisager la cinématique du sourire, la position relative des lèvres par rapport aux dents. A ce stade nous pouvons aussi filmer lorsque le patient s'exprime et rit.

Nous réalisons aussi des photographies intrabuccales (avec écarteurs) : frontale, ¾, profil, occlusale.

Le protocole utilisé pour photographier doit être rigoureux et reproductible de façon à pouvoir comparer les photos entre elles afin de pouvoir les combiner (vue extra buccale avec vue intra buccale) sans déformation. En particulier il faudra prendre soin de conserver les mêmes grossissements, la même distance au sujet pour la prise de vue, systématiser l'orientation du visage (photographie de face bien symétrique afin d'éviter les déformations liées aux erreurs de parallaxe).

Enfin considérant le rendu de la couleur il faudra calibrer le capteur CCD de l'appareil au niveau chromatique et au niveau luminosité. Il sera utile de réaliser des clichés en lumière polarisée (cf protocole Elab détaillé ultérieurement)

Enfin la lumière incidente, souvent résultant de l'utilisation de Flash, devra-t-elle aussi répondre à une forme de standard et de reproductibilité. Pour de plus longs développements se référer à la prise de teinte (partie II.5.4-).

#### 1.3.3- Eléments d'analyse du sourire. (7,8)

La qualité de la réhabilitation esthétique du sourire est le résultat d'un rapport harmonieux entre les dents, la gencive, le cadre labiale et facial(7,9–11). Avant de se lancer dans la reconstruction d'un sourire, il convient donc de mener une analyse esthétique sur un plan extra-oral et intra-oral et surtout de pouvoir mettre en rapport les deux types de vues. La photo numérique et logiciels de traitement associés représentent sans aucun doute un moyen efficace de mener à bien cette analyse en permettant très facilement de transposer des repères extrabuccaux à des vues intra buccales (ce qui pouvait être fait de façon plus laborieuse classiquement avec des systèmes comme Ditramax)(12)

#### I.3.3.1-Analyse dento faciale(6-8)

La référence verticale du visage est constituée par la ligne sagittale médiane (Glabelle-bout du nezphiltrum-point menton). Idéalement la ligne inter incisive doit être confondue avec cette ligne. Cependant un léger décalage est acceptable, si on conserve le parallélisme.

La ligne bi pupillaire (et bi commissurale) représente la référence horizontale. Le bord libre des incisives doit être parallèle à cette ligne.

L'équilibre entre le poids visuel du regard et du sourire doit être rétabli (couleur des dents par rapport à la carnation et à la couleur des yeux)

Proportions de la face : trois portions égales , 1/3 supérieur, moyen et inférieur. Il faudra choisir une dimension verticale correcte pour le tiers inférieur de la face.

#### I.3.3.2-Analyse dento labiale (6,13)

La lèvre supérieure nous indique le type de sourire. Classiquement on distingue trois niveaux :

- ✓ Ligne du sourire moyenne : toute la surface dentaire est visible ainsi que les embrasures gingivales.
- ✓ Ligne du sourire basse : gencive non visible
- ✓ Ligne du sourire haute : gencive découverte en totalité. On distingue le cas où la gencive est découverte de moins de 3mm de celle découverte de plus de 3mm considérée comme disharmonieuse.

La lèvre inférieure guide la forme de la ligne du sourire.

L'exposition des dents au repos est comprise entre 1mm et 5mm en fonction de l'âge du sexe du caractère pulpeux des lèvres. La position du bord libre des incisives maxillaires est un point clef du rajeunissement du sourire.

Le bord incisif maxillaire se situe à l'intérieur du bord interne de la lèvre inférieure Restaurer le corridor labial afin de donner de la profondeur au sourire.

#### I.3.3.3-Analyse dento-gingivale et dentaire

Emplacement des collets parallèles au bord des incisives centrales et symétriques Zéniths gingivaux décalés en distal Inclinaison axiale des dents

Forme des dents, proportions, couleurs et caractérisations.

## I.3.3.4- Logiciels d'aide à la planification pour une réhabilitation esthétique : le Projet Esthétique Virtuel (PEV)

Un logiciel de création de projet esthétique virtuel doit permettre de recueillir l'ensemble de ces données essentielles. Initialement Christian Coachman en inventant sa méthode du dental smile design cherchait essentiellement à améliorer la communication des données entre le praticien et le prothésiste afin d'obtenir une prédictibilité fiable du résultat final. Le praticien conçoit un projet virtuel ce qui permet d'envoyer toutes les informations quantifiées et précises au prothésiste afin que celui-ci réalise des cires diagnostiques identiques au projet virtuel.

Le protocole initial du DSD (11) utilise un logiciel de présentation Keynote afin de procéder à l'analyse digitale du sourire et permettre l'élaboration d'un Projet Esthétique Virtuel. Depuis, avec le développement de la dentisterie numérique, la démocratisation des empreintes numériques, tous les concepteurs de scanners intra buccaux et d'outils cfao, proposent dans leurs suites logicielles, des modules permettant de réaliser l'analyse du sourire et de quantifier les données nécessaires à la création d'un nouveau sourire.

La solution historique avec un logiciel de présentation(11), nécessite de la part du praticien une connaissance approfondie de l'élaboration d'un projet virtuel et des différents critères d'analyse du Dental Smile Design. Les logiciels de présentation (keynote, powerpoint) offrent ainsi une grande liberté dans la procédure d'analyse et de construction du PEV. Les logiciels dédiés au smile design offrent au praticien d'être complètement guidé au détriment de la maîtrise par le praticien de la liberté d'analyse. Les formats de fichiers fermés de ce type de logiciels réduisent l'inter polarité avec les autres logiciels de design 2d ou 3d ne faisant pas parti de la même suite. Il existe cependant de plus en plus la possibilité, au sein de ces logiciels, d'exporter les fichiers au format STL.

De plus ces logiciels ont permis d'étendre le concept du DSD 2D, à un environnement 3D avec en particulier l'acquisition d'empreinte optique au format STL, scans faciaux, en plus de la photographie et élaboration du PEV 3D.

Le tableau ci-dessous présente l'offre non exhaustive sur le marché en 2017 des logiciels disponibles pour mener à bien la planification virtuelle d'un projet de réhabilitation esthétique (7) :

L'offre reste la même en 2020 avec quelques nouveautés, essentiellement des applications androïd ou ios. Une nouvelle application dédiée créer par Christian Coachman sera détaillée à la partie II.5.2-.

Logiciel	Marque	Date de Sortie	Pays	Acquisition des données	Analyse esthétique/ diagnostic	PEV 2D / PEV 3D	Aide à la réalisation de prothèse par CFAO	Système ouvert/ fermé	Prix
Cerec Smile Design	Sirona	2013	Allemagne	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Non	3D	CFAO seulement	Fermé	Vendu avec les logiciel Cerec Chairside et InLab Software.
DSD Connect	DSD Technology	2013	Roumanie	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Oui, adaptable en fonction des besoins via Ppt ou Keynote	2D, via Ppt ou Keynote	Oui, transfert complet du PEV	Ouvert	989 <b>€</b> /an
Nemo DSD 2D	NemoTec	2016	Espagne	Photographie numérique et/ ou vidéo.	Oui, guidée par le logiciel	2D	Non	Ouvert	1190 €
Nemo DSD 3D	NemoTec	2016	Espagne	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Oui, guidée par le logiciel	3D	Non	Ouvert	2990 €
Dental GPS	Dental GPS	2006	Canada	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Limitée, basée sur la théorie de Méthot	2D	Oui, transfert du plan frontal du PEV	Ouvert	1990 \$
Digital Smile System	Digital Smile System	2013	Italie	Photographie numérique et/ ou vidéo.	Oui, guidée par le logiciel	2D	Oui, transfert du plan frontal du PEV	Ouvert	949 € pour le version premium
G Design	Hack Dental	2015	Roumanie	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Oui, guidée par le logiciel	2D	CFAO seulement	Ouvert	500 € pour le version premium
Romexis Smile Design	Planmeca	2015	Finlandais	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Oui, guidée par le logiciel	2D	Oui, transfert du plan frontal du PEV	Fermé	990 €
Smile Composer 3Shape	3Shape	2010	Danemark	Photographie numérique et/ ou vidéo, et empreinte optique.	Oui, limitée	3D	CFAO seulement	Fermé	Vendu avec le logiciel Dental System 2015 (CAD)

Figure 5 Logiciels disponibles en 2017 pour la réalisation d'un projet esthétique

#### I.4-Scanners faciaux.

Le scan du visage en trois dimensions est devenu un outil de visualisation hautement souhaitable pour optimiser la planification esthétique, la communication avec le prothésiste. Quand un scan de visage en 3D est associé à des scanners intra-buccaux ou à faisceau conique (CBCT), les professionnels des soins dentaires peuvent présenter visuellement des simulations avant / après aux patients pour une meilleure acceptation des traitements proposés.

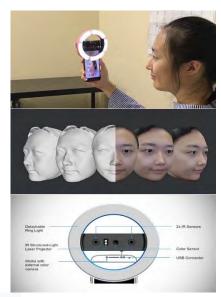
#### <u>I.4.1-Principes.(14,14,15)</u>

Les technologies de scan 3D optique peuvent être classifiées en quatre grandes catégories qui reposent (excepté pour la photogrammétrie) sur les mêmes principes physiques que pour les scanners intraoraux, l'objectif étant identique. Il s'agit d'obtenir un ensemble de points repérés par leurs coordonnées dans un repère orthonormé qui permettent d'acquérir les caractéristiques d'une surface en 3D. Ici, le visage du patient. Les logiciels CAO permettent de convertir ces fichiers de nuages de points en fichier STL ou JOB si on veut avoir accès à la couleur et à la texture de la surface.

- Le scan 3D par triangulation laser : consiste à projeter un rayon laser et à étudier sa trajectoire. En fonction de sa déviation il est possible d'en déduire les propriétés de la surface scannée en 3D.
- La lumière structurée : une lumière dont les caractéristiques sont connues (comme une grille régulière par exemple) est projetée sur la surface à scanner en 3D. Un capteur enregistre les déformations de la lumière et en déduit la forme de la surface scannée en 3D.
- L'impulsion laser: c'est une technologie de scan 3D basée sur le calcul de la durée mise par un rayon laser pour toucher une surface et revenir. Également appelée « scan 3D par temps de vol » cette technologie est basée sur la connaissance précise de la vitesse de la lumière et des calculateurs très précis qui mesurent précisément la durée du trajet parcouru par le laser. En répétant un très grand nombre de fois l'émission du laser et le calcul de la distance qui sépare le scanner 3D de la surface à scanner en 3D, les propriétés de la surface 3D sont capturées.
- La photogrammétrie : également appelée scan 3D à partir de photographies. Cette technique se base sur de l'analyse informatique poussée des informations contenues dans des photographies. Les informations extraites permettent de positionner en 3D le lieu où les photographies ont été prises et d'en déduire le scan 3D du sujet (objet, environnement ou personne).
- **Stéréographie**: reconstruction du relief de la face à partir de deux images planes prise par deux caméras différente séparée d'une distance connue. Cette technique reproduit le principe de la vision humaine, les algorithmes informatiques se substituant au travail effectué par le cerveau.

#### 1.4.2- Scan facial avec un smart phone: l'application bellus 3D (16)

La caméra Bellus3D Face Camera Pro comprend deux projecteurs de lumière structurée dans le proche infrarouge (NIR), deux capteurs d'image NIR et un capteur d'image couleur combinent des données de profondeur 3D haute résolution et cartes de texture d'image. Plus de 500 000 points de données sont capturés lors du processus de numérisation, qui sont ensuite utilisés pour reconstruire un modèle numérique 3D très détaillé avec une précision de profondeur inférieure au millimètre. Le modèle de visage 3D peut être exporté dans un format de fichier 3D standard vers d'autres applications pour un traitement. Une fois le processus de balayage de quinze secondes terminé, le logiciel d'application Bellus3D permet à l'utilisateur de faire



pivoter complètement, zoomer et voir leur visage réaliste en trois Figure 6 Bellus 3D Face camera pro dimensions avec une précision inférieure au millimètre.

Pour réaliser un scan, l'utilisateur doit tourner la tête d'un côté à l'autre en séquence guidée par l'application au cours du processus de numérisation.

Bellus3D annonce deux nouveaux produits à la conférence AAO 2019 (Américan Association of Orthodontist) :

- Bellus3D Dental Pro est une application dentaire de numérisation de visage en 3D qui numérise et reproduit le visage 3D d'un utilisateur en moins de 15 secondes sur un Apple iPad Pro ou un iPhone X. Une fois l'analyse terminée, une fonction d'alignement en un clic découpe automatique des dents dans la lèvre et enregistre le scan 3D du visage pour l'aligner sur les scanners intra-buccaux ou CBCT dentaires pour une utilisation immédiate dans les logiciels de conception dentaire. L'application nécessite l'utilisation d'un Apple iPhone ou d'un iPad Pro qui inclue la caméra intégrée Face ID / TrueDepth.
- La nouvelle application Bellus3D Face Camera App 2.0 pour Windows a des fonctionnalités similaires à celles de Bellus3D Dental Pro mais implémentée pour la plateforme Windows

#### 1.4.3-A partir de photos (face, gauche 45°, droite 45°) et logiciel de conception 3D (Meshmixer)

Trois photographies du patient prises sous trois angles différents (de face, 45° degrés droite et gauche) permettent de reconstituer un scan facial du patient suffisamment précis pour rendre compte d'une évaluation 3D d'un projet de réhabilitation esthétique.

En utilisant un programme de conception 3D et leur fonction de fusion et d'alignement de différents fichiers, nous pouvons fusionner les différentes photographies pour recréer le volume du visage

comme si on avait réalisé un scanner facial. Le procédé est plus long et moins précis (il y a aura plus de zones non définies avec ce protocole qu'avec un véritable scan facial) mais les logiciels utilisés sont libres, il suffit d'avoir un appareil numérique. Cela peut être très intéressant, en particulier dans un contexte de formation.

## I.4.4-A partir du CT-Scan et image 2D de face du patient. (Dolphin 3D Surgery; Dolphin Imaging & Management Solutions(17))

Méthode: On réalise une acquisition CT-Scan de la zone oro faciale afin d'acquérir toutes les structures osseuses crâniennes du patient. Afin de bénéficier d'une meilleure définition au niveau du contraste et pouvoir ainsi mettre en évidence les tissus mous du patient.

La méthode consiste à générer un fichier STL à partir du nuage de point à la surface des tissus mous. On lui superpose une photographie 2D en choisissant des points remarquables sur les deux fichiers : glabelle, nasion, pointe du nez, .. A partir de cette superposition, le logiciel a suffisamment d'élément pour reconstituer une texture de surface permettant de produire un scan facial réaliste.

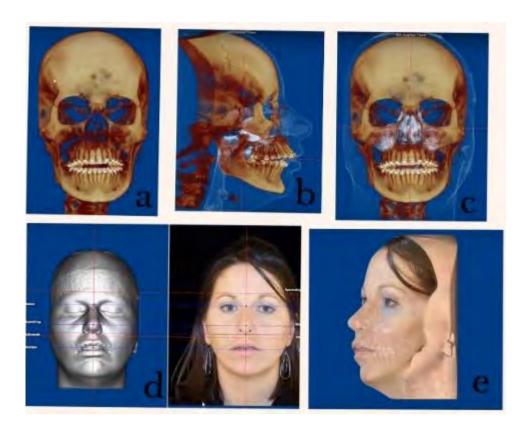


Figure 7 a-t-scan de l'ensemble du crâne. b-visualisation des tissus mous de face c- de profil d-reconstitution de la surface du visage (fichier stl) à partir du nuage de points des tissus mous en surface et superposition d'une photo 2D via une série de points remarquables (glabelle, pointe du nez, nasion, lèvre inférieur) ce qui permet de créer la texture du visage et reconstituer un scan facial réaliste e-

Une fois les déplacements maxillaires et mandibulaires planifiés dans le cadre d'une chirurgie orthognatique, cette technique permettant de replacer les tissus mous par rapport au squelette permettra de simuler de façon prédictible les modifications du visage conséquentes à la chirurgie. Il faut conserver quelques réserves quant à la prédictibilité de cette technique, où une simulation initiale réalisée par le praticien l'obligerait dans sa chirurgie à un certain degré de conformité. Ainsi certaines attentes du patient pourraient éventuellement ne pas être obtenues, dans un contexte médico-légal toujours un peu compliqué en chirurgie orthognathique.

Une autre technique à partir du CBCT permettrait de reconstituer les tissus mous en se basant sur des moyennes statistiques de leur épaisseur dans différentes zones du visages. (18,19)

Dans leur étude (19) les auteurs Lee K-M, Lee WJ, Cho J-H, Hwang H-S, publient en mars 2012, une étude de l'épaisseur des tissus mous à la surface du visages à 31 endroits différents sur 20 sujets. Les mesures d'épaisseur montrent une bonne corrélation entre les 20 sujets et pour 28 repères sur les 31. Les auteurs concluent à la fiabilité de cette méthode pour la reconstruction d'un scan facial à partir d'un fichier CBCT à conditions de réévaluer les repères sur lesquels baser l'extrapolation de la position des tissus mous par rapport aux tissus durs. Dans une autre étude (18) les auteurs Hwang H-S, Kim K, Moon D-N, Kim J-H, Wilkinson C., en 2014, étudient la relation entre les tissus durs et les tissus mous dans la zone nasale à partir de T-scan sur 60 individus et concluent sur la possibilité de reconstituer le massif nasal à partir d'un CBCT de façon prédictible.

#### I.5-Radiographie 3D

#### I.5.1-CT scan

La tomodensitométrie (TDM), dite aussi scanographie, tomographie axiale calculée par ordinateur (TACO), CT-scan (CT: computerized tomography), CAT-scan (CAT: computer-assisted tomography), ou simplement scanner ou scanneur pour l'appareil, est une technique d'<u>imagerie médicale</u> qui consiste à mesurer l'absorption des <u>rayons X</u> par les <u>tissus</u> puis, par traitement informatique, à numériser et enfin reconstruire des images <u>2D</u> ou <u>3D</u> des structures anatomiques. Pour acquérir les données, on emploie la technique d'analyse <u>tomographique</u> ou « par coupes », en soumettant le patient au balayage d'un <u>faisceau</u> de <u>rayons X</u>.

Dans les appareils modernes, l'émetteur de rayons X (<u>tube à rayons X</u>) effectue une rotation autour du patient en même temps que les récepteurs situés en face, et qui ont pour fonction de mesurer l'intensité des rayons après qu'ils ont été partiellement absorbés durant leur passage à travers le corps. Les données obtenues sont ensuite traitées par ordinateur, ce qui permet de recomposer des vues en coupes bidimensionnelles puis des vues en trois dimensions de l'organe considéré. Pour notre utilisation, la sphère oro faciale.

#### 1.5.2- Cone Beam Computed Tomography(20) ou TVFC (Tomographie volumique à faisceau conique)

Techniquement le principe de fonctionnement du cbct repose sur un générateur de rayon X qui émet un faisceau conique qui traverse la zone à explorer avant d'être analysé par un système de détection. L'émetteur de rayon et le capteur sont solidaires et alignés. Ils réalisent un mouvement

de rotation autour du sujet permettant d'acquérir différentes projections radiologiques 2D du volume à explorer. Un algorithme permet ensuite de reconstituer le volume à partir des vues 2D.

Chaque volume peut être découpé en unités élémentaires appelé voxel (volume élément), constituant un pixel en trois dimensions. Dans le cas des CBCT, les voxels sont cubiques. Ainsi, quel que soit le plan de coupe choisi, les images présentent toujours la même définition.

La taille du voxel est l'élément définissant la résolution spatiale de l'image. En fonction des fabricants, la résolution la plus fine peut atteindre 75 ou 100  $\mu$ m contre 300  $\mu$ m pour un scanner classique.

La taille du voxel dépendra de la taille du volume exploré. Plus ce volume est petit et plus la résolution sera importante.

Actuellement, le marché et les recommandations s'orientent vers des champs variables dont la collimation du faisceau permet d'adapter la taille de la fenêtre d'examen, donc la zone exposée, à la question clinique.

Ainsi, un champ restreint à haute résolution avec des voxels de petite dimension est utilisé pour l'exploration des détails endodontiques, la recherche de fêlures, de canaux surnuméraires ainsi que l'analyse des bords des lésions kystiques.

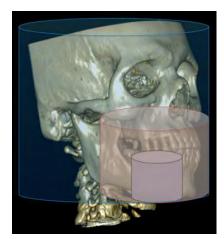


Figure 8 Différentes tailles de champ de vue : petit champ 4 × 5 cm, champ moyen 8 × 8 cm ou 10 × 10 cm. et grand champ.

Les champs moyens de  $8 \times 8$  cm autorisent l'examen d'une arcade ou  $10 \times 10$  cm, et grand champ. complète, ceux de  $10 \times 10$  cm les deux arcades ou l'arcade maxil-

laire et les sinus maxillaires. Les champs supérieurs permettent l'examen de l'ensemble de la face, voire de la base du crâne, et sont à privilégier dans les indications de chirurgie maxillofaciale ou orthognathique.

Si la résolution spatiale est importante, le mode d'acquisition du volume en CBCT génère un bruit important ce qui génère beaucoup d'artefacts, en particulier lorsqu'il existe des zones de transition à fort contraste, comme c'est le cas pour des parties métalliques très radios opaques par rapport aux tissus environnant.

Le fichier issu de l'examen CBCT est enregistré au format DICOM (« Digital imaging and communications in médecine). Ce format a été créé en 1985 afin d'assurer la compatibilité et le transfert d'images entre les machines de différents constructeurs, qui jusqu'alors utilisaient bien souvent un format de fichier propriétaire. Ce format contient en plus de l'image volumique des informations liées à la contextualisation et la traçabilité de l'examen (informations administratives du patient , de l'établissement, type d'examen, appareil utilisé..)

#### I.5.3-Etude comparative T-Scan et CBCT

Suivant le type d'appareil et suivant les réglages d'intensité et de tension du tube d'émission à RX , les doses efficaces relevées d'après(21) :

Dose efficace scanner médical (T-Scan) 280 à 1410 μSv pour un examen cranio facial

Dose efficace CBCT champ large 8,8 à 1073  $\mu$ Sv , champ moyen 3,9 à 674  $\mu$ Sv et petit champ 9,7 à 197  $\mu$ Sv

Le principal avantage du CBCT par rapport au t-Scan est la réduction significative des doses reçues par les patients pour les mêmes volumes d'examens (cf données précédentes).

Le pouvoir de résolution, c'est-à-dire la capacité à distinguer des éléments de petite taille, est conditionnée par la taille des voxels. Là encore l'avantage est au CBCT qui peut générer des voxels de très petites dimensions. Pour le CBCT, en petit champ un voxel est équivalent à un cube de 80µm en moyenne, jusqu'à 250µm pour du grand champ, alors que pour le scanner médical la taille du Voxel correspond à un parallélépipède rectangle de longueur 600µm par une largeur de 270µm en moyenne.

De plus concernant le CBCT, les voxels étant cubiques, isotropes, toutes les coupes auront la même définition. Pour le scanner médical les voxels sont anisotropes et les coupes n'auront pas la même précision dans tous les plans de l'espace. Les coupes axiales correspondant à la largeur du voxel, auront la meilleure précision.

Deux points, par contre, seront en défaveur du CBCT : le contraste et le bruit associés à la reconstruction de l'image. L'exposition d'un grand volume en une seule rotation pour le CBCT génère beaucoup plus de rayonnement diffusé et les algorithmes de reconstruction des coupes depuis un volume, ne donnent pas la possibilité de distinguer les faibles variations de densité. Le CBCT nous permettra de distinguer des zones de densités très différentes. Le scanner en produisant une coupe axiale à chaque rotation, aura une bien meilleure résolution en contraste et rendra possible la caractérisation des tissus mous par une mesure fiable des unités Hounsfield.

Cet inconvénient n'est en rien une limite pour l'utilisation dédiée au domaine dentaire et qui consiste avant tout à mettre en évidence les structures dentaires et osseuses.

# I.6- Les dispositifs d'enregistrement des mouvements mandibulaire : « JMT Systems ( Jaw Mouvement Tracking Systèmes )»(22–35)

#### I.6.1-Différents principes.

Les dispositifs que nous allons décrire permettent d'enregistrer le mouvement de la mandibule par rapport à un repère fixe lié au crâne ou à l'arcade maxillaire. Les données ainsi enregistrées peuvent alors être exportées dans un logiciel CAD, permettant de superposer les modèles numériques, le CBCT et de visualiser les mouvements en temps réels de la mandibule par rapport aux structures crâniennes. Différents systèmes proposés sur le marché permettent de réaliser cela au cabinet. Ces systèmes sont basés sur différentes technologies.

#### I.6.1.1-Système optique : système Modjaw(23,24)

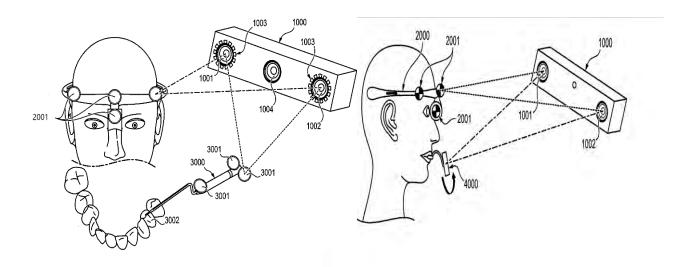


Figure 9 Schéma de principe du système Modjaw

L'enregistrement de la cinématique mandibulaire se fait à l'aide de marqueurs réfléchissants dont les déplacements seront enregistrés et mesurés par deux caméras dites stéréoscopiques (1001 et 1002) pourvues d'un émetteur infrarouge (1000). L' émetteur infrarouge permet d'améliorer la visibilité par les caméras stéréoscopiques des marqueurs réfléchissant (2001,3001,4000). On équipe le patient de ces marqueurs fixés sur le front du patient pour une part (référence crânienne), d'autre part sur l'arcade mandibulaire (à l'aide d'un système intermédiaire ressemblant à une fourchette d'arc facial, fixé aux faces vestibulaires de l'arcade mandibulaire par l'intermédiaire d'un silicone bite (afin de ne pas gêner l'occlusion).

Un pointeur(3000), lui-même pourvu de trois marqueurs réfléchissant (3001) permet de repérer dans le système de coordonnées lié aux caméras, n'importe quel point touché par le stylet du pointeur (exemple sur le schéma , 3002, pointe cuspidienne de la cuspide vestibulaire de 34). Cela permettra de repérer par exemple le plan axio orbitaire en pointant le point sous orbitaire droit et les



Figure 10 : système modjaw

deux condyles. Il permettra de repérer aussi des points de l'arcade dentaire. Nous reviendrons sur l'utilité de déterminer les coordonnées de points de référence dans un même système de coordonnées dans la partie où nous envisagerons la possibilité de créer un patient virtuel (II.2.3-)

D'autres systèmes basés sur des mesures optiques sont aussi disponibles sur le marché pour l'analyse cinématique des mouvements mandibulaires : Freecorder Bluefox (36,37) et le nouveau Zebris JMA optic system (38) évolution du Zebris JMA.

# I.6.1.2- Système basé sur la propagation d'ondes ultrasonores : Zebris JMA , JMT+ et SICAT Fonction ( Dentsply Sirona)

#### I.6.1.2.1- SICAT JMT+

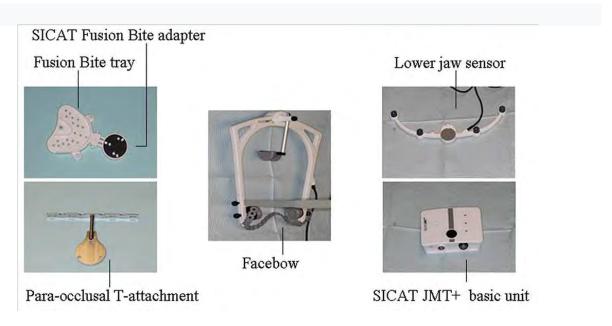


Figure 11 : Principaux composants du système SICAT Jaw Motion Tracking System

Le système SICAT JMT + comprend principalement un arc facial (Facebow), un capteur mandibulaire (Lower Jaw Sensor), un plateau SICAT Fusion Bite (Fusion bite Tray), un SICAT Fusion Bite adaptateur, un accessoire en T para-occlusal, une unité d'acquisition des signaux (SICAT JMT+ Basic Unit) et le logiciel d'application SICAT JMT. L'arc facial a une plaquette nasale pour aider à le stabiliser, un bandeau arrière pour sécuriser la position. Il contient six microphones à ultrasons pour recevoir les informations de quatre émetteurs à ultrasons solidaires du capteur de la mâchoire inférieure. Les modules récepteur et émetteur sont connectés à l'électronique d'évaluation dans l'unité d'acquisition SICAT JMT + via un câble de connexion. Le plateau SICAT Fusion Bite est une fourchette de transfert (permettant de jumeler les données DICOM avec les données cinématiques du mouvement mandibulaire). Il peut être connecté au capteur de la mâchoire inférieure par l'adaptateur SICAT Fusion Bite. Il y a huit marqueurs radio-opaques sur le plateau, qui serviront de repères pour la fusion des données CBCT et JMT. L'attachement en T para occlusal est attaché aux dents inférieure par un attachement magnétique, permettant alors l'enregistrement des mouvements mandibulaires.

Pendant l'enregistrement, les émetteurs sur le capteur de la mâchoire inférieure émettent en continu des impulsions, et le système mesure le temps de propagation entre les microphones émetteurs et les modules récepteurs; calcule les coordonnées absolus à l'aide d'une triangulation ; et convertit ainsi les temps de propagation de plusieurs signaux acoustiques en informations spatiales. Le système enregistre les positions mandibulaires par rapport à un repère fixe crânien. Les mouvements de la tête du patient n'ont donc aucune incidence sur la mesure.

Les données cinématiques informatisées sont enregistrées au format standard XML pouvant directement être intégrée dans un logiciel de CAO type Exocad.

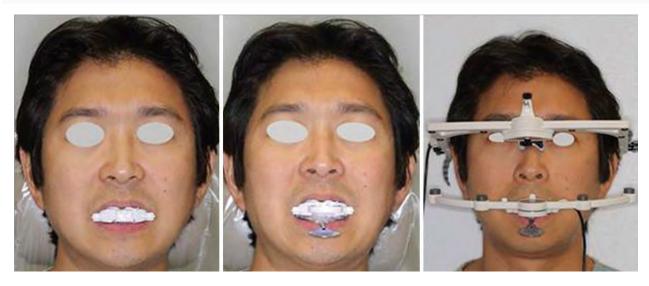


Figure 12 : Appareil sur la tête du patient. De gauche à droite : Le SICAT Fusion Bite dans la bouche ; l'attachement para occlusal en T attaché à l'arcade inférieure; L'arc facial positionné de manière stable sur la tête du patient avec le capteur mandibulaire fixé sur l'attachement para occlusal

#### I.6.1.2.1- Zebris JMA+ Analyser.



Le système Jaw Motion Analysis (JMA) est un appareil de capture des mouvements mandibulaires par ultrasons qui permet de réaliser les mêmes tracés qu'un axio-graphe (mouvements des condyles) et propose en plus d'enregistrer l'enveloppe limite des mouvements de la mandibule.

On retrouve pratiquement les mêmes éléments que le SICAT JMT et la mesure s'effectue sur le même principe.

Il se compose :

- de trois émetteurs d'ultrasons situés au niveau labial sur un arc inférieur. Cet arc est relié par contacts magnétiques à une four-

chette propriétaire agrégée à l'arcade dentaire mandibulaire ;

– et d'un système de quatre récepteurs sous forme d'arc facial fixé au niveau du visage du patient à l'aide d'un appui nasal et d'une lanière à appui pariétal.

Le JMA se fonde comme le SICAT JMT sur la mesure de la durée de parcours d'ultrasons entre émet-

teurs et récepteurs. L'émission « pulsée » des ultrasons est contrôlée à partir d'un ordinateur. Les coordonnées spatiales des deux points condyliens et d'un point infra-orbitaire sont définis à l'aide d'un stylet pour définir le plan de référence axio-orbitaire. La durée de parcours des ondes entre les émetteurs et chacun des récepteurs est alors déterminée. Enfin, ces durées sont converties en valeurs de distances définissant la position relative de l'arc inférieur par rapport à l'arc facial. Le JMA suit la position dans l'espace de trois points formant un plan triangulaire

Le stylet servant à définir les trois points est relié à l'arc émetteur. Les mouvements d'au Figure 13 :Stylet moins trois points en rapport à ce plan sont sauvegardés dans un fichier codé en ASCII (American Standard Code for International Interchange). Les distances sont reportées selon six degrés de liberté : selon les axes x, y et z du plan cartésien et selon trois angles de rotation du centre de l'émetteur (situé 5 cm antérieurement au dentalé) par rapport au plan de référence déterminé (plan axio-orbitaire).

Les coordonnées tridimensionnelles du triangle sont calculées en fonction du temps et stockées dans un fichier informatique. L'ensemble des mouvements enregistrés avec le JMA est ensuite appliqué à un modèle virtuel de la mandibule.

Le système JMAnalyser + est également disponible avec un module EMG (Electromyographie électrode) intégré en option. Il permet une analyse facile des potentiels d'action musculaire à l'aide d'électrodes bipolaires de surface cutanée. Le système permet des tests fonctionnels des groupes musculaires antérieur temporal et masséter. La conduction se produit des deux côtés via des câbles d'électrodes avec des amplificateurs de mesure intégrés. L'activité EMG peut être détectée avec précision et fiabilité sans aucun artefact de câble. Nous y reviendrons ultérieurement lors de la définition d'une position thérapeutique mandibulaire.



#### I.6.1.3- Système basé sur des capteurs électromagnétiques : système K7 myotronics

Le mandibular kinesiograph du système K7 de myotronics, permet d'enregistrer et de mesurer les mouvements d'un point mandibulaire par rapport au massif facial dans les 3 plans de l'espace et dans le temps. Le K7 dans sa fonction d'enregistrement des mouvements mandibulaires utilise un aimant collé sur la gencive au niveau des deux incisives centrales inférieures. Le principe physique de la mesure est basé sur l'induction : toute variation de champ magnétique provoque au sein d'un conducteur à proximité la création d'une force électromotrice proportionnelle à la variation du flux magnétique. Les variations du flux du champ magnétique au travers de solénoïdes, sont dues aux mouvements mandibulaires. Ils peuvent donc être enregistrés par les solénoïdes qui transforment ces mouvements en activité électrique par induction. Les trajets mandibulaires (amplitude et vitesse) dans les trois plans de l'espace sont ensuite digitalisés.

#### **I.6.1.4-Parametres pouvant être déterminés par les données cinématiques enregistrées.**

- -pente condylienne
- -angle de Bennett
- -déplacement latéral immédiat
- -angle de Backwill
- -vitesse de tout point mandibulaire.
- -position de l'axe charnière (ou de rotation terminale) par rapport au maxillaire fixe.
- -interligne condylienne (cartographie de la position du condyle au sein de la cavité glénoïde)
- -trajectoires condyliennes, trajectoire du dentalé, ainsi que tout point mandibulaire.
- -cartographie dynamique des points de contacts occlusaux

# <u>I.6.1.5-Enregistrement de la cinématique mandibulaire via un scanner intra buccal.</u> <u>Principe et exemple de Trios 3 Shape spécific motion.</u>

La scanner intra buccale 3shape permet d'enregistrer l'occlusion dynamique. Le protocole est le suivant

- -enregistrement de l'arcade (ou une partie) contenant la restauration à effectuer et son antagoniste.
- -enregistrer l'occlusion statique
- enregistrer l'occlusion dynamique ; pour cela laisser la caméra fixe, filmant les faces vestibulaires correspondantes au champ de la caméra (environ 3 dents sur les deux arcades antagonistes) et filmer pendant que le patient réalise des mouvements (diduction, propulsion)

Une fois la restauration réalisée par CAO cette fonction permet de détecter d'éventuelles interférences et de les corriger en direct (visualisation des contacts sur le logiciel de CAO associé)

Par rapport à des systèmes JMT, les mouvements enregistrés ne peuvent être que de faible amplitudes (lié au champ de la caméra), suffisants pour réaliser un FGP, mais ne permettant pas d'accéder à l'enveloppe complète des mouvements mandibulaires.



Figure 14 Plan meca 4D Jaw Motion

Planmeca 4D™ Jaw Motion est la seule solution CBCT véritablement intégrée pour le suivi, l'enregistrement, la visualisation et l'analyse des mouvements de la mâchoire en 3D. Le système suit et visualise les mouvements de la mâchoire à l'aide de la fonction appareil photo Planmeca Pro-Face® des appareils de radiographie Planmeca ProMax® 3D Mid et Max et montre les mouvements en temps réel sur une image CBCT en 3D. Ce procédé ne requiert aucun autre matériel. Les images 3D capturées sont immédiatement affichées dans le logiciel d'imagerie Planmeca Romexis® ce qui permet d'établir le diagnostic dans la foulée. Toutes les données peuvent également être enregistrées pour une utilisation et une analyse ultérieure.

Planmeca 4D Jaw Motion permet de mesurer et d'enregistrer le trajet d'un ou plusieurs points d'intérêt dans une image 3D. Pour l'analyse de l'occlusion, les modèles dentaires numériques peuvent être alignés sur une image CBCT. L'ensemble des données de mouvement et des mesures peuvent être exportées au format XML ou CSV vers un logiciel tiers en vue de leur analyse et de la planification de traitement.

## I.6.3-Notion d'articulateur complètement adaptable. La dentisterie 4D.

Ce type d'articulateur transfère le mouvement des arcades du réel vers le virtuel. Pour ce faire, il est nécessaire de "numériser" précisément les mouvements mandibulaires dans les six degrés de liberté de mouvement (Trois degrés de translation et trois degrés de rotation), au moyen d'un appareil d'enregistrement de la cinématique mandibulaire et de disposer des modèles numériques des arcades dentaires maxillaire et mandibulaire. A condition d'assimiler l'arcade mandibulaire à un solide indéformable, il est nécessaire de définir au minimum trois points physiques sur les arcades réelles; de les corréler précisément à leurs points virtuels sur les arcades numérisées afin que le déplacement du modèle virtuel mandibulaire par rapport au modèle virtuel maxillaire reproduise les mouvements réels entre ces deux arcades. Contrairement à l'articulateur virtuel semi adaptable, il n'est pas nécessaire de connaître les paramètres de programmation (pente condylienne, angle de Bennett, localisation de l'axe charnière...) pour reproduire les mouvements mandibulaires. De plus, alors que l'articulateur virtuel semi adaptable, reproduira des mouvements approchés de la mandibule (comme son équivalent physique, l'articulateur semi adaptable physique), l'articulateur virtuel complètement adaptable, simule les mouvements réels enregistrés à l'approximation près de la précision des mesures et de l'hypothèse que la mandibule est indéformable.

La possibilité de visionner les relations intermaxillaires en fonction du temps et non plus des modèles 3D statiques a été appelé Dentisterie 4D, car elle introduit une nouvelle dimension dans l'espace numérique de modélisation des deux arcades : le temps, la 4<sup>ième</sup> dimension.

# I.6.4- Différentes façons d'intégrer les données numériques de la cinématique mandibulaire à un logiciel de CAO

Les enregistrements JMT sont utilisés pour les diagnostics des DTM, Dysfonction Temporo-mandibulaire. Ils jouent également un rôle important pour les dentistes cliniciens, en prenant en compte la cinématique mandibulaire dans la réalisation des restaurations prothétiques. Cela réduit considérablement le temps passé au fauteuil pour l'ajustement fonctionnel et minimise le temps nécessaire au patient pour s'habituer à la nouvelle restauration.

La capture de la dynamique mandibulaire intégrera le protocole initial de diagnostic au même titre que la photographie et l'imagerie médicale. Le montage en articulateur des modèles initiaux devient obsolète puisqu'il est réalisé virtuellement. La 4D aide le praticien dans son diagnostic différentiel entre une occlusion pathogène et une occlusion jugée correcte. Dans le cas d'une occlusion pathogène, il choisira un traitement initial visant à rétablir une santé articulaire et fonctionnelle avant de réévaluer le patient au moment de passer aux étapes suivantes. La comparaison des enregistrements, initiaux et après traitement, peut alors se faire de manière objective.

Dans le cas d'une occlusion jugée fonctionnelle et sans symptomatologie, il pourra directement réhabiliter le patient en utilisant les déterminants occlusaux enregistrés par le JMT.

Voici deux workflows applicables:



Calculer les paramètres de la cinématique mandibulaire

Dispositifs pouvant exporter ces parametres SICAT function, Zebris, Modjaw Importation de ces paramètres pour programmer un articulateur virtuel intégré au logiciel de CAO

Exocad, cerec, 3shape



Enregistrement des mouvements réels de la mandibule

Export .jmtxd file avec Sicat Function

Export .xml file avec Zebris et Modjaw

Enregistrement de l'occlusion dynamique avec Trios

de CAO

Animation du modèle numérique mandibulaire suivant les mouvements réels du patient.

CEREC, InLab

**Exocad** 

**Trios Design Studio** 

Pour les réhabilitations prothétiques peu étendues, nous pouvons utiliser l'articulateur virtuel pour la conception occlusale. Cela équivaut à travailler avec un articulateur semi adaptable avec programmation personnalisée, pour chaque cas. Pour des réhabilitations plus étendues de la cavité buccale, l'utilisation des mouvements réels de la mandibule sera plus indiquée.

#### I.7-Précision des systèmes d'acquisition de données numériques.

Une revue de la littérature, concernant la réalisation d'une prothèse plurale, dento-portée ou implanto portée, par des techniques conventionnelles ou numériques a été réalisée par Lucio lo Russo(39). Le but de cette étude était de répondre à la question suivante : Est-ce que la conception d'une prothèse plurale par des techniques entièrement numériques apporte plus de précision au

niveau de l'adaptation marginale des prothèses fixées, qu'une conception entièrement traditionnelle ?

Les articles inclus dans l'étude, au nombre de 8, ont été publié entre 2011 et 2015. Ils exposent tous des études cas témoin (groupe contrôle constitué par la méthode conventionnelle d'empreinte physique avec un matériaux polymère) et analysent un total de 76 cas. Toutes les études évaluent pour des prothèses plurales à 3 éléments, l'adaptation verticale (c'est-à-dire une évaluation de l'espace entre la face occlusale prothétique et la partie occlusale du pilier).

Depuis les technologies numériques ont évolué mais dès cette époque, les auteurs ne mettent pas en évidence une différence statistiquement significative entre la précision des deux méthodes de réalisation des prothèses, une conventionnelle (groupe contrôle) et l'autre digitale. D'après l'évaluation de ces études, le flux de travail permet de réaliser des prothèses avec des hiatus au niveau de l'adaptation marginale mesurés à 80 micromètres en moyenne, ce qui est indécelable cliniquement (le seuil de détection clinique étant évalué à 150 micromètres par les auteurs).

Ils concluent à une précision équivalente des techniques numériques concernant les réhabilitations comportant trois éléments implanto ou dento portés. Reste à faire la même évaluation pour des arcades complètement édentées.

Adolfo Di Fiorea, compare la précision et l'exactitude de 8 scanners pour scanner une arcade complète édentée avec six implants pour une réhabilitation complète de l'arcade avec prothèses fixes implanto-portées.(40)

Un modèle PMMA d'une mandibule édentée avec six scan-bodies est utilisée comme modèle de référence et ses dimensions sont calibrées à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle. Quinze empreintes optiques ont été réalisées et comparées au modèle de référence à l'aide d'un logiciel développé pour l'occasion. Ce protocole permet d'évaluer l'exactitude et la précision de l'empreinte optique pour chacun des scanners intra oraux.

L'erreur moyenne dans le positionnement spatial des scan-bodies varie de 30  $\mu$ m±8 $\mu$ m pour la trios 3shape et True définition 3M à 148  $\mu$ m±64 $\mu$ m pour Dental Wings. Ils concluent donc à la faisabilité d'une réalisation numérique de l'empreinte pour une arcade édentée mais pas avec toutes les caméras du marché.

Cependant cette étude in vitro ne représente pas la réalité clinique et il faudrait évaluer la faisabilité de l'empreinte optique pour une réhabilitation complète in vivo. En effet de nombreuses sources d'incertitudes viennent se rajouter(2) : le mouvement du patient, le film salivaire (la réfraction va dévier le rayon lumineux servant à la mesure et provoquer une erreur), l'accès difficile à certaines zones de scannage, les obstacles anatomiques (langue).

De plus le chemin de scannage(41), la lumière ambiante(42), la forme et hauteurs des scans bodies (pour les réhabilitations implantaires)(43) influencent la précision et l'exactitude de l'empreinte numérique.

De ces études, il ressort qu'en 2020, la précision et l'exactitude des empreintes numériques sont tout à fait compatibles avec des projets de réhabilitation globale concernant une arcade complète dentée. Le scannage d'une arcade complète édentée avec une précision suffisante pour réaliser une réhabilitation implantaire s'avère être encore un défi. Des méthodes, comme celle présentée en partie I.2.2- permettent pourtant de contourner cette difficulté.

Pour des prothèses complètes amovibles à support muqueux (44) la dépressibilité tissulaire ne peut être enregistrée par des moyens optiques ; Lucio Lo Russo et all. comparent des modèles d'une arcade complète édentée générés à partir d'un scan intra oral et d'une empreinte classique (réalisée à l'aide d'un PEI compressif ) ensuite rescanné par le même scanner intra oral, afin de mettre en évidence la seule erreur provenant de la dépréssibilité tissulaire. L'écart moyen entre les deux modèles sur une arcade correspond à  $0.02 \pm 0.05$  mm, les déformations étant concentrées dans les zones périphériques. Ce qui constitue une limite à la fiabilité des empreintes purement numériques pour la prise en compte de la dépréssibilité tissulaire pour la réalisation de Prothèses amovibles à appui muqueux (prothèse complète).

Lauren Bohner et ses collaborateurs ont réalisé une revue de la littérature sur la précision des moyens d'acquisitions de l'imagerie numérique utilisée en dentisterie, comme le scanner facial, le cbct, le scanner optique. (45)

La stratégie de recherche a été appliquée dans quatre bases de données dans des revues non évaluées par des pairs, d'avril à juin 2017. Toutes les études évaluaient la précision dimensionnelle des images en trois dimensions acquises sur les tissus durs et les tissus mous intra ou extras buccaux. Sur un total de 2093 études identifiées dans les bases de données, 34 ont été sélectionnées pour cette revue. Les scanners faciaux ont montré une précision comprise entre 140 et 1330 micromètres. Pour les scanners intra oraux et de laboratoire la précision se situe entre 17 et 378 micromètres pour des arcades dentées. Pour des arcades édentées entre 44 et 591 micromètres et entre 19 et 112 micromètres pour des implants dentaires.

L'acquisition représente la première source d'incertitude à laquelle va se rajouter, comme dans le cas d'une démarche classique, les incertitudes liées à chaque étape de la planification et réalisation du traitement prothétique : superposition et fusion des différents fichiers, en particulier fusion du fichier numérique volumique CBCT au format DICOM, avec les empreintes optiques, l'enregistrement de l'occlusion, d'une position mandibulaire thérapeutique. Dans la prochaine partie nous allons décrire ces différentes étapes et nous porterons un regard critique sur la précision liée aux techniques décrites et nous intéresserons aux moyens d'améliorer cette précision.

## II. Aide des outils numériques à la planification prothétique.

#### II.1-Introduction

Lors d'une réhabilitation complexe, le praticien est confronté à une multitude d'informations collectées au cours d'un diagnostic exhaustif. A l'issue de cette première étape il se retrouve à essayer d'identifier et de hiérarchiser les différentes problématiques et se confronte à de nombreux choix thérapeutiques.

Comme nous l'avons abordé dans la première partie, les dispositifs d'acquisitions numériques permettent de récolter et d'enregistrer un grand nombre de données et de les conserver afin de pouvoir les consulter à tout moment pour asseoir notre réflexion. Mais au-delà d'une simple récolte de données, ce que nous permettent ces nouveaux outils, c'est de pouvoir bénéficier d'une aide à la réflexion, via les logiciels de CAO associés. L'exemple de la société 3 Shape : Dental system, 3 Shape smile design, implant studio, orthodontic planner, 3 Shape patient motion..

- -Ils permettent un échange plus facile, en particulier autorise le transfert des données jusqu'alors difficilement transmissibles au prothésiste et par cet échange facilité, ils permettent de mieux contrôler la qualité d'exécution du plan de traitement.
- -Des outils d'aide à la planification permettent d'appliquer une méthodologie rigoureuse afin d'organiser les données de façon pertinentes et de pouvoir quantifier les modifications à apporter lors de la réhabilitation.

L'exemple du DSD est un cas d'école illustrant ces deux aspects.

- -Principalement, le fait d'avoir fait l'acquisition de données numérisées, nous permet d'utiliser la puissance de calculs de modèles informatiques. Ces modèles informatiques nous permettent d'accéder à des paramètres calculés rendant compte d'une réalité clinique difficilement observable jusqu'alors, la rendant de ce fait plus objective.
- -Enfin ils donnent la possibilité de tester virtuellement le projet prothétique à la fois de façon esthétique et fonctionnelle.

Dans cette partie nous essaierons de montrer en quoi la conception d'un plan prothétique complexe a grandement gagné en simplicité et précision grâce aux nouveaux outils que propose la dentisterie numérique. Pour cela nous développerons les arguments en suivant un cheminement correspondant à une vue classique des réhabilitations étendues : les critères de reconstructions prothétiques établis par Orthlieb, L'OCTA (Huit critères de reconstructions) (46)

### II.2 L'octa 1 : plan de référence.

« Base de l'architecture, la première étape d'une construction consiste à matérialiser un, et un seul, plan horizontal de référence »(46)

L'octa 1 défini le plan de référence unique qui permet de créer un repère orthonormé indispensable à toute évaluation quantitative concernant le projet prothétique.

Ce plan de référence est repéré cliniquement par rapport à des repères cutanés sur le visage et /ou osseux (radiographie, palpation). Pour transmettre ce plan de référence au prothésiste et réaliser le montage en articulateur, on le matérialise en utilisant un arc facial (arbitraire ou anatomique). Pour la grande majorité les articulateurs utilisent comme référence le plan axio-orbitaire.

Le plan de référence permet donc de repérer le moulage maxillaire par rapport à des repères crâniaux-faciaux et de pouvoir ainsi le transmettre vers un dispositif permettant de mimer de façon approché la cinématique mandibulaire : l'articulateur.

## II.2.1- Les articulateurs virtuels. Problématique du transfert du plan de référence. (35,47,48)

Un articulateur virtuel mathématique est une reproduction virtuelle d'un articulateur mécanique dont les mouvements sont reproduits à l'identique par une série d'algorithmes. Ils sont cependant plus modulables que les classiques articulateurs mécaniques. Ils permettent de modifier des paramètres supplémentaires comme la distance inter condylienne, la distance du centre de rotation instantané au dentalé (triangle de Bonwill), de régler les déterminants postérieurs de l'occlusion de façon plus fine et réaliste.

Des programmes de CAO comme exocad dispose d'une large bibliothèque d'articulateurs virtuels, reproduction fidèle des articulateurs physiques, mécaniques.

Il existe aussi des articulateurs virtuels dit complètement adaptables. Un enregistrement préalable des mouvements mandibulaires par rapport au maxillaire fixe, grâce à un dispositif spécial (cf partie I.6-) permet d'animer le modèle numérique mandibulaire issu de l'empreinte optique, par rapport au modèle maxillaire. On simule alors les mouvements exacts enregistrés de la mandibule du patient, sans plus d'approximation ou de moyennes, si ce n'est la précision de la mesure.

L'acquisition des empreintes numériques, d'un scan facial ou encore d'un cbct, génère un ensemble de points repérés dans un repère orthonormé propre à chaque acquisition. Choisir un plan de référence signifie déterminer les coordonnées de ce plan de référence afin de pouvoir le repérer numériquement et le transposer dans chaque fichier numérique. La difficulté est que chaque fichier correspond à une acquisition et donc possède son propre repère orthonormé. Définir le plan de référence reviendra donc essentiellement à définir une correspondance entre chacun des repères

orthonormés, c'est-à-dire définir un repère commun à tous ces fichiers y compris le fichier associé à l'articulateur virtuel dans les logiciels de CAO.

### II.2.2-Protocole de transfert des modèles numériques vers un articulateur virtuel.

Le transfert vers un articulateur mathématique peut être réalisé de différentes façon :

- On effectue le montage physique des modèles en plâtre puis on scanne avec un scanner de laboratoire le montage (articulateur plus modèles en place) pour le transmettre automatiquement sur l'articulateur virtuel. Peu d'intérêt car on sort du travail tout numérique.
- -Le montage tout numérique : Le principe est strictement le même que pour un montage physique. Nous allons le voir sur un exemple de protocole(49)



Figure 15 repérage du PAO

- Repérer le PAO (plan de référence sur la plupart des articulateurs physiques et donc mathématiques) sur le scan facial (repère cutanés) ou le CBCT(repères osseux). Ici avant de réaliser le scan facial, on matérialise avec 3 gommettes le point sous orbitaire gauche et l'articulation temporo mandibulaire gauche et droite.
- Créer un dispositif de repérage (équivalent de la fourchette de l'arc facial) permettant de repérer numériquement la position du maxillaire

#### dans ce précédent fichier :

Dans ce protocole on réalise cela de la façon suivante :

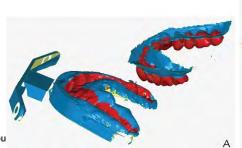
✓ La fourchette est solidarisée du maxillaire à l'aide d'un matériau à empreinte et on réalise un scan facial avec le dispositif en bouche

#### • Coupler le dispositif de repérage avec l'empreinte optique du maxillaire

✓ Puis on réalise un scan (Caméra trios 3 SHAPE) de la fourchette avec l'empreinte silicone du maxillaire.

On charge le fichier 3D de la fourchette avec silicone ainsi que l'empreinte optique du maxillaire dans un logiciel de retro ingénierie permettant de fusionner deux fichiers 3D au format STL ou JOB (Rapidform CADv2006; INUS Technology). En utilisant la fonction best fit cela permet de replacer







l'empreinte optique du maxillaire dans l'empreinte en silicone du maxillaire sur la fourchette. Cela permet d'intégrer le modèle maxillaire au sein du scanner facial à la bonne place et de le repérer par rapport au PAO:

On charge dans ce même logiciel le scanner facial avec la fourchette en bouche et on superpose de la même façon le fichier fusionné fourchette plus empreinte du maxillaire avec le scan facial fourchette en bouche (figure 9 B)

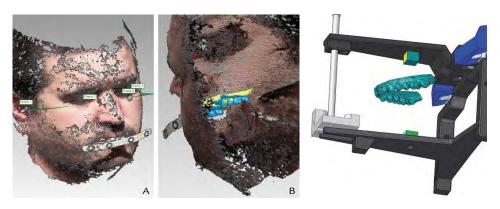


Figure 17 A PAO et système de coordonnée de référence B Position du maxillaire par rapport au scan facial et montage du modèle maxillaire dans l'articulateur.

On repère la position du modèle numérique maxillaire dans un système de coordonnées défini par rapport aux trois points appartenant au PAO (le plan de référence). Puis on exporte le modèle numérique du maxillaire avec le système de coordonnées dans le logiciel de l'articulateur virtuel en faisant coïncider les coordonnées de référence avec le système de coordonnées de l'articulateur virtuel basé sur le PAO.

Concernant l'articulateur virtuel complètement adaptable, il n'est plus nécessaire de raisonner par rapport à un plan de référence. Les différents fichiers numériques 3D (scanner intra oral, scanner facial et CBCT) doivent être mis en relations afin d'avoir les mêmes de coordonnées de référence. Les logiciels de CAO savent très bien faire cela à condition de leur donner des points caractéristiques pour réaligner les différentes images. La problématique reste la même. Le modèle numérique maxillaire doit être positionné par rapport au visage et aux structures crâniennes du patient, conformément à la réalité. Il s'agit de créer un patient virtuel.

#### II.2.3-Fusion des différents fichiers numériques afin de créer un « patient virtuel »(50)

La réalisation de la fusion des différents fichiers numériques acquis afin d'obtenir un patient virtuel demeure actuellement une opération non triviale :

- -du fait de la complexité des structures anatomiques
- -du fait que chacun des fichiers à fusionner est stocké sous un format différent, dans un repère propre au dispositif d'acquisition.
  - ✓ DICOM pour le cbct qui permet d'acquérir la structure osseuse du crâne

- ✓ Le scanner facial est exprimé sous le format OBJ , développé par Wave front technologie et largement reconnu pour le stockage et la représentation d'objets 3D mais pouvant représenter, en sus de la surface, la couleur et la texture de cette surface, contrairement au fichier STL.
- ✓ L'empreinte optique au format STL ou PY

#### II.2.3.1- Principe

La fusion de ces différents fichiers requière des points de repères communs aux différents fichiers(51). Pour des patients dentés, le système dentaire fournira ces points de repères. Pour des patients édentés et pour augmenter la précision, une méthode consiste à créer un objet intermédiaire artificiel s'adaptant aux arcades édentées, afin de créer ces points de repères nécessaires aux réalignements des différents fichiers numériques. (cf I.2.2-)

Les logiciels de CAO et d'impression 3D (par exemple Meshmixer) s'améliorent de façon continue et possèdent des outils permettant d'optimiser la superposition de deux fichiers en se basant non seulement sur des points de repères communs mais aussi sur la congruence entre surfaces (« surface based and marker based matching procedure »)(52) ou l'appariement de voxels avec des points de référence pour le CBCT(53)

Dans leur publication (54) Nilsson et all détaillent leur méthode de superposition des modèles numériques dentaires avec les données du CBCT :

Les données des scans intra oraux des surfaces dentaires sont pré-alignées avec le Modèles CBCT en plaçant manuellement trois points de repères sur les régions concernées par la superposition. Ensuite, l'enregistrement basé sur la surface a été implémenté en utilisant un algorithme de point le plus proche itératif (ICP: Iterative closest points). L'ICP utilise des surfaces correspondantes de deux ensembles de données, qui sont représentées par deux nuages de points. Cet algorithme est conçu pour minimiser la distance entre deux points identifiés comme correspondants. Dans ce processus, un nuage de points, qui est la référence (c'est-à-dire, la dentition des CT-scan / CBCT), est maintenu fixe, tandis que l'autre, qui est la surface à aligner (c'est-à-dire les modèles dentaires numériques issus d'un scan intra oral), est transformé par translations et rotations pour correspondre au mieux à la référence.

# II.2.3.1- Une technique simple et précise pour faciliter la superposition d'empreintes optiques sur un fichier CBCT. (52)

Le succès d'une planification numérique repose fortement sur la précision avec laquelle les différents fichiers numériques vont être fusionnés. Comme vu précédemment, la procédure développée par les logiciels pour réaliser cette fusion repose sur l'identification de multiples points de références, dans toutes les coupes (sagittal, coronale, transversale), afin de pouvoir recouper ces points de références entre les différents fichiers. Cependant, parfois les restaurations métalliques, les

bagues d'orthodontie, produisant de nombreux artéfacts réduisent considérablement la résolution du CBCT, compromettant alors la précision du CBCT et de la fusion avec le fichier STL.

Cet article (52) présente une technique simple, applicable avec tout logiciels de superposition ou de CAO, pour contourner ces difficultés.

L'auteur mélange du sulfate de Baryum avec un bulk-fill composite, afin de former cinq petits triangles radio opaque et pouvant être collés à la surface des dents. Les dents choisies sont réparties sur toute l'arcade : les deux premières molaires, les canines et les deux incisives centrales. Le scan des arcades dentaires et le cône beam sont réalisés avec les triangles marqueurs en bouche, grâce auxquels les données CBCT et STL peuvent être précisément superposées. Il reste ensuite à effacer ces marqueurs sur l'empreinte numérique positionnée et les décoller en bouche.

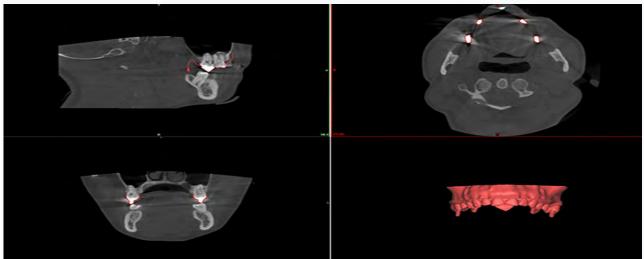


Figure 18 Superposition du fichier STL issu de l'empreinte optique et des données du CBCT utilisant des triangles marqueurs collés sur les dents comme point de référence.

# II.2.3.1- Exemple Dolphin Imaging 3D Logiciel de planification chirurgicale (implantologie, chirurgie orthognatique)(17)

La première étape consiste en l'importation des données au format STL de l'empreinte optique dans le fichier associé au CT-scan et alignement manuel. Un outil permet d'évaluer par un code couleur l'éloignement des points du CT-scan avec ceux du fichier STL et permet d'améliorer la superposition des volumes associés aux structures dentaires issues du fichier CT-scan et celles issues de l'empreinte optique. Enfin la possibilité de créer des coupes de chacun des fichiers permet d'affiner l'alignement. Pour finaliser le patient virtuel on superpose le scanner facial (parfaitement aligné car issu des données du CT-Scan ).

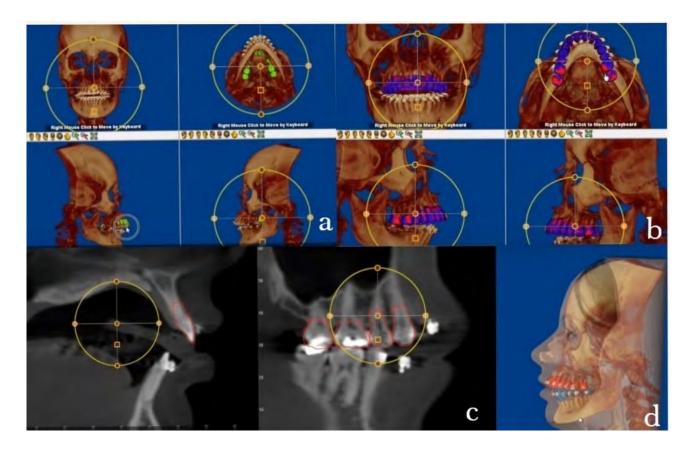


Figure 19 a-importation des données au format STL de l'empreinte optique dans le fichier associé au CT-scan et alignement manuel b- Un code couleur indique l'éloignement des points du CT-scan avec ceux du fichier STL. Cet outil permet d'améliorer la superposition des volumes associés aux structures dentaires issues du fichier CT-scan et celle de l'empreinte optique c- Affinement de l'alignement grâce à un outil logiciel permettant de faire des ajustements sur des coupes construites à partir des deux fichiers numériques . d- superposition du scanner facial (parfaitement aligné car issu des données du CT-Scan)

### II.2.3.2-Faisabilité et fiabilité.

Joda T, Bragger U, Gallucci G. en 2015 publient (55) une revue de la littérature de 2003 à 2013 sur la faisabilité et la précision de la superposition des différents fichiers numériques CBCT ,SCAN Facial (SF) et /ou photographie et scanners intra oraux (IOS). Deux études étudient la superposition des trois fichiers CBCT,SF,IOS; 18 étudient la superposition de deux fichiers, en trois groupes. Un premier groupe CBCT,IOS; un deuxième IOS,SF; un troisième CBCT+FC. Ces études représentent un total de 112 patients.

Mangano C, Luongo F, Migliario M, Mortellaro dans un article plus récent (2018) s'appuyant sur une revue de la littérature regroupant 25 études à partir de 2014, arrivent aux mêmes conclusions :

- la grande variété de méthodes pour effectuer cette superposition (congruences de surfaces, de voxel ou de points, utilisation d'un objet artificiel (mordu, arc facial numérique),...) et leur faisabilité.

-Une précision inégale en fonction du type de fichiers fusionnés, de l'environnement prothétique buccale (métaux et artéfacts avec le cbct par exemple), et du type de méthodes employées. Les méthodes les plus précises permettent la réalisation de réhabilitations prothétiques complexes en particulier implantaires.

Les auteurs de ces deux revues de littératures relèvent que ces conclusions s'appuient sur des études universitaires, nécessitant la maîtrise de logiciels particuliers (logiciels de manipulation de fichiers 3D type MESHLAB logiciel open source) n'étant pas forcément accessibles à une pratique courante au cabinet et faisant appel à des protocoles assez longs. Mais l'amélioration rapide des logiciels de CAO permet déjà de lever ces difficultés et beaucoup de logiciels intègrent déjà la possibilité de fusionner un CBCT avec une photographie faciale ou un scan facial pour réaliser un DSD en même temps que la planification implantaire.

Cependant, la simulation du patient virtuel, résultat de la superposition des données numériques issues du CBCT, de la photographie ou scanner facial, et empreinte optique, n'est réalisée que de façon statique. Reste à intégrer les données cinématiques de l'occlusion pour obtenir la simulation d'un patient virtuel en temps réel.

## II.2.3.3-Exemple du système SICAT function JMT+(26,56-58)

SICAT function (Sicat, Bonn, Germany) est un système qui permet de combiner et superposer directement trois types de données numériques.

- Données issues CBCT donnant une information sur les structures osseuses mandibulaire et maxillaire.
- Données issues d'un scanner intra oral
- Des données JMT issue du système JMT+

L'élément clé permettant de réaliser la fusion de ces différents fichiers est le « SICAT fusion byte tray ».

Ce plateau de morsure, contient 8 marqueurs radio opaques qui serviront de repères lors de la fusion entre le fichier numérique issu du CBCT et les données associées au mouvement mandibulaire issues du dispositif JMT.

Il y a possibilité de fixer sur ce plateau le capteur mandibulaire via le « SICAT fusion bite adaptater »

L'attachement en T paraocclusal est attaché aux dents inférieures et se déplace avec la mandibule.

L'attachement en T, solidaire de la mandibule, peut se connecter au capteur mandibulaire ( « lower jaw sensor »)

Le cbct du patient est réalisé avec le plateau de morsure (ou « fusion bite tray ») en bouche

afin de pouvoir ultérieurement corréler le système de coordonnées du JMT au système de coordonnées du CBCT .

#### Manipulation:

### Acquisition des données numériques :

On réalise les empreintes optiques de l'arcade mandibulaire et maxillaire en premier, car les dispositifs permettant l'enregistrement de la cinématique mandibulaire placés en bouche gêneront ultérieurement la réalisation de ces empreintes.

- On enduit les deux faces du plateau de morsure avec du silicone bite (type occlufast)
- On demande au patient de mordre sur le plateau enduit de silicone
- On retire le plateau de la cavité buccale du patient après durcissement du silicone et on enlève les excès avant de replacer le plateau pour réaliser le CBCT



Figure 20 Fusion Bite et mordu silicone

On réalise un CBCT en champ large afin d'obtenir une image volumique permettant une visualisation des condyles.

Afin de préparer l'enregistrement de données cinématiques, on ajuste l'attachement en T para occlusal à la forme de l'arcade mandibulaire en faisant attention à ce qu'il n'y ait aucune interférence entre le « fusion bite » et la fourchette para occlusale.

On fixe ensuite l'arc facial maintenu par un bandeau pariétal et occipital entourant le crâne du patient et un appui nasal au niveau du nasion.

## On démarre le logiciel SICAT JMT

Le capteur mandibulaire est attaché au SICAT fusion bite et on déclenche une acquisition de position: on enregistre ainsi la position de l'arcade maxillaire par rapport au plan de référence matérialisé par l'arc facial (et les microphones associés).

On répète la même opération en solidarisant cette fois le capteur mandibulaire avec la fourchette para occlusale : On enregistre ainsi la position de départ entre la mandibule et le plan de référence.

On retire alors le fusion bite tray de la bouche du patient et on commence les divers enregistrements de la cinématique mandibulaire :

Mouvement de protrusion

- Mouvements de latéralités
- Mouvement d'ouverture maximale
- Mouvements de mastication
- Mouvements d'élocution

#### Fusion des données numériques :

Les fichiers de données du CBCT et du JMT sont chargés dans le logiciel SICAT Function suite.

Des coupes axiales sont parcourues afin de localiser trois marqueurs radio opaques placés dans le fusion tray. Les cinq autres seront alors localisés de façon automatique.

Les données JMT et CBCT sont alors automatiquement fusionnées.

L'enregistrement des positions de l'arcade maxillaire et mandibulaire par rapport au plan de référence réalisé au départ permet de fusionner les empreintes numériques des arcades mandibulaires et maxillaires avec le fichier JMT et CBCT.

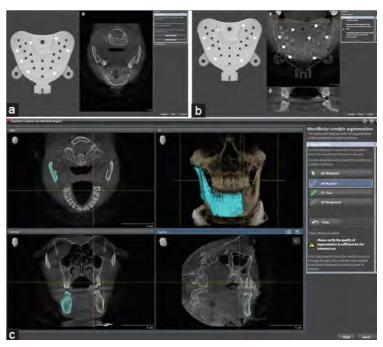


Figure 21 Identification des marqueurs radio opaques du fusion bite sur différentes coupes du CBCT et segmentation de la mandibule

## Segmentation de la mandibule par rapports aux structures crâniennes.

Des logiciels de dessins appropriés et intégrés au logiciel SICAT function suite permettent de délimiter et séparer la mandibule des cavités glénoïdes et du reste du massif crânien.

Visualisation des mouvements mandibulaires du patient ainsi que la position des condyles par rapport à la cavité glénoïde.

Le logiciel après acquisition, superposition des différentes données, segmentation de la mandibule permet de visualiser les mouvements mandibulaires spécifiques au patient, intégrant sa propre anatomie, sous la forme d'une animation qui pourra être visualisée sous n'importe quel angle. Il est possible de tracer la trajectoire de n'importe quel point de la mandibule ce qui permettra de calculer et identifier de nombreux paramètres liés à la cinématique mandibulaire (cf I.6.2). Nous reviendrons dans les parties suivantes sur les possibilités thérapeutiques d'un tel système.



Figure 22 Visualisation des mouvements mandibulaire sous plusieurs angles avec le tracé de la trajectoire du dentalé lors des phases d'ouverture et de fermeture.

## La précision et le caractère reproductible de ces enregistrements ont été évalué.

Pour l'évaluation de la position réel du condyle, une publication(58) compare la position du condyle simulée par le système SICAT function pour une ouverture donnée à la position visualisée par la prise d'un cliché CBCT avec la même ouverture.

L'auteur Shushu He montrent que la localisation du condyle est tout à fait conforme à la réalité visualisée sur le CBCT.

Les auteurs réalisent trois séries de mesures sur trois jours pour évaluer la reproductibilité de la mesure sur la simulation de la position du condyle. Ils montrent un défaut de reproductibilité sans en préciser l'origine : Est-ce dû à un manque de reproductibilité lié au système SICAT lui-même ? Est-ce lié à une variation intra individuelle liée à un défaut de stabilité de l'articulation temporo mandibulaire chez ce patient (traité pour des désordres de l'articulation temporo mandibulaire) ?

Ces enregistrements devraient être réalisés sur des patients sains pour permettre de conclure.

#### II.3- L'octa 2 et 3 : position mandibulaire de référence et position thérapeutique.

#### II.3.1-Introduction.

L'octa 2 est le choix d'une position mandibulaire de référence. Elle permet :

- De repérer la position de la mandibule par rapport au maxillaire (ou au plan de référence) lors de la réhabilitation prothétique ; elle doit donc être reproductible et stable tout au long du traitement.
- De transférer le cas clinique au laboratoire (montage sur articulateur). Elle doit donc être enregistrable cliniquement.

Il y a deux choix fréquents de positions de référence possibles selon Orthlieb(46)

Avec une référence dentaire : L'occlusion d'intercuspidie maximale ou OIM

Avec une référence articulaire : la relation centrée

« Les positions Mandibulaires à référence musculaire obtenues uniquement par un équilibre musculaire sans élément dentaire ou articulaire de stabilisation sont instables et non reproductibles »(46)

Comment choisir cette position? En fonction de quels critères? Quand conserver l'OIM?

D.Orthlieb propose un algorithme de choix de la position de référence résumé sur la figure suivante.

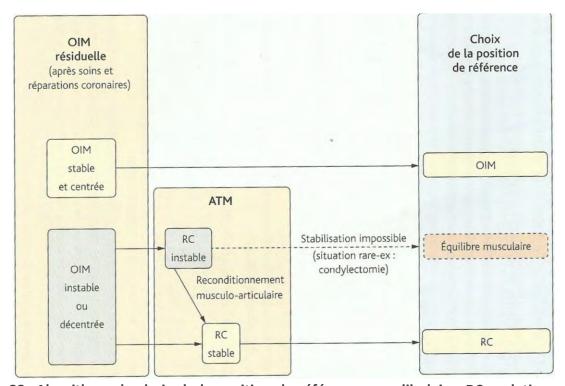


Figure 23 Algorithme de choix de la position de référence mandibulaire. RC : relation centrée OIM : occlusion d'intercuspidie maximale(46)

Les technologies numériques (empreinte optique, logiciels de CAO ) facilitent l'enregistrement de la position de référence, sa conservation tout au long du traitement, et son transfert au laboratoire de prothèse.

En effet, une fois la position de référence de la mandibule choisie et enregistrée par rapport à la position du maxillaire, le fichier numérique associé est repéré de façon rigoureuse et précise dans un repère orthonormé associé au logiciel.

Cela signifie que la position mandibulaire ainsi choisie et enregistrée, sera conservée sans effort tout au long du traitement, même s'il y a perte de calage lors de préparations ou autre travaux prothétiques.

Par exemple, il ne sera plus nécessaire de réaliser, comme on devait le faire en travaillant sur des modèles en plâtre, un montage croisé, pour situer le moulage avec les préparations dans la bonne position. Avec les modèles numériques il suffit d'effacer les dents non préparées qui nous ont permis d'obtenir le calage et enregistrer la position mandibulaire et de compléter l'empreinte partiellement effacée en scannant les préparations effectuées. Le modèle numérique avec préparation sera situé exactement dans la même position.

De la même façon, le transfert de la position relative des modèles numériques au laboratoire ne dépendra plus de la réalisation de maquettes d'occlusion en cire, plus ou moins fiables car déformables et prothésiste dépendante. Une fois l'enregistrement de la position mandibulaire par rapport au maxillaire réalisée, il sera conservé de façon fiable et reproductible au sein du logiciel de CAO.

#### II.3.2- Positions de référence Mandibulaire ; La relation centrée : Méthode d'enregistrement.

## II.3.2.1.-Enregistrement virtuel de la relation centrée à l'aide d'un scanner optique intra oral et cbct ou ct .(54)

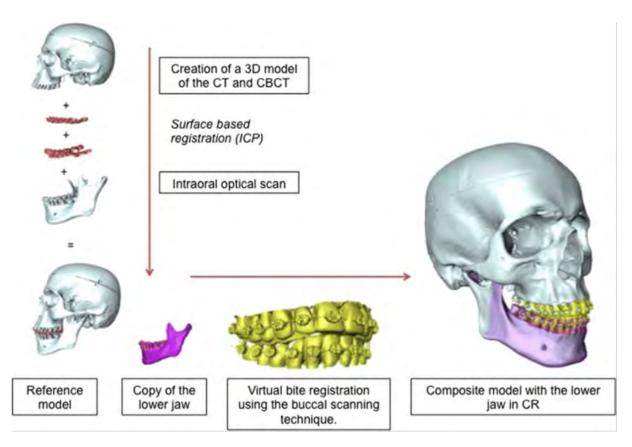


Figure 24 : schéma d'établissement de la relation centrée de façon virtuelle. Le « virtual bite registration » ou mordu virtuel joue le rôle de la cire d'occlusion enregistrée en centrée et la superposition des différents fichiers de points se fait à l'aide d'un logiciel d'impression 3D du type Meshmixer.

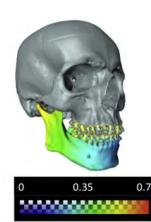
Dans cet article de novembre 2015, les auteurs, Johanna Nilsson, Robert Geoff Richards, Andreas Thor, Lukas Kamer exposent une méthode testée in vitro (crâne artificiel) afin de placer la mandibule en relation centrée de façon virtuelle, sans passer par un montage physique en articulateur. Deux méthodes sont étudiées comparativement.

Une première méthode consiste à enregistrer la relation centrée avec une cire d'occlusion et d'effectuer un cbct avec la cire d'occlusion en place. En superposant¹ l'empreinte optique de la dentition mandibulaire sur le CBCT, on obtient la mandibule en relation centrée. Cette procédure nécessite une étape de pré alignement, réalisée par l'utilisateur du logiciel et basée sur la correspondance de trois points entre les deux fichiers.

54

¹ grâce à un programme d'impression 3D permettant la superposition de fichiers 3D, type Meshmixer, basé sur un calcul de minimisation de la distance entre les nuages de points que représentent les fichiers 3D. C'est l' algorithme ICP « Itérative Closest Points ». Un des fichiers reste immobile (ici le cbct) et, est appliqué sur le fichier correspondant aux empreintes optiques, différentes rotations afin de juxtaposer les deux fichiers (structures dentaires du CBCT sur structures dentaires de l'empreinte optique)

Comme schématisé sur la figure ci-dessus, le CBCT est effectué en position d'intercuspidie maximale. Les empreintes optiques sont superposées au CBCT afin d'obtenir le modèle de référence. La mandibule est séparée du maxillaire, afin de pouvoir être repositionnée en RC. Le guide permettant de replacer la mandibule en RC est un scanner intra buccal des relations interdentaires en RC (« le virtual bite registration »). Une superposition (algorithme ICP) de ce scanner intra buccal avec le maxillaire puis la mandibule permet de replacer les deux empreintes optiques en RC.



Les auteurs évaluent la précision de cette méthode en comparant la position mandibulaire en RC obtenue avec cire d'occlusion et avec le « virtual bite model ». Les images des modèles optiques et de la mandibule avec le maxillaire sont analysées grâce au logiciel Amira (Amira Version 5.5.0, FEI Visualisation Sciences Group, Bordeaux, France), un logiciel commercial de visualisation et d'analyse d'image. Les écarts entre les points de maillage liés aux deux fichiers STL superposés sont traduits en une échelle de couleur : bleu écart proche de zéro et rouge écart de 0.7 mm.

Figure 25 Evaluation de la précision de la méthode de placement de la mandibule en RC avec scan buccal

La méthode du placement de la mandibule en RC en s'appuyant sur un scan des surfaces dentaires apparaît comme une technique précise applicable en clinique, selon les auteurs. Son avantage par rapport à l'acquisition d'un CBCT ou CT directement en RC est de pouvoir, au cours du traitement, réévaluer la position mandibulaire en fonction d'un guide constitué par les surfaces dentaires, à toutes les étapes du traitement, d'une grande utilité en chirurgie orthognathique.

Cette procédure évite ainsi la méthode traditionnelle avec des modèles physiques, pour les placer en RC (arc facial; cire occlusion) et permet de visualiser sur un seul fichier toutes les structures maxillo faciales osseuses, dentaires, tissus mous, nécessaires à une planification prothétique complexe.

# II.3.2.1.- Méthode du mouvement de rotation terminale. Détermination de l'axe de rotation terminale.(59,60)

En enregistrant les mouvements de la mandibule, les logiciels (type Sicat function, Zebris, Modjaw) sont capables d'identifier la position de l'axe de rotation terminale par rapport aux structures crâniennes.

En effet le modèle de la mandibule peut être assimilé à un solide qui est animé d'un mouvement complexe pouvant être décomposer en un mouvement de rotation autour d'un axe de rotation instantané et un mouvement de translation.

L'étude des trajectoires de deux points en fonction du temps de la mandibule et des vitesses permet d'identifier le mouvement de rotation terminale et de déterminer les points constituant l'axe de

rotation (points sur lesquels la vitesse s'annule). Ainsi cela permet d'enregistrer la position des modèles maxillaires et mandibulaires par rapport à cet axe de rotation pendant le mouvement de rotation terminale.

#### La connaissance de :

- l'axe de rotation terminale
- la position du modèle mandibulaire par rapport à cet axe, lorsque la mandibule est en mouvement de rotation terminale.
- La position du modèle maxillaire par rapport au même système de coordonnées

nous permet alors de placer la mandibule en relation centrée, par rapport au maxillaire.

Cette méthode donne accès à la localisation de l'axe de rotation terminal réel, c'est-à-dire déterminé sur des mesures des trajectoires et des vitesses de points mandibulaires et non pas déterminé par rapport à des repères anatomiques arbitraires de la mandibule (par exemple le centre du condyle).

Ainsi on aura tous les éléments pour modifier la DVO de façon cohérente par rapport à la cinématique mandibulaire et à l'anatomie propre au patient.

La DVO pourra être augmentée ou diminuée en faisant tourner le modèle mandibulaire autour de l'axe de rotation terminale.

#### II.3.3 Position mandibulaire thérapeutique

## II.3.3.1- Stratégie : quelle position, dans quels cas ?

Selon Jean Daniel Orthlieb(46), le choix de la position thérapeutique (et de référence car les deux choix ne sont pas indépendants) est conditionné à l'évaluation de l'occlusion du patient. L'OIM estelle fonctionnelle ou non ? L'OIM du patient pourra-t-elle être conservée tout au long du traitement² ? Si c'est le cas la position de reconstruction thérapeutique sera l'OIM du patient et le traitement visera à optimiser cette OIM. Si cette référence est impossible, car il existe un défaut de centrage ou de calage, alors il faudra partir d'une position de référence non dentaire, la relation centrée (RC) ou occlusion de relation centrée s'il existe un stoppe vertical (ORC). La reconstruction prothétique visera alors à recréer une nouvelle OIM en relation centrée en RC ou ORC : la position théra-

.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> NB: Comme vu précédemment, le défaut de calage de la position thérapeutique au cours du traitement n'est plus une limite dans le cadre d'un traitement entièrement numérique. Le rapport inter arcade peut en effet être enregistré de façon stable et transmis au laboratoire sans équivoque même si le calage est défectueux car les modèles numériques sont repérés de façon non équivoque dans le repère orthonormé lié au logiciel de CAO de façon stable et pérenne. Cela autorise à créer des positions thérapeutiques plus personnalisées et via des gouttières de stabilisation imprimées, de transposer cette relation en clinique.

peutique. Si l'état physio-pathologique de l'ATM du patient et des muscles intervenants dans la stabilité mandibulaire empêche l'obtention de la RC de façon reproductible, une remise en condition articulo-musculaire sera alors nécessaire avant de pouvoir enregistrer la RC de façon stable et reproductible.

La nouvelle OIM en RC peut être réalisée avec ou sans variation de DVO.

Dans certains cas, par exemple lorsqu'il s'agit de compenser un surplomb incisif important ou d'un DTM récidivant, on pourra choisir de reconstruire l'OIM en antéposition de quelques millimètres.

L'enregistrement de la cinématique mandibulaire, permet au praticien d'enregistrer numériquement n'importe quel rapport inter-arcade. C'est certainement le point le plus déterminant de l'évolution de la 4D selon Maxime Jaisson(61). Le praticien analyse la vidéo présentant le mouvement des modèles numériques et choisit précisément la position mandibulaire spatiale thérapeutique. Il exporte au laboratoire un fichier STL contenant le maxillaire et la mandibule du patient dans cette nouvelle relation. Le laboratoire intègre alors ces données dans son logiciel de CAO pour réaliser la modélisation du projet. Le gain de précision est ici très important car il n'y a plus d'approximation liée à un enregistrement en cire ni de transfert vers un articulateur mécanique ou virtuel .

Ainsi, la position thérapeutique choisie ne se limite plus à la RC ou à l'OIM, car la nécessité d'obtenir une position reproductible transférable de la clinique au laboratoire à l'aide de cires ne tient plus.

Quoi qu'il en soit, la réflexion sur le choix de la position thérapeutique nous amène à nous questionner sur l'OIM résiduelle du patient et donc son évaluation, et cela sera toujours d'actualité!

## II.3.3.2- Les outils numériques pour réaliser un bilan occlusal

Avant de choisir une position de référence pour la reconstruction prothétique un bilan occlusal s'impose. Orthlieb résume l'occlusion à la trilogie précise hiérarchisée « **Centrage**, **calage**, **guidage** » :

- ✓ Le centrage : position mandibulaire de référence non contraignante.
  - Quel est la situation de l'OIM?
  - Décalage de l'OIM par rapport à a relation centrée et libre passage de l'OIM à la RC (long centric way)
- ✓ Calage: stabilisation dentaire et mandibulaire durable
  - Quel est la qualité de l'OIM ? (qualité et stabilité de chaque dent, précision de la position mandibulaire et reproductibilité de l'OIM, stabilité de la mandibule )
- ✓ Guidage : une direction des mouvements mandibulaires symétriques vers l'avant.
  - Quelles sont les trajectoires mandibulaires d'accès à l'OIM ? Vérifier qu'il n'y ait pas de blocage (« ou verrouillage ») du déplacement de la mandibule vers l'avant (L'articulation temporo mandibulaire fonctionne physiologiquement vers l'avant), ni de mouvement de rétroposition (guide anti-retro positionnel sur le pan mésial de la cuspide linguale des premières prémolaires mandibulaires).

#### II.3.3.2.1- Etude du centrage.

Evaluation de la position des condyles grâce aux logiciels Sicat Function suite, Modjaw, JMA (zebris) dans les dimensions transversales et sagittales. Ce logiciel permet une visualisation dynamique au cours des mouvements mandibulaires de la position des condyles au sein de la cavité glénoïde et permet le diagnostic des désordres de l'articulation temporo mandibulaire.

- Dans le sens transversal : la position globale symétrique de la mandibule par rapport au crâne.
- Dans le sens sagittal : l'ensemble condylo discal pouvant rester coapté et pouvant glisser légèrement sur le tubercule antérieur. Le différentiel OIM RC n'excédant pas 1mm n'engendre pas de contrainte sur l'ATM.

Dans le sens vertical, en fermeture de rotation terminale autour de l'axe de rotation des condyles, l'OIM stoppe l'élévation de la mandibule à la DVO « Dimension verticale d'occlusion » . Il existe une grande tolérance dans la variation de la dimension verticale d'occlusion et différentes méthodes pour l'évaluer. La dimension verticale choisie doit optimiser le recrutement et l'équilibre musculaire. Les dispositifs comme le K7 de myotronics ou le JMA de zebris permettent d'évaluer l'activité musculaire et ainsi de repositionner la mandibule dans une zone d'équilibre musculaire.

#### II.3.3.2.2-Fonction de calage.

Il s'agit de vérifier la stabilité intra arcade (forces occlusales réparties sur des versants cuspidiens opposés sur chaque dent et s'exerçant dans l'axe de la dent; contacts proximaux), ainsi que la stabilité inter arcade (répartitions des contacts inter arcades harmonieusement répartis permettant de définir une OIM précise et reproductible autorisant la crispation lors des fonctions physiologiques, comme la déglutition).

Concernant les dents antérieures, la stabilité résulte de l'équilibre des pressions musculaires linguales et labiales, ainsi que des contacts en positions excentrées.

Pour cela différents outils numériques permettent de cartographier les contacts occlusaux statiques et dynamiques. Pour certains ils permettent aussi de mesurer ou simuler par calculs l'intensité des forces exercées.

#### a) Les articulateurs virtuels semi adaptables ou complètement adaptables (62–64)

En positionnant les modèles numériques dans l'articulateur virtuel (mathématique ou complètement adaptable) du logiciel CAO, une cartographie des contacts occlusaux à la fois statiques et dynamiques peuvent être obtenus, comme on pourrait le faire avec un articulateur numérique. Chaque point de chaque arcade étant repéré dans un même repère orthonormé, le logiciel peut

calculer à quel moment et à quel endroit il y a contact entre les deux arcades. Il peut aussi cartographier la durée d'application de ce contact et en déduire donc les zones dentaires qui reçoivent le plus de contraintes occlusales.

La possibilité de réaliser des coupes verticales à n'importe quel endroit de l'arcade permet de suivre l'évolution d'une aire de contact en fonction du mouvement. Il est ainsi possible d'observer une aire de contact et de suivre sa migration le long de d'une cuspide tel que cela se produit réellement dans la cavité buccale.

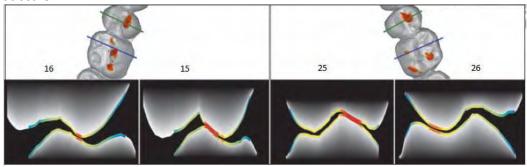


Figure 26 Coupe réalisée sur l'articulateur virtuel 3D Virtual articulator Système (Zebris medical, GmbH®).

Un pixel est détecté comme une aire de contact à partir du moment où la distance entre les deux modèles virtuels (mandibulaire et maxillaire) est inférieure à un seuil de tolérance. Il est possible de faire varier cette "distance seuil" ce qui peut permettre de prendre en compte l'amortissement desmodontal. Les points de contacts sont donc détectés à l'aide de l'axe de cote (abscisse x: mésial/distal; ordonné y: vestibulaire/palatin et cote z: occlusal/cervical) et peuvent être affichés en couleur sur les modèles virtuels. Une fois le mode animé activé, les contacts dynamiques sont calculés de la même façon et affichés sur l'articulateur virtuel totalement adaptable.

De plus une **estimation de l'intensité de ces contacts** peut être évaluée en calculant **l'espace libre d'inocclusion** autour de l'air de contact : le degré d'interpénétration des deux surfaces occlusales est codé sous la forme d'un code couleur. (cf illustration)



Figure 27 a- Cartographie des zones de contact et de l'espace libre d'inocclusion avec le codage couleurs correspondant en coupe ; b- cartographie dynamique des zones de contact (contact prématuré sur 33)

La direction du mouvement étant connue on peut aussi connaître la direction et le sens de la force s'exerçant lors du contact entre les surfaces occlusales.

Enfin la carte dynamique des contacts permet de repérer un contact prématuré suivi d'un glissement vers la position d'OIM et de le corriger plus aisément (souvent dès la phase de conception de la prothèse)

### b) <u>Système denta scan</u>

Le système T-Scan est un système informatisé capable d'analyser quantitativement l'occlusion: localisation, intensité et fréquence des contacts inter arcades.

Le système est constitué d'un capteur constitué d'un film en polyester épais de 60 micromètres. Le système peut être utilisé dans deux modes. Un mode qui analyse la localisation et la durée des contacts, un autre qui analyse la localisation et l'intensité des forces occlusales.

Le patient mord sur le capteur et on déclenche l'enregistrement. Les données numériques sont affichées presque instantanément sur l'écran de l'ordinateur. La modélisation de l'arc dentaire est approximative. On n'observe pas le détail des surfaces occlusales et la localisation ne sera pas aussi précise que sur les modèles numériques dans la méthode exposée précédemment. Cependant, on a accès à la force enregistrée (contrairement à la méthode précédente qui ne pouvait que l'évaluer par calcul). Ces mesures sont affichées avec un code couleur (plus la couleur est chaude et plus la force est importante) et des diagrammes en barre (plus la barre est haute plus la force est impor-

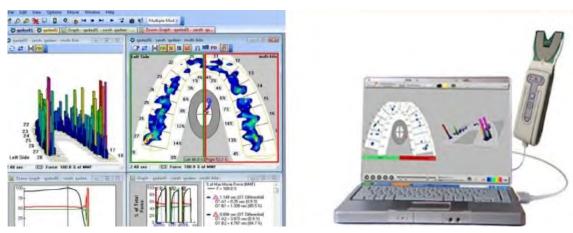


Figure 28 système T-Scan

tante). On peut suivre l'évolution au cours du temps des contacts et de leurs intensités, ce qui permet de détecter des prématurités à la fermeture ou des interférences dans les mouvements de diduction.

Une évolution (65) du système (T-Scan Novus) permet maintenant de jumeler les empreintes optiques au capteur et ainsi de localiser les contacts et forces exercées par rapport aux reliefs occlusaux.

#### II.3.3.2.3-Fonction de guidage.

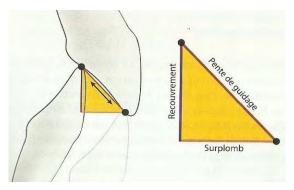


Figure 29 Triangle de Slavicek

Les systèmes JMT (Jaw Motion tracing système) permettent d'enregistrer la cinématique mandibulaire et de visualiser les contacts occlusaux dans tous les mouvements excentrés (protrusion, retro-pulsion et diduction). Il faudra veiller à ce qu'il existe une liberté fonctionnelle autorisant des mouvements vers l'avant, suivant la pente de guidage ou angle fonctionnel (matérialisé par le triangle de Slavicek). Le guide antérieur est un système de contrôle, fonctionnant à la manière d'un palpeur proprioceptif, comme « la canne de

l'aveugle ». Ils constituent un cône d'accès à l'OIM qui représente alors le sommet du cône. Pour un guidage efficace, économe en énergie et préservant les structures dentaires, il est nécessaire d'avoir des contacts, légers et précis (ponctiforme ou linéaire), reproductibles, sur des dents sensibles (antérieures). Dans ces conditions, les messages proprioceptifs transmis au système nerveux, seront suffisamment fin et précis pour que celui-ci puisse adapter l'amplitude et la vitesse des mouvements mandibulaires, et la guider sans interférences vers la position d'OIM.

La figure ci-dessous montre un modèle théorique des surfaces de guidages.

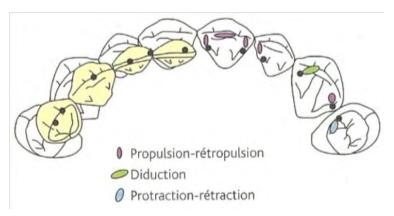


Figure 30 Modèle théorique des surfaces de guidages.

Les outils numériques faisant appel aux logiciels de CAO couplés à l'acquisition des modèles numériques et des données cinématiques permettront d'évaluer les surfaces de guidages des reconstructions de façon fine et précise même au stade de la conception et avant essayage en bouche des prothèses provisoires.

De plus la conception du guide antérieur n'est pas indépendante des déterminants postérieurs de l'occlusion, autrement dit la trajectoire des condyles lors des différents mouvements mandibulaires

est dépendante du guide antérieur. Les nouveaux outils numériques permettant de tracer les trajectoires condyliennes réelles (tenant compte de la compressibilité du disque articulaire en particulier) permettent de personnaliser le guide antérieur afin d'optimiser :

-les trajectoires condyliennes : éviter tout pincement du disque articulaire ou compression de la zone bilaminaire rétro discale.

-Les trajectoires dentaires : éviter toute interférence, en veillant à ce que s'établissent dans les zones non concernées par le guidage, des désocclusions suffisantes pour protéger la dentition de forces latérales nocives.

Sumiya Hobo (66) montre comment la trajectoire du condyle travaillant est affecté par des modifications du guide antérieur alors que le condyle non travaillant est lui peu affecté. Il définit des critères personnalisés reliant la trajectoire condylienne à la forme du guide antérieur, en étudiant les trajectoires condyliennes dans les mouvements d'excentricité sur 60 patients sains. Il en déduit que le guide antérieur doit provoquer un mouvement de latéralité en dehors, le long de l'axe horizontal transverse du côté travaillant lors d'un mouvement de diduction.

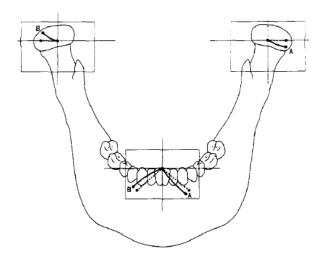


Figure 31 : (66)Effet du guidage antérieur sur la trajectoire du condyle travaillant. La ligne neutre représente le chemin incisif imaginaire (ligne pointillée) lorsque le condyle travaillant se déplace le long de l'axe transverse horizontal. La trajectoire incisive réelle est plus raide que la ligne neutre. Le condyle travaillant se déplace ensuite sous l'axe horizontal transverse ou détrusion (A). Si le trajet incisif réel est plus plat que la ligne neutre, le condyle de travail se déplace au-dessus de l'axe ou surtrusion (B)

L'enregistrement des mouvements réels de la mandibule permet d'accéder aux mouvements mandibulaires et donc au mouvement des condyles avec le guide antérieur en l'état. Si on modifie le guide antérieur dans le cadre d'une réhabilitation globale, on modifie, en particulier du côté travaillant, les trajectoires condyliennes. (66,67) Les logiciels JMT permettent d'analyser la position du condyle au sein de la cavité glenoïde : par exemple la fonction EPA (Electronique Analyse Position of the Condyle) du logiciel Winjaw PC mesuring program associé au système d'acquisitaion JMA (Zebris GmbH).

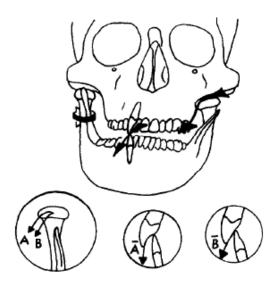


Figure 32 : Paradoxe : Devons-nous concevoir le guide antérieur en fonction des déterminants postérieurs (comme le déplacement latéral du condyle A ou B)? Lesquels dépendent eux mêmes de la forme anatomique du guide antérieur (face palatine des dents antérieures maxillaire)

Dans l'avenir, postulant que la mandibule est un solide, postulant que les trajets au niveau du condyle non travaillant sont peu modifiés par les modifications du guide antérieur (66,67), on pourrait déterminer des formules cinématiques permettant de traduire tout changement de trajectoire au niveau du guide antérieur en une modification au niveau du trajet du condyle travaillant. Cette nouvelle fonction, couplée à l'EPA permettrait d'optimiser et de personnaliser le guidage antérieur par rapport à l'anatomie de chaque patient.

#### II.3.3.3- OIM renforcée

#### II.3.3.3.1- Gestion de l'occlusion par les systèmes CFAO. (68)

Pour des restaurations unitaires ou de petite étendue, lorsque l'OIM est stable et le guide antérieur fonctionnel, la position thérapeutique est l'OIM. Les systèmes CFAO chair side ou non, proposent des techniques d'enregistrement et de restauration de l'occlusion dans le cadre de l'OIM renforcée suivant quatre méthodes principales :

- L'analyse géométrique : se fonde sur une analyse morphologique des dents environnantes pour déterminer l'anatomie occlusale de l'élément prothétique. Dans le cas où il reste quelques parois (par exemple pour un inlay), le logiciel s'en inspire pour restaurer la partie manquante (position

d'une crête marginale restante, d'une ou de plusieurs cuspides). Aucune empreinte optique de l'occlusion ou de l'antagoniste n'est alors nécessaire.

- Le mordu occlusal. C'est une acquisition optique de l'empreinte laissée par l'antagoniste dans un matériau plastique. Le logiciel recréera en volume le négatif laissé dans l'empreinte.
- **–L'empreinte vestibulaire.** Cette solution nécessite plus d'acquisitions de données. Il faut faire une empreinte optique du secteur à restaurer, puis une empreinte optique du secteur antagoniste et enfin, une empreinte vestibulaire des deux secteurs en occlusion. Cette acquisition doit être suffisamment large pour apporter au logiciel les données suffisantes pour confronter les modèles des deux arcades.
- le FGP (Fonctionnaly GeneratedPath). Ce procédé proposé par Meyer puis par Dawson revient sur le devant de la scène grâce au logiciel de CAO. Son avantage majeur est d'optimiser l'anatomie occlusale en fonction des trajets fonctionnels. Un premier enregistrement optique par la caméra est réalisé. On fait l'acquisition numérique de l'empreinte statique en occlusion d'intercuspidie maximale (OIM) de la dent antagoniste laissée dans un matériau plastique. Le logiciel reconstruit alors l'anatomie occlusale de la dent antagoniste à partir du négatif obtenu comme pour un mordu. Le même procédé est appliqué avec un deuxième enregistrement mettant en oeuvre les « trajets de guidage » pris en compte par un support modelable lors de la mise en mouvement de la mandibule. La clé numérique de cet enregistrement placée en OIM permet de concevoir la prothèse en éliminant les interférences fonctionnelles. La cinématique mandibulaire est ainsi prise en compte en s'affranchissant complètement de la gestion des déterminants de l'occlusion.

## II.3.3.3.2- Application du FGP pour la conception par CAD/CAM d'une prothèse implanto portée. (69)

Restaurer des édentements par des prothèses implantoportées est de plus en plus courant. Le succès à long terme de telles restaurations nécessite un réglage occlusal des plus attentifs. En particulier on doit éviter toute interférence avec les dents opposées dans le mouvement de fermeture en OIM et dans les mouvements excentrés de diduction ou protrusion. Cela suppose de connaître parfaitement les mouvements mandibulaires du patient. Les articulateurs virtuels complétement adaptables peuvent résoudre cette problématique mais cela impose un coût en temps et matériel. Une autre méthode, applicable pour des édentements de petite étendue, développée par Meyer en 1959 et reprise par Dawson, et remise à jour par les systèmes de CFAO : le FGP Functionally generated path.

Les auteurs Park et al. (2019) décrivent une méthode adaptant le FGP aux outils numériques actuels en l'illustrant sur un cas clinique : remplacement par des prothèses implanto portées des deux premières molaires gauches maxillaires (26 et 27). Le schéma occlusal observé est une fonction de groupe.

**Première étape** : après avoir retiré les piliers, les auteurs réalisent l'empreinte optique du secteur gauche maxillaire et mandibulaire puis enregistrent l'occlusion centrée.

Puis le secteur 2 maxillaire est scanné de nouveau avec les scans bodies fixés sur chaque implant.

**Deuxième étape** : Conception des couronnes sur implant en occlusion centrée grâce à un logiciel de CAO (Exocad)

**Troisième étape**: Retirer les scans bodies et les remplacer par des transferts d'empreintes clipsés sur les implants. Une tablette fabriquée à base de résine PMMA, elle-même fixée aux clips (snap on) à l'aide d'une résine PMMA polymérisable. La tablette va servir de support pour le matériau d'impression permettant d'enregistrer le FGP.

Il est nécessaire de vérifier à ce moment-là que lors de la fermeture en occlusion centrée et excentrée la table reste à distance des dents antagonistes afin de ménager un espace suffisant pour la cire d'enregistrement. Au besoin, meuler les contacts pour ménager l'espace nécessaire à la cire d'enregistrement du FGP.

**Quatrième étape** : Fixer la cire sur la tablette et la ramollir dans un bain d'eau thermostaté (60 °C) ; clipser la tablette sur les transferts d'implant et demander au patient d'effectuer des mouvements en occlusion centrée et excentrée.

**Cinquième étape**: Une fois les mouvements mandibulaires du patient enregistrés dans la cire sur la tablette FGP, scanner le secteur 2 maxillaire tablette FGP en place. En utilisant les fonctions de superposition du logiciel de CFAO, superposer ce fichier avec le fichier des prothèses conçues par le logiciel en occlusion centrée.

Toutes les zones visibles des prothèses au-dessus de la cire du FGP constituent des zones d'interférence qu'il faut soustraire à l'aide du logiciel de CFAO afin d'obtenir un nouveau design de la prothèse qui ne produira pas d'interférences.

Ajouter des sillons sur les surfaces non esthétiques « virtuellement meulées » de la prothèse grâce à la fonction bio générique du logiciel.

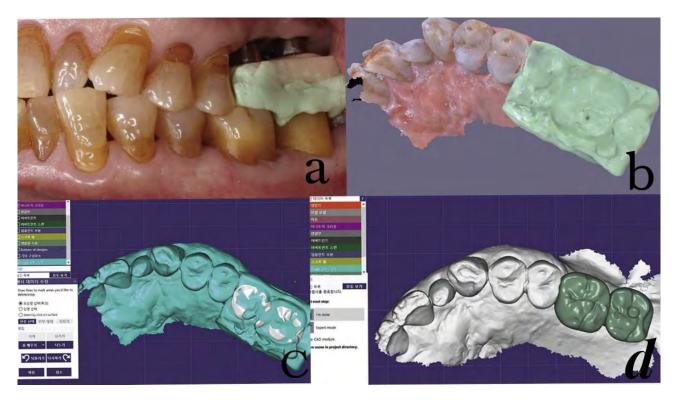


Figure 33 : Image de la tablette FGP avec la cire en position (a) Empreinte optique de l'enregistrement FGP (c) Fusion du fichier précèdent (empreinte optique du FGP) et du fichier des prothèses conçues par CFAO en occlusion centrée. Les zones en blanc, dépassant la cire du FGP représentent les zones d'interférences à soustraire (d) Design des Prothèses corrigées ne produisant plus d'interférence

Le FGP peut aussi être réalisé de façon totalement numérique à condition d'avoir enregistré les données sur la cinématique mandibulaire. Dans ce cas la fusion du fichier JMT, avec les fichiers STL dans un logiciel de CFAO (EXOCAD par exemple) permet de générer un FGP mandibulaire ou maxillaire (mouvement relatif du maxillaire par rapport à la mandibule).

On peut aussi générer un FGP en programmant un articulateur virtuel avec des paramètres moyens ou personnalisés mais cela reste moins pertinent qu'une simulation réelle des mouvements mandibulaires du patient.

#### II.3.3.4- Position d'équilibre musculaire ou position thérapeutique myocentrée : application du K7

#### II.3.3.4.1- le système K7.(70–73)

Le système K7<sup>®</sup> est un système informatique permettant de réaliser trois fonctions :

- La neurostimulation transcutanée ou décontraction musculaire
- L'électromyographie, enregistrement de l'activité musculaire.
- La kinésiographie ou enregistrement de la position mandibulaire dans un repère orthonormé lié au structures crâniennes fixes.

La neurostimulation transcutanée ou TENS (Transcutaneous Electric Nerve Stimulation) consiste à appliquer sur la peau un courant destiné à stimuler les fibres nerveuses sous-jacentes. Elle permet d'agir :

#### > sur la douleur

En stimulant les fibres sensitives de gros calibre, qui ont un rôle inhibiteur sur la transmission des messages douloureux, et en favorisant la libération d'endomorphine dans les muscles. L'accumulation d'acide lactique est également responsable de douleurs musculaires. Or les TENS en provoquant des séries de contractions-décontractions des muscles stimulés, permettent d'accélérer le métabolisme musculaire et d'éliminer l'acide lactique accumulé pendant des phases de contractures. Lors de la séance, le courant doit être perçu par le patient mais ne doit pas être douloureux. Les secousses musculaires produites par la stimulation sont apparentes ; à la fin de la séance, le patient doit ressentir une impression de détente et de quiétude.

#### sur les spasmes musculaires

Le Myo moniteur stimule, par voie transcutanée, les branches motrices des nerfs crâniens V et VII, ce qui détend la musculature associée. Il y a une réduction de l'activité musculaire à un degré assez significatif. Ainsi, la rééducation et les mouvements demandés ultérieurement par la kinésiographie pourront être réalisés dans de meilleures conditions. Les muscles masticateurs détendus, les compensations musculaires mises en place par le patient seront levées. Pendant toute la stimulation, l'activité musculaire est mesurée grâce à l'électromyographie.

L'électromyographie de surface ou EMG réalise la mesure de l'activité musculaire par le biais d'électrodes positionnées à la surface cutanée des fibres musculaires concernées. Elle permet de compléter l'examen clinique par palpation avec la mesure de données quantitatives de l'activité des muscles masticateurs ou posturaux. Le programme permet de prendre les données électromyographiques soit au repos ou en fonction. Huit sites peuvent être affichés simultanément, pendant une période de 15 secondes.

**Enfin la kinésiographie** a été détaillée partie I.6.1.3. Elle est basée sur l'induction ou courants générés dans des conducteurs par la variation d'un champ magnétique.

#### II.3.3.4.2- La position myocentrée.

En 1969, Jankelson (74,75) a introduit l'utilisation de stimulation neuronale électrique transcutanée (TENS) sous la forme d'une unité Myomonitor (Myotronics-Noromed, Kent, Washington). Après une période de stimulation avec l'appareil et quand il est déterminé que les muscles sont détendus, un enregistrement inter occlusal est effectué pour établir une «occlusion myocentrique».

Jankelson définit l'occlusion myocentrique comme le point d'occlusion terminal atteint par la contraction du muscle isotonique à partir de la position de repos le long de la trajectoire myocentrique ( équilibrée musculairement c'est-à-dire contraction minimale, synchrone et symétrique des

muscles masticateurs ). Il a en outre observé sur une étude avec dix sujets, que la position obtenue peut coïncider avec la position d'intercuspidie maximale, mais en aucun cas cela avec la relation centrée.

## *II.3.3.4.3-* Protocole d'enregistrement.

Sunny Manchanda dans un article(76) de 2015 du Journal of International Oral Health, décrit une méthode d'enregistrement de la relation myocentrée.

## > Enregistrement des mouvements de la mâchoire et EMG

Les mouvements de la mâchoire ont été enregistrés à l'aide du kinésiographe et le suivi de l'activité musculaire a été enregistrée par un EMG.

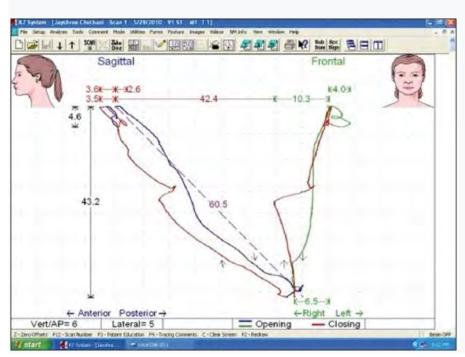


Figure 34 : Graphique illustrant le chemin d'ouverture et de fermeture de la bouche



Figure 35 Enregistrement de l'amplitude des mouvements : verticaux (en bleu, avec évaluation de l'espace libre d'inocclusion), antéro postérieur (en rouge) et latéraux (en vert)

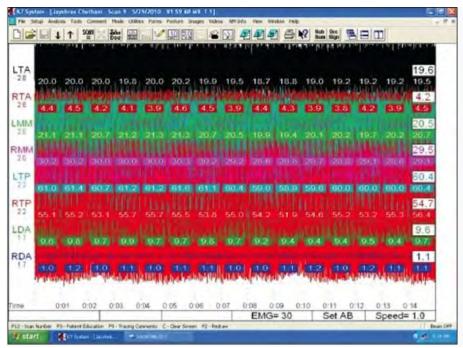


Figure 36 Enregistrement de l'activité musculaire par EMG

## Déconditionnement ou relâchement des muscles masticateurs par l'application de TENS (myomonitor)

Avec l'aide de TENS, la relaxation complète des muscles a été atteinte, ainsi que la position de repos physiologique de la mandibule.

## Mode d'application du TENS :

- Trois types d'électrodes sont utilisées : électrode positive ; électrode négative et électrode reliée à la masse(référence électrique)
- Les électrodes positives et négatives ont été collées dans la région de l'incisure mandibulaire devant l'oreille et l'électrode reliée à la masse a été collée dans la ligne médiane derrière le cou

- L'ampleur du TENS a été progressivement augmentée pour réaliser les contractions musculaires. Il a encore été augmenté pour atteindre la secousse mandibulaire qui était la valeur clinique seuil pour le patient (5 mV)
- A ce seuil clinique, la relaxation musculaire a été réalisée pendant 45 min.

### > Enregistrement de la position myocentrée

L'enregistrement de la position thérapeutique myocentrée se fait par la fermeture non guidée du patient à partir de la position de repos avec un contrôle en temps réel de l'activité musculaire. L'enregistrement clinique de cette position thérapeutique peut alors être réalisée à l'aide de mordus en silicone dans les secteurs postérieurs.

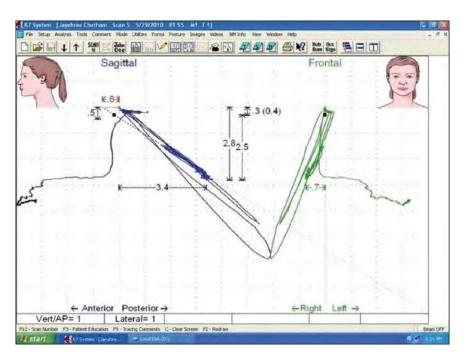


Figure 37 Position myocentrée représentée par le point noir, marqueur de navigation pour réaliser le mordu.

## II.3.3.6-Position personnalisée via impression d'une gouttière de repositionnement(57,77)

Le logiciel SICAT function (Bonn, Germany, Sirona) permet de fusionner les données 3D issues du CBCT, avec les données cinématiques de la mandibule enregistrées à l'aide du dispositif SICAT JMT+ et enfin de superposer les empreintes optiques. Le logiciel Sicat Function permet alors de visualiser le mouvement des mâchoires ainsi que celui des condyles au sein de la cavité glénoïde en temps réel. L'utilisateur peut alors visualiser les interférences occlusales ainsi que les prématurités au niveau de l'articulation dento-dentaire. Il peut également repérer les zones de compressions au niveau de l'articulation temporo mandibulaire ou une malposition du condyle au sein de la cavité glénoïde.

En fonction de ces enregistrements, le praticien pourra définir une position thérapeutique visant à soulager les symptômes d'une pathologie des ATM. A partir de cette position inter maxillaire personnalisée, directement transférable vers un logiciel CAO, il pourra concevoir une gouttière de repositionnement de la mandibule directement réalisable par impression 3D.

Un service lié au logiciel SICAT function, permet de commander et de faire réaliser une telle gouttière en un clic!

**Application**: lors d'une désunion condylo discale récente et réversible, la manœuvre de Farrar permet de recapter le disque articulaire. L'enregistrement via le système SICAT de cette manipulation permet d'enregistrer la position de la mandibule par rapport au maxillaire une fois le disque coapté. A partir de cet enregistrement du nouveau rapport inter arcade le prothésiste peut éditer une gouttière de stabilisation par impression 3D. Cette gouttière sera insérée en bouche afin de stabiliser la position mandibulaire normalisée et éviter une nouvelle perte du disque articulaire.

#### II.4-L'octa 4 : situation des dents antéro mandibulaires

## II.4.1-Introduction(46)

Les dents antérieures mandibulaires constituent le premier groupe dentaire à se mettre en place dans la dentition et celui qui bénéficie de la plus grande longévité sur arcade, en particulier la canine. De plus une étude de la variabilité inter individuelle de l'inclinaison axiale des dents montre que les incisives et canines mandibulaires sont de loin le groupe dentaire qui montre la plus grande stabilité au niveau de leur orientation. Alors que les compensations dento alvéolaires des incisives maxillaires peuvent amener des différences d'orientation de 60°, cet intervalle est réduit à 15 ° pour les incisives mandibulaires.

Les études céphalométriques montrent cette stabilité. Ricketts situe le bord libre :

- **verticalement** sur la ligne Xi (centre géométrique de la branche montante), à la commissure labiale au repos (ce dernier repère muqueux n'est pas stable, mais donne une indication). Si elle est connue la courbe de Spee permettra de déterminer la position verticale du bord libre.
- sagittalement, selon Ricketts, le bord libre se situe en moyenne à 1mm en avant de la ligne A-Pogonion ; A point le plus déclive du vestibule maxillaire.

Les contraintes s'exerçant sur ces dents sont axiales. L'orientation suit une direction de 90 ° par rapport au rayon d'ouverture. C'est ce qu'on appelle la loi de la tangente ou principe de l'orthogonalité. L'axe des incisives présente un angle de 90° par rapport à la droite joignant le bord libre à l'axe instantané de rotation.

L'inclinaison de l'incisive montre des variations autour de cette position idéale d'un point de vu biomécanique, liées à l'environnement squelettique et musculaire. Par exemple plus inclinée en avant dans les classes II pour aller chercher le contact avec la face linguale de l'incisive maxillaire, moins inclinée en classe III.

#### II.4.2- Planification numérique de la reconstruction du bloc antérieur mandibulaire.

En conclusion de la partie précédente lors de la reconstruction du bloc antérieur mandibulaire, on suivra les principes suivants :

- Ensemble compact agissant comme un bloc : pointes canines et bords libre des incisives alignées dans un plan horizontal.
- Axialisation des contraintes occlusales suivant le principe d'orthogonalité.
- Verticalement : aligner le bord libre sur la ligne Xi-commissure labiale.
- Sagittalement : 1mm en avant de la ligne A-pogonion.

Le traitement numérique des données nous apporte de nouvelles possibilités permettant de répondre à ces principes de construction de façon facilitée et précise. En effet la possibilité de :

- -superposer un scan facial avec les données CBCT
- -reproduire le mouvement d'ouverture de la mandibule, déterminer automatiquement le centre de rotation du mouvement de rotation initial à l'ouverture. Cela nous permet ainsi d'axialiser les contraintes suivant le rayon d'ouverture.
- -superposer les modèles numériques des arcades et les éventuels wax up dessinés grâce à un logiciel de CAO

Ces différentes possibilités nous permettent de répondre à ces contraintes en visualisant précisément sur le même fichier les repères cutanés, osseux, cinématiques et ainsi répondre au cahier des charges.

On pourrait imaginer d'introduire, sur des bases statistiques intra individuelles et/ou interindividuelle, les variations liées aux compensations alvéolaires et squelettiques. C'est déjà le cas certainement de programmes d'analyses orthodontique mais je n'ai pas étudié la bibliographie sur ce sujet.

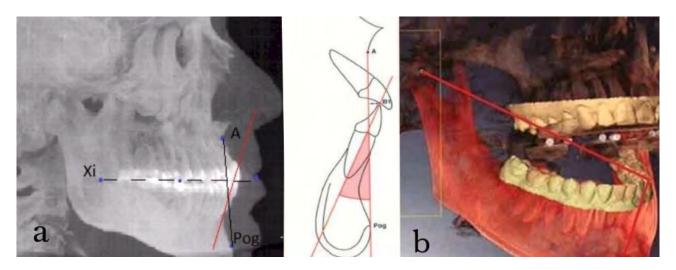


Figure 38 a -position verticale et sagittale de l'incisive mandibulaire selon l'analyse de Ricketts b-Principe d'orthogonalité.

### II.4.3-Planification / volume osseux : Implantologie guidée.

## Intérêt de la chirurgie guidée :

Le clinicien doit partir du projet prothétique, basé sur des considérations esthétiques et fonctionnelles (distribution des forces masticatoires).

Une fois la planification numérique réalisée, les wax up numériques préfigurant la future prothèse nous permettent de déterminer les futurs axes implantaires ainsi que la nécessité ou non de réaliser des greffes osseuses suivant le contexte osseux et les compromis réalisables. Les technologies numériques nous permettent ensuite de transférer en bouche le projet implanto prothétique planifié en éditant un guide chirurgical et en le réalisant par impression 3D ou plus rarement par usinage.

## II.4.3.1- Cahier des charges d'un guide chirurgical :(78)

- Il doit être constitué d'un matériau rigide de façon à minimiser la déformation éventuelle lors de la mise en place et d'un appui lors du forage.
- Réalisé en matériau biocompatible, avec un bon état de surface, non agressif pour les tissus environnants.
- Stérilisable sans déformation
- N'interférant pas avec le geste chirurgical lors de la levée d'un lambeau.
- Mise en place reproductible, précise
- Permettant le refroidissement de l'os et des forets lors du forage.

## II.4.3.2-Différents types de guide chirurgicaux :(79–81)

## II.4.3.2.1-Guide à appui dentaire.

Ce guide comme son nom l'indique a pour appui les dents résiduelles qui bordent l'édentement. Ce guide est indiqué dans les cas d'édentement partiel antérieur ou postérieur encastré et particulièrement pour les édentements unitaires antérieurs. Il est aussi indiqué dans les édentements terminaux ou distaux, mais la zone édentée doit être inférieure à 30mm. Il permet d'effectuer des chirurgies avec ou sans lambeau. le guide le plus facile à réaliser, le plus simple à mettre en place et à manipuler. Il est également le plus précis de tous les guides chirurgicaux, surtout quand il s'agit d'un édentement encastré. Le guide doit être maintenu au contact des dents tout au long de la chirurgie de façon ferme. Toutefois une pression trop exagérée pourrait déformer le ligament alvéolo-dentaire des dents d'appuis qui risquent alors de s'enfoncer. Cela pourrait par conséquent compromettre la précision du transfert des points de repères et donc celle du forage.

#### II.4.3.2.2- Guide chirurgical à appui muqueux.

Ce guide est indiqué dans les cas d'édentement total mais aussi d'édentement partiel à partir de 30 mm.

Ce guide est directement posé sur la muqueuse. Sa mise en place est relativement complexe et nécessite de ce fait une certaine expérience. Le guide nécessite l'utilisation d'une clé d'occlusion ou de positionnement occlusal. Des vis de fixation ou de stabilisation appelées encore clavettes transosseuses permettent ensuite d'obtenir une stabilité optimale du guide.

Le principal avantage de ce guide réside dans la technique chirurgicale mini-invasive qui évite d'avoir à réaliser un lambeau périosté.

#### II.4.3.2.3-Guide à appui osseux

Ce guide est directement en contact avec l'os. Il est indiqué dans tous les cas où un lambeau mucopériosté doit être soulevé : lors d'un cas de « All on four », « All on six », de bridge complet sur implants, lorsqu'il y a besoin d'une greffe osseuse ou de ROG (Régénération osseuse guidée) ou tout simplement pour visualiser la crête en cas de défauts osseux.

Une clé d'occlusion permet de s'assurer du bon positionnement du guide et il nécessite la pose de vis de stabilisation comme le guide à appui muqueux. Sa mise en place est identique mais elle est encore plus complexe du fait de la gêne supplémentaire liée au lambeau.

### II.4.3.3-Les forets et le système de guidage.

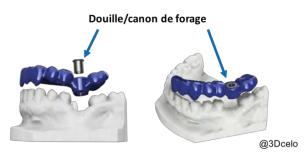


Figure 39 Guide chirurgical avec douille

Le guide chirurgical comprend une douille, appelée aussi canon de forage. Pour la chirurgie 100% guidée, le diamètre de la douille dépend du système implantaire utilisé.

Selon la marque, plusieurs systèmes sont mis en œuvre pour effectuer la séquence de forage à travers le guide chirurgical :

### Les forets à butée fixe :

Ce sont des forets spécifiques à la marque d'implant, à diamètre croissant qui permettent de préparer le lit implantaire. Ils ont une butée fixe et sont utilisés avec les cuillères.

#### - Les cuillères :

Les cuillères permettent de passer successivement toute la séquence de forets en utilisant le même guide chirurgical sans modifier son positionnement en bouche.

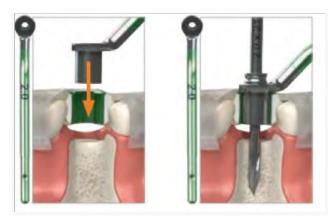


Figure 40 Emboitement Foret, cuillère et canon de forage

Elles ont à leur extrémité un orifice recevant les forets de diamètres croissants. Le diamètre externe de l'orifice reste inchangé sur toutes les cuillères et correspond donc au diamètre interne de la douille du guide. Seul le diamètre interne des cuillères varie et s'adapte aux multiples diamètres de forets.

La pénétration de la cuillère dans le canon de forage doit avoir la même hauteur que le canon du guide chirurgical : il n'y a quasiment aucun jeu entre la cuillère et le canon. La hauteur du canon, la faible tolérance de jeu entre foret et cuillère ainsi qu'entre le canon et la cuillère garantissent la précision du forage osseux. Dans le sens vertical, la butée du foret arrive sur le méplat de l'orifice de la cuillère et empêche le forage au-delà de la limite prévue lors de la simulation numérique.

### - Les forets avec cylindre de guidage :

Ils sont spécifiques à certaines marques d'implants. Les forets de différentes tailles et différents diamètres qui composent la trousse ont tous un cylindre de guidage entre la butée et la partie active

de même diamètre que celui de la douille. C'est donc ce cylindre qui guide le foret à travers la douille.

### - Les bagues de centrage :

Une bague de centrage est une bague coulissante amovible placée sur les forets successifs assurant une stabilité parfaite de l'outil pendant toute la séquence de forage. Elle constitue donc une butée pour conserver la profondeur de forage.

#### - Les douilles réductrices :

Le principe est le même que pour les cuillères. Des douilles de diamètres croissants correspondants aux diamètres des forets sont placées successivement dans le guide à l'intérieur de la douille maîtresse.

### - Les contre-angles spéciaux :

Ce sont des contre-angles spécifiques à certaines marques d'implants avec un système de butée qui permet de déterminer précisément la profondeur de forage souhaitée.

### - Le porte implant:

La pose de l'implant dans le trou de forage constitue une phase critique. En effet, l'implant peut encore être placé dans un mauvais axe même si les forages antérieurs sont précis. C'est pour cela que cette étape comprend des instruments qui ne permettent pas le moindre jeu entre le diamètre interne du canon et le diamètre externe du porte-implant.

Les différentes fonctions des porte-implants :



Figure 41 porte implant

- Garantir un axe d'insertion de l'implant identique à celui du forage ;
- Régler la profondeur d'enfouissement de l'implant ;

La longueur du porte-implant n'a pas forcément de rapport avec la longueur de l'implant. Elle dépend des exigences de la construction du guide chirurgical et de la profondeur d'enfouissement de l'implant. Donc la longueur entre la partie supérieure de la douille (butée du porte-implant) et le col de l'implant est variable pour une même longueur d'implant. Les porte-implants se vissent de façon identique sur des implants à connexion interne ou externe.

Il faut donc assembler l'implant, le porte-implant, le contre-angle et la pièce intermédiaire qui s'engage dans le porte-implant pour positionner l'implant. Plus l'implant sera long, plus une importante ouverture buccale sera nécessaire. Une faible ouverture buccale peut dans certains cas constituer un facteur restrictif pour l'implantologie guidée.

### II.4.3.4- Planification implantaire et conception du guide (78,82,83)

De nombreux logiciels de planification existent aujourd'hui sur le marché et permettent tous de concevoir un guide chirurgical. La plupart sont des logiciels propriétaires (Simplant de Dentsplysirona, Nobel Clinician chez Nobel Biocare, Implant studio chez 3 shape, coDiagnostiX chez Straumann..). Un logiciel Blue Sky studio est maintenant proposé gratuitement (seul l'export du fichier STL associé au guide chirurgical issue de la planification est payant).

Ces logiciels de planifications permettent d'intégrer les différents fichiers numériques liés au patient et au projet prothétique, de les superposer afin de les utiliser pour planifier les positions implantaires.

On commence à importer les données DICOM (issues du CBCT) du patient permettant de visualiser les bases osseuses, mais aussi les différents obstacles anatomiques (canal mandibulaire, foramen mentonnier à la mandibule)

Ensuite on importe le fichier STL des arcades du patient provenant directement de l'empreinte optique ou d'un scan des empreintes ou encore du moulage.

L'étape de la superposition des deux fichiers commence alors.

Différentes méthodes existent (comme décrit dans la partie II.1)

- Une superposition ou matching automatique. Le logiciel repère automatiquement des points remarquables commun aux deux fichiers et applique ensuite un algorithme de superposition. Cela fonctionne bien si les arcades sont dentées (nombreux points de repères communs) et qu'il n'y a pas trop d'artéfacts. Cependant, lorsque l'arcade est totalement édentée il faudra développer d'autres stratégies, comme la méthode du double scannage : le projet prothétique est réalisé physiquement à partir d'une empreinte du patient et une clé de positionnement occlusale est réalisée en silicone. Ce projet est alors dupliqué en guide radiologique en résine sur lequel se placeront 6 à 8 repères radio opaques( billes en titane ou sulfate de baryum). La position de ces marqueurs devra être à la fois vestibulaire et palatine ou linguale et se positionner sur différents plans afin d'optimiser la future superposition. Un premier examen radiologique est réalisé avec la prothèse en place et la clé occlusale sur le patient. Un second CBCT est réalisé, celui du guide radiologique orienté de la même façon. Les repères radio-opaques permettent de superposer les deux images et de visualiser le projet prothétique et la muqueuse. Cependant avec cette technique le work flow numérique est interrompu.
- Un matching point par point où il faudra sélectionner manuellement des points remarquables et concordant sur les deux fichiers DICOM et STL.

Quelle que soit la méthode utilisée il faudra vérifier sur le panoramique la bonne concordance entre les deux images et on pourra procéder à une correction manuelle de l'alignement des deux fichiers (fonction alignement du modèle dans blue sky)

Enfin le fichier STL projet prothétique pourra à son tour être importé et superposé aux autres, ou alors directement réalisé sur le logiciel grâce à une bibliothèque de dents virtuelles. On pourra superposer le scanner facial du patient pour la planification esthétique (DSD 3D)

Nous avons alors dans le logiciel la synthèse de toutes les données numériques, alignées par rapport à un même système de coordonnées, permettant de commencer la planification implantaire. Le logiciel possède une bibliothèque d'implant. Cette bibliothèque est régulièrement incrémentée. Il est possible aussi de positionner un futur pilier implantaire.

Suivant le diamètre d'implant choisi on définira la taille des puits de guidage pour le guide chirurgical, on choisira la douille (en fonction du diamètre, de la longueur et de la profondeur d'enfouissement de l'implant) et on positionnera les broches de fixation transmuqueuse pour visser et stabiliser le guide.

Une fois tous les implants en bonne position, le design du guide peut avoir lieu. Au sein du logiciel blue sky, un onglet fabrication du guide permet de tracer son contour, définir son épaisseur ( 3 mm minimum pour la rigidité). Le fichier STL associé au guide pourra être ensuite exporté dans un logiciel de CAO ou d'impression 3D (Meshmixer, exocad, sketchup) pour améliorer son design et être imprimé ou usiné, ou directement exporté du logiciel de planification vers un laboratoire de prothèse pour réalisation.

La planification à l'aide de guides chirurgicaux est une planification statique, qui ne permet pas de suivre la mise en place de l'implant en temps réel. Des systèmes dynamiques avec contrôle instantanée de la position de l'implant permettent de lever cette incertitude.

Le dispositif ROBODENT, ou X-guide comprend un logiciel, une caméra optique et un système de capteurs similaires au GPS. Le logiciel met en évidence les zones anatomiques sensibles et les situe dans les trois dimensions, ce qui permet au chirurgien de choisir à l'avance l'emplacement le plus favorable, ainsi que l'orientation, le diamètre et la profondeur de l'implant, comme dans une planification classique.

Après cette étape de conception, pendant l'intervention, la caméra et le système de capteurs permettent une navigation en temps réel. Ainsi à chaque instant le dentiste a un contrôle visuel sur le forage, les gestes et l'exécution du plan de traitement élaboré préalablement.

Le chirurgien conserve les yeux fixés sur l'écran tandis que ses mains sont dirigées par un "attelle chirurgicale virtuelle". Un lien constant existe entre la simulation en 3D (issue du plan de traitement) toujours visible à l'écran, la caméra, les capteurs optiques et les mains du chirurgien-dentiste.

# II.5-L'octa 5 situation des dents antéro-maxillaire. Aspect esthétique. Face vestibulaire.

### II.5.1-Introduction -ligne des collets, situation du bord libre, situation du bombé vestibulaire.

Ce qui caractérise le groupe dentaire antéro maxillaire est une grande variabilité de positionnement par rapport au groupe antérieur mandibulaire. L'inclinaison des incisives en particulier est très variable afin de s'adapter et compenser les dysharmonies squelettiques. Les mesures céphalométriques montrent une variation d'inclinaison sur une plage de 60° selon J.D Orthlieb (46). Les repères céphalométriques sont peu utiles pour déterminer le positionnement de ce groupe dentaire. Les critères de construction s'appuieront donc essentiellement sur des aspects esthétiques pour ce qui concerne la face vestibulaire.

- J.D.Orthlieb évoque les principaux points de repères esthétiques sur lesquels doivent s'appuyer l'observation et la réflexion du praticien afin de reconstruire les faces vestibulaires des dents antérieures maxillaires. Dans l'ordre chronologique :
- 1-Bord libre des incisives médiales débordant légèrement de la lèvre supérieure au repos (2mm en moyenne)
- NB : le bord libre des incisives médiales (plan esthétique) est parallèle à la ligne bi pupillaire, ellemême perpendiculaire au plan de symétrie global du visage.
- 2-Soutien de la lèvre supérieure dans le plan sagittal
- 3-Point cervical des incisives médiales maxillaires par rapport à la lèvre supérieure durant le sourire, le rire ou sourire forcé.
- 4-Analyse de la courbe esthétique ou ligne du sourire (courbe reliant les bords occlusaux) englobant les incisives latérales, canines et les premières prémolaires parfois, par rapport au cadre labial. La ligne du sourire doit reproduire la courbe dessinée par la lèvre inférieure lors du sourire.
- 5-Analyse de l'alignement des collets en harmonie avec la courbe esthétique et le cadre labial durant le sourire, le rire.
- 6-Situations des bombés vestibulaires par rapport à la morphologie gingivale « profil en aile de mouette ».

La reconstruction de la face palatine du groupe incisivo-maxillaire est essentiellement guidée par la fonction : la réalisation de la fonction de guidage, elle-même dépendante des déterminants postérieurs que sont la pente condylienne, la courbe de Spee, l'inclinaison du plan d'occlusion. Elle sera donc abordée dans une prochaine partie.

Le positionnement du bloc antérieur mandibulaire étant acquis à ce stade peut aussi constituer un repère, outre le cadre labial pour positionner le bord libre des incisives centrales. En occlusion,

selon J.D.Orthlieb(46), de nombreuses études sur de larges échantillons confirment une valeur de recouvrement moyen de 3 à 4 mm et un surplomb moyen de 3mm.

L'alignement des lignes inter incisives mandibulaire et maxillaire, avec l'axe sagittal médian de la face est réalisé dans 70% des cas.(84). Il constitue donc un repère à condition que les structures dento-squelettiques existantes ne présentent pas d'anomalie de symétries.

### II.5.2-DSD.(11,85–96)

Le DSD est utilisé pour visualiser les traitements restaurateurs esthétiques planifiés chez un patient, et ainsi pouvoir lui présenter le résultat attendu avant de commencer quelque traitement.

Différents systèmes sont disponibles comme décrit précédemment ; des logiciels ou des applications (DSD app par Christian Coachman). Le défi actuel sur les systèmes disponibles est d'extrapoler la planification en 2D (photographies) à une planification 3D (scanner facial). En effet malgré la possibilité d'acquérir des données 3D en particulier via les empreintes optiques, l'intégration de ces données 3D avec des images photographiques limite la visualisation à une seule image, ce qui réduit considérablement la visualisation du projet prothétique en situation sur le patient.

Marta Revilla-León et coll. présentent dans un article de 2019 dans le J.of Prosthetic Dentistry (97) une illustration d'un flux numérique DSD utilisant la photographie 2D, les empreintes numériques et l'impression 3D :

**Première étape**: des photos extra orales du tiers inférieur du visage ont été réalisées ainsi qu'un scanner intra buccal des arcades en suivant le protocole de scannage du constructeur (Trios 3shape)

Rq: Habituellement le protocole DSD réalise des photographies de l'ensemble de la face pour positionner les lignes de références facial pour en tenir compte dans la reconstruction. Ici les auteurs ont considéré les repères dentaires suffisant (horizontalité des bords incisifs et alignement sagittal du dentalé déjà en place)



Figure 42 : A position labiale au repos. B : sourire C : vue intrabuccale prétraitement.

**Deuxième étape**: Un Wax up numérique est préparé à partir d'un logiciel de CAO ( Dental System ; 3 Shape) à partir des empreintes optiques chargées dans le logiciel. L'outil diagnostic de ce logiciel



Figure 43 A:Réalisation du wax up virtuel B : L'outil permettant de mesurer l'allongement coronaire de 21 sur le wax up.

permet de mesurer précisément une fois étalonné, les corrections à effectuer sur la couronne dentaire et les éventuelles gingivectomies.

Un autre logiciel permet de surimposer le wax up numérique sur les photographies du patient (RealView Dental System, 3shape).



Figure 44 Visualisation 2D du projet esthétique virtuel A :position de repos B : Lors du sourire

**Troisième étape**: Une gouttière en silicone repositionnable sur la dentition existante est alors conçue dans le logiciel de CAO (Dental System, 3 shape) et imprimée par impression 3D (DLP: Direct Light Procedure; Rapidshape Printer). Les limites marginales de la gouttière sont arrêtées sur les nouvelles limites gingivales prévues par la planification; ainsi les restaurations provisoires réalisées en bouche constitueront un guide pour réaliser les gingivectomies.

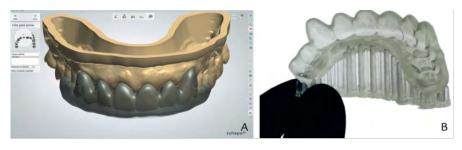


Figure 45 : A : réalisation de la gouttière dans le logiciel de CAO B : Gouttière imprimée

Les prothèses provisoires sont réalisées en résine provisoire (Protemp 4 A2 ; 3M ESPE) L'esthétique et la fonction (phonétique) sont alors testées.



Figure 46 A : réalisation du mock up à l'aide de la gouttière imprimée B : visualisation des provisoires, position de repos C : sourire.

Les prothèses provisoires sont portées pendant 9 mois, le temps de la cicatrisation, après réalisation des chirurgies (gingivectomie plus élongation coronaire).

**Quatrième étape** : Les préparations des dents pour les prothèses définitives sont réalisées à travers le mock up. Auparavant un scanner intra buccal du maxillaire, provisoire en place, de la mandibule et aussi de l'occlusion en OIM est réalisé. Cela permettra d'établir la position thérapeutique intermaxillaire provisoire en place.

Les préparations sont réalisées et le composite ayant servi pour les provisoires, complètement déposé à l'aide de fraises et disques de polissage.

L'empreinte optique des préparations est alors réalisée, et envoyée au labo sous forme de fichier STL, en même temps que l'empreinte optique du maxillaire, avec les provisoires en place, qui servira de référence pour la réalisation des prothèses définitives par usinage de lingo de céramique (disilicate de lithium; IPS e.max CAD LT-A2 lingots; Ivoclar Vivadent AG).

Ce cas illustre un flux numérique directement réalisé au fauteuil jusqu'au provisoire avec une intervention du laboratoire de prothèse pour la conception et la réalisation des prothèses définitives par usinage. Une autre possibilité est de déporter ce flux numérique au laboratoire de prothèse si le praticien ne dispose pas des outils numériques au cabinet.

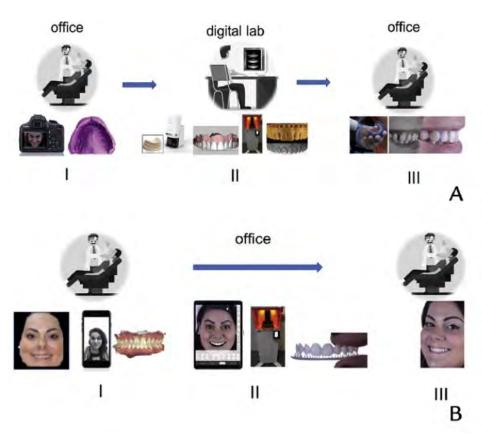


Figure 47 :

<u>A Flux numérique déporté au laboratoire de prothèse</u> I : photographie numérique et empreinte II : Scannage des empreintes (ou modèles) ; Projet virtuel via logiciels de CAO, wax up virtuel ; Impression de la gouttière correspondante pour réalisation du Mock Up III : Réalisation du Mock up

B Flux numérique entièrement réalisé au fauteuil I : Photographie et empreinte optique II- DSD 2D ; wax up virtuel par CAO, gouttière par impression. III : Réalisation du Mock up

A l'heure actuelle, des applications utilisant uniquement des données 3D permettent de réaliser un DSD en 3D, les photographies étant remplacées par un scanner facial et de pouvoir visualiser le résultat attendu sous plusieurs angles de vue.

C.Coachman présente cette année dans un article (86) une nouvelle application (DSD app 3D) permettant de réaliser au fauteuil une simulation 3D du plan de traitement virtuel, d'éditer un wax up virtuel et de réaliser l'impression 3D des prothèses provisoires pour simuler le projet dans la cavité buccal du patient pour un essai immédiat ; tout cela au fauteuil dans la même séance.

Dans J. of Prothestric dentistry en 2019(98), Hongqiang Ye, PhD, Kuan-Paul Wang, Yushu Liu, Yunsong Liu et Yongsheng Zhou présentent une technique pour évaluer de façon virtuelle la dynamique du sourire. Ils appellent cela « la planification esthétique 4D », qui intègre la dimension du temps et les différents mouvements faciaux du patient dans la prédiction du résultat esthétique. Cette technique consiste à faire plusieurs scanner faciaux avec différentes phases du sourire et ensuite fusionner sur ces différents fichiers les modèles numériques des arcades. Une fois le wax up numérique réalisé dans un logiciel de CAO, il est à son tour superposé à l'arcade maxillaire sur les différentes vues faciales 3D. Ensuite les auteurs utilisent un logiciel d'édition de vidéo pour réaliser une vidéo à partir de toutes les images faciales et obtiennent une vison virtuelle dynamique du sourire ainsi réhabilité.

Cette méthode demande, pour réaliser les superpositions, l'apprentissage de logiciels non intégrés aux logiciels de CAO. Elle est un peu longue à mettre en place pour pouvoir être utilisée en l'état au cabinet dentaire.

### II.5.3-Chirurgie muco gingivale Planifiée: masques de correction par impression 3D(99,100)

La réhabilitation esthétique du sourire, nécessite bien souvent de réaliser des gingivectomies afin de rétablir une harmonie dento gingivale. Pour rétablir un espace biologique adéquat (1mm, d'attache épithéliale, 2mm d'attache conjonctive), le niveau osseux doit se situer à 3mm en dessous des nouvelles limites gingivales et l'os alvéolaire doit être remodelé en fonction.

Les outils numériques à notre disposition permettent de planifier cette chirurgie, en fonction des objectifs prothétiques définis par un wax up numérique issu d'un DSD.

Une méthode décrite par Leandro Passos, Fernando Peixoto Soares, Isabela Goulart Gil Choi, et Arthur Rodriguez Gonzalez Cortes (Prosthet Dent 2019) (100) consiste à réaliser les empreintes optiques, sur lesquelles sera effectué un wax up numérique des futures prothèses attendues, ce conformément à l'analyse esthétique réalisée en amont. L'acquisition d'un CBCT permet de repérer précisément le niveau de la crête osseuse. Ensuite, les auteurs convertissent le fichier DICOM en un fichier STL.

En utilisant un logiciel libre les auteurs réalisent la superposition de ces différents fichiers STL (Meshmixer, fonction Best fit).

Sur le même fichier apparaît le niveau osseux et la nouvelle limite gingivale désirée. Le guide chirurgical est dessiné numériquement. L'élément principal du guide sera un bandeau buccal (correspondant à la largeur de l'espace biologique), plaqué sur la gencive, dont la limite inférieure correspond au niveau de la gencive marginal désiré, et la limite supérieure représentera le niveau osseux correspondant. Le chirurgien pourra visualiser la limite des tissus mous et des tissus durs sur le même guide. L'incision primaire sera guidée par la face inférieure pour réaliser la gingivectomie planifiée Après dépose du guide, réalisation d'un lambeau de plaine épaisseur et repositionnement du guide, le niveau supérieur guidera l'alvéoloplastie nécessaire à la préservation de l'espace biologique.



Figure 49 design du guide chirurgical pour élongation coronaire.

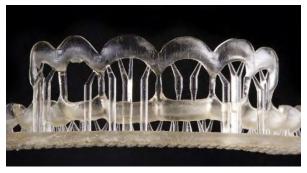


Figure 48 Impression 3D du guide chirurgical

D'autres auteurs, Xiaoqiang Liu, Jingting Yu, Jianfeng Zhou, et Jianguo Tan, (99) décrivent une méthode utilisant deux guides : un servant à la gingivectomie, un autre à l'alvéoloplastie. Ils utilisent le wax up de diagnostic pour définir le niveau de la gencive marginale mais ne réalisent pas de CBCT; Le premier guide est positionné, et la gingivectomie est réalisée en incisant suivant la limite supérieure du guide. Ils lèvent ensuite un lambeau de pleine épaisseur pour découvrir l'os crestal. Le deuxième guide est réalisé à l'aide du premier guide en déplaçant la limite supérieur de 3mm, la largeur moyenne de l'espace biologique, de façon à réaliser l'alvéoloplastie en suivant cette nouvelle limite.



Figure 50 Guide pour la gingivectomie



Figure 51 Guide pour l'avéoloplastie



Figure 52 A : incision suivant le guide de gingivectomie B : lambeau de pleine épaisseur C : Osteoplastie en suivant le guide d'alvéoloplastie C : Remise en place du lambeau et sutures

## II.5.4-Apport combiné des techniques numériques CFAO et CBCT pour le maintien du profil d'émergence.(101)

Dans cet article R. NOHARET, E. VAN DOOREN, P. BUISSON exposent une méthode pour conserver le profil d'émergence de la dent naturelle dans le cas d'une extraction implantation immédiate ; Ils présentent le cas d'un patient chez lequel l'incisive centrale gauche est fracturée à la suite d'un traumatisme et doit être extraite.

Le protocole consiste à réaliser un CBCT, du patient avant l'extraction. Un modèle numérique au format STL des tissus intra buccaux a été aussi réalisé (ici par scannage d'un modèle en plâtre obtenu grâce à une empreinte conventionnelle).

A partir du fichier CBCT, un modèle 3D au format STL de la dent à extraire a été obtenu (grâce à un module spécifique du logiciel Simplant Dentsply). Pour ce cas clinique un bloc de résine multistratum A1-A2 (Zirkonzahn) est choisi pour l'usinage de la dent provisoire à partir du fichier STL extrait du CBCT. La dent provisoire est un véritable duplicata, au niveau de la forme, de la dent naturelle.

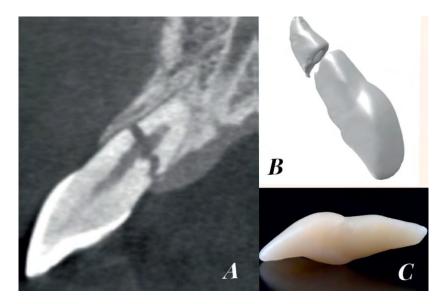


Figure 53 A : fichier DICOM issu du CBCT ; B : Modèle numérique 3D de la dent à extraire au format STL C : Impression 3D de l'incisive centrale.

A partir du fichier STL de l'empreinte numérique, un modèle est imprimé en résine PMMA (après une éventuelle correction de la position de la dent qui a subi le traumatisme). La dent usinée est alors placée dans un moulage de duplication du modèle imprimé avant de couler la fausse gencive et le plâtre. Les auteurs obtiennent un modèle avec le profil d'émergence correspondant à la dent naturelle.



Figure 54 A : Moulage de duplication dans lequel la dent usinée a été replacée ; B,C : Modèle en plâtre avec le profil d'émergence (fausse gencive).

Les auteurs réalisent alors la phase chirurgicale d'extraction, d'implantation immédiate guidée (planification préalable, guide chirurgical édité par impréssion3D).

Après la chirurgie une clé de repositionnement du transfert vissé sur l'implant est réalisée avec un silicone servant à enregistrer l'occlusion (luxabite©). Cette clé s'appuie sur les dents collatérales et permet de repositionner l'implant sur le modèle réalisé préalablement. La dent usinée est alors évidée, adaptée sur le modèle par fraisage puis collée sur une base titane afin de réaliser la couronne provisoire vissée sur implant.

Passé le délai de l'osteointégration, le modèle ayant permis la réalisation de la provisoire est scanné. Il n'est pas nécessaire de réaliser une empreinte en démontant la provisoire, évitant ainsi un traumatisme des tissu mous péri implantaires, en simplifiant le traitement (une séance en moins).

### II.5.5- La prise de teinte (Protocole elab Sasha Hein)(102).

La prise de teinte est une action fondamentale pour le futur rendu de la prothèse, pour son intégration naturelle. Cette étape représente une tâche difficile. Faire correspondre un teintier formé de dents artificielles avec les dents naturelles au sein du milieu buccal représente un défi énorme et finalement assez peu reproductible et imprécis. Comment les outils numériques permettent actuellement de remplacer les teintiers et d'inscrire la prise de teinte dans une chaîne numérique complète ?

C'est l'objectif affiché du protocole e-lab élaboré par Sasha Hein utilisant une méthode numérique photocolorimétrique (Digital Photocolorimétric Méthod ou DPC). Il nous donne des outils précis pour quantifier la prise de teinte, et permet de guider pas à pas le prothésiste pour une reproduction colorimétrique précise de la dent naturelle.

La photographie numérique représente un outil extraordinaire. Chaque pixel est décomposé en trois composantes Rouge Vert et Bleu et permet rigoureusement d'analyser la couleur de la dent. Mais le rendu de la couleur sur la photo numérique dépend de différents paramètres :

- -L'éclairage incident (Flash, mesure TTL activée ou non, puissance du Flash, lumière naturelle..),
- -Le type d'appareil photographique
- Le réglage de la balance des couleurs (chaque capteur CCD remplaçant la pellicule, n'a en effet pas la même sensibilité dans tous les domaines du spectre du visible)
- -Réglage du rendu de la luminosité.

Enfin une fois que tous ces objectifs de « calibration » sont atteint, comment donner une méthodologie au prothésiste pour qu'il puisse de façon précise et reproductible atteindre l'objectif de mimétisme de la céramique par rapport à la dent naturelle, fixé et déterminé comme acceptable ?

### II.5.5.1-Standardisation de la prise de vue

### -Distance fixée en fonction de la focale et de la taille du capteur

Taille du capteur	Longueur focale	Distance de l'objet au plan focal de l'appareil
Plein format(FX)	60mm	24cm
Plein format(FX)	105mm	37cm
APS-C(DX)	60mm	28cm
APS-C(DX)	105mm	45cm

-Eliminer les réflexions à la surface de l'émail dentaire afin d'obtenir une teinte de surface reliée à l'interaction de la lumière dans les couches profondes de la dent non parasitée par les réflexions de surface. La teinte ainsi mesurée nous renseignera sur la structure anatomique de la couche amélodentinaire.

La lumière réfléchie à la surface de la dent est polarisée (lois de Snells Descartes et angle de Brewster). Elle peut être éliminée en utilisant un filtre polarisant montée sur l'objectif de l'appareil reflex et dont la direction de polarisation est perpendiculaire à la direction de polarisation de la réflexion

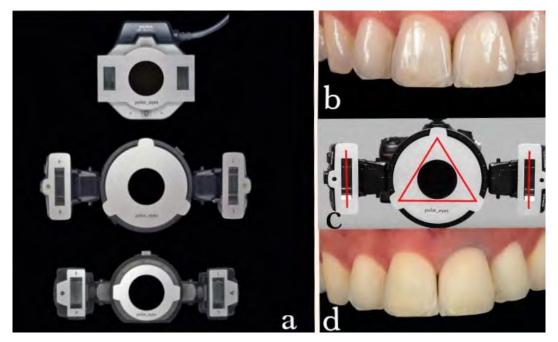
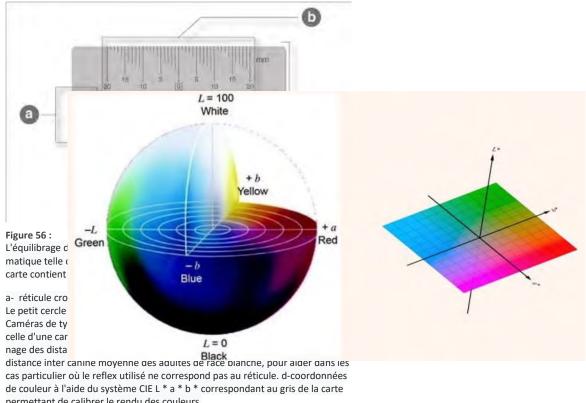


Figure 55 a La composition d'un dispositif PCM se compose d'un Reflex numérique, d'un objectif et d'un flash macro, d'un dispositif de polarisation croisée adapté à l'appareil. b- Photo au flash sans polarisation croisée c- Dispositif de polarisation croisée : de part et d'autre sur les flash déportés un filtre polarisant la lumière dans une direction (marquée par un trait rouge). Sur l'objectif un filtre polarisant dont la direction de polarisation est croisée avec les précédents. d-Photo avec polarisation croisée : la structure des couches amélo dentinaire est beaucoup plus visible.

lumineuse à la surface de l'émail. C'est le dispositif vendu sur le site émulation élaboré par S.Hein et son équipe.

- -Standardiser l'éclairage incident : désactiver la mesure TTL, régler la puissance du flash au maximum (1/1 en mode manuel). Définir une ouverture ainsi qu'une vitesse d'obturation standard (vitesse 1/125 s et ouverture à f 22). Définir la sensibilité du capteur numérique à 100 iso. Les réglages d'ouverture, de vitesse et de sensibilité iso ont été choisi pour minimiser l'influence de l'éclairage ambiant représentant un bruit par rapport à la constance de la lumière émise par le flash.
- -Caractérisation de la sensibilité spectrale de chaque caméra. La sensibilité spectrale des capteurs de 58 appareils photos reflex numériques a été caractérisé et le programme elab permet de choisir parmi ces 58 profils d'appareil photo.

-Calibration de la couleur. Réalisation de la balance (ou équilibrage) des blancs à l'aide d'une charte de gris (White-balance Emulation). Pour permettre un rendu fidèle des couleurs, on étalonne l'appareil photo en utilisant une « référence ». Pour cela, il faut placer un objet neutre, gris de luminosité connue, sous la lumière qui sera utilisée pour prendre la photo.



permettant de calibrer le rendu des couleurs.

### II.5.5.2- Analyse et quantification de la teinte.

Le protocole d'analyse et de quantification de la teinte de surface de la dent développé par S.Hein s'appuie sur l'espace chromatique L\*a\*b CIE 1976 pour caractériser les couleurs.(103)

L'espace chromatique L\*a\*b\* CIE 1976, généralement nommé CIELAB, est un espace de couleur particulièrement utilisé pour la caractérisation des couleurs de surface. Trois grandeurs caractérisent les couleurs : la clarté L\* dérive de la luminance de la surface ; les deux paramètres  $a^*$  et  $b^*$  expriment l'écart de la couleur par rapport à celle d'une surface grise de même clarté.

Figure 57 : Les paramètres du système L\*a\*b\* sont :

- la clarté L\* qui prend des valeurs entre 0 (noir) à 100 (blanc de référence) ;
- le paramètre  $a^*$  représente la valeur sur un axe vert  $\rightarrow$  rouge ;
- le paramètre  $b^*$  représente la valeur sur un axe bleu  $\rightarrow$  jaune.

L'application **e-lab prime** permet d'analyser la couleur d'une dent naturelle bordant la restauration et de quantifier précisément la méthode que le prothésiste doit employer afin de recréer cette teinte (épaisseur de dentine, type de colorants .. ). De plus, ce logiciel permet très facilement d'effectuer des essais numérisés en cours de travail afin de corriger progressivement les écarts de teinte constaté et quantifiés. La procédure de standardisation du cliché vue précédemment se fait de façon automatisée sur un serveur dédié au programme elab-prime et en connexion constante. Il faudra suivre rigoureusement les principes exposés précédemment, et les respecter à la prise de vue afin d'obtenir une photo conforme pouvant être traitée par le logiciel. Seule la balance des blancs et la balance de luminosité seront automatisées sur le serveur (auparavant effectuées de façon manuelle à l'aide du logiciel Adobe lightroom)

Voici un exposé en image des étapes permettant de reproduire de façon précise et reproductible la teinte d'une incisive centrale maxillaire (104,105)

On importe la photo intrabuccale au format RAW du futur pilier devant recevoir la couronne et la dent contiguë. La calibration des couleurs, de luminosité et l'étalonnage des longueurs (ce qui permettra d'effectuer des mesures directement) se fera de façon automatisée sur le serveur connecté au programme. Si il y a un standard non respecté à la prise de vue ( TTL activé, pas de polarisation croisée, distance non respectée...) alors un sigle apparaîtra dans le coin

gauche de l'écran, sinon le sigle elab confirmera que la photo est conforme.

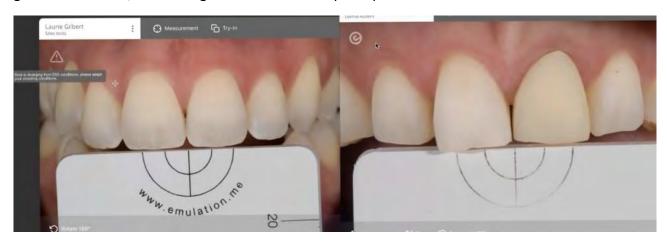


Figure 58 calibration automatique et validation du cliché à la prise de vue. Conforme à gauche et non conforme à droite. Le logiciel ne garantira pas un résultat précis avec la photo de droite.

Ensuite on sélectionne la dent naturelle à analyser ainsi que le pilier de la future prothèse et on effectue une mesure de couleur. Le logiciel indique alors la teinte principale pour le pilier (a) et la teinte principale de la dent naturelle dans deux zones : une zone cervicale(b) correspondant aux deux tiers de la dent et une zone incisale(c)

Il calcule en fonction du choix du type de céramique (d), de l'épaisseur de dentine choisie en fonction de l'espace disponible (e,f), et indique le mélange de poudre à effectuer pour recréer la teinte sur la dent prothétique dans la zone cervicale (g) et dans la zone incisale (h).

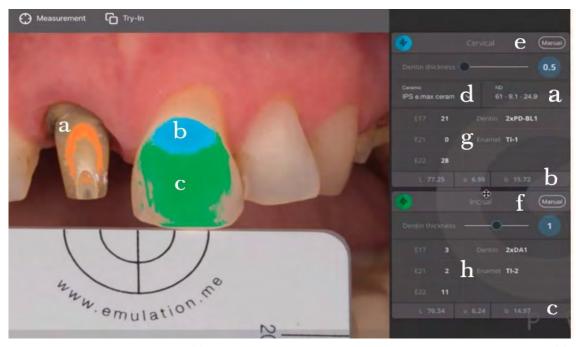


Figure 59 : teinte principale pour le pilier (a) et la teinte principale de la dent naturelle dans deux zones : une zone cervicale(b) correspondant au deux tiers de la dent et une zone incisale(c) type de céramique (d), de l'épaisseur de dentine choisie en fonction de l'espace disponible (e,f) , mélange de poudre à effectuer pour recréer la teinte sur la dent prothétique dans la zone cervicale (g) et dans la zone incisale (h).

Ensuite au cours de l'élaboration de la céramique, le prothésiste peut effectuer un essai pour comparer la teinte de la céramique à la teinte de la prothèse : fonction « Try in »

-le prothésiste prend en photo la céramique sur le modèle, prend une photo correspondant au standard de prise de vue, et la charge dans le logiciel et elle est automatiquement calibrée. En utilisant la fonction « Try in » la céramique est isolée du modèle et replacée directement sur la photo à la place du pilier. Des outils permettent d'ajuster la taille et l'orientation de la prothèse, et d'améliorer son contour gingivo cervical.

Ensuite l'outil mesure permet d'évaluer l'écart de couleur entre la dent naturelle et la prothèse dans les deux zones cervicale et incisale selon les formules suivantes :

Ecart entre deux couleurs 1 et 2:

$$\Delta E_{12} = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$
$$\Delta L = L_2 - L_1$$

$$\Delta a = a_2 - a_1$$

$$\Delta b = b_2 - b_1$$

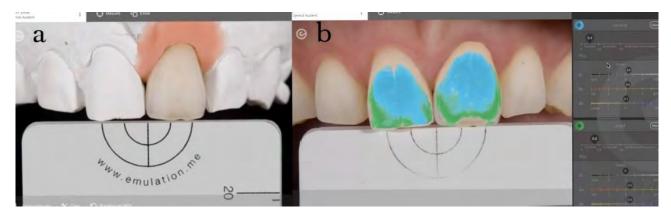


Figure 60 (a) Photo standardisée sur modèle de la prothèse.(b) essais numériques de la prothèse, mesure des écarts de couleurs  $\Delta E$ ,  $\Delta L$ ,  $\Delta A$ ,  $\Delta D$ 



Figure 61 Mesure de l'écart de couleurs dans la zone cervicale.

 $\Delta E$  mesure l'adéquation entre la teinte de la céramique et la dent naturelle et représente l'écart type entre les deux teintes intégrant chaque coordonnée de la teinte dans le système L\*a\*b CIE 1976 ; Ainsi pour corriger la teinte, le prothésiste peut voir en fonction du  $\Delta a$ ,  $\Delta b$ ,  $\Delta L$  le type de poudre qu'il faut ajouter : plus sombre ou plus claire, plus de rouge, plus de vert, de bleu de jaune...

### II.6-Octa 6 Courbe de spee et plan d'occlusion

### II.6.1-Interprétation biomécanique de la courbe de Spee. Méthode de construction.

En 1952 Page a comparé l'organisation sagittale des arcades dentaires à celle de ciseaux et de sécateurs.

Si nous essayons de couper une tige de rosier à l'aide de ciseaux, la tige ne sera pas stabilisée entre les deux lames et aura tendance à rouler sur l'avant : la force appliqué sur la tige comporte une

composante tangentielle qui la propulse vers l'avant ; alors que la composante orthogonale qui permettrai de sectionner la tige est réduite. La solution consiste à courber les lames comme c'est le cas avec un Sécateur. Les forces exercées sur la tige sont majoritairement orthogonales ; la capacité de coupe est augmentée (plus de force utile) et la tige stabilisée sur la lame.

La courbe de Spee apparait, selon le point de vu de Page, comme une réponse biomécanique pour optimiser l'efficacité masticatoire et stabiliser les positions dentaires sur l'arcade.

### C'est la loi de la tangente de Page :

Lors de la mastication ou de la déglutition, la mandibule se ferme sous l'effet des muscles masticateurs et les dents de par leur face occlusale subissent des forces. Elles ont tendance à s'orienter de façon à axialiser ces pressions ce qui leur donnent une meilleure résistance biomécanique et une plus grande stabilité intra arcades, ainsi qu'une plus grande efficacité masticatoire.

L'axe de ces forces dépend du mouvement de la mandibule, en particulier le mouvement de rotation terminale (phase finale du mouvement de fermeture) qui sera conditionné par la position de l'axe charnière par rapport aux arcades dentaire et donc la forme de la mandibule (hauteur du Ramus, angle goniaque, longueur de la mandibule).

Cependant Orthlieb note un écart angulaire entre l'axe des dents prévu par la loi de la tangente et l'axe réel. Cette différence permettrait de créer une composante mésiale de la force. Son rôle serait de conserver les contacts proximaux malgré l'usure dentaire.

La courbe de Spee est aussi appelée courbe de compensation. L'abaissement du condyle lors de la mastication le long du tubercule articulaire, éloigne les molaires antagonistes plus que les prémolaires et seule une organisation curviligne des arcades permettrait de compenser cette différence et préserver un affrontement simultané des molaires et prémolaires.

Orthlieb utilise une méthode statistique afin de guider la construction de la courbe de Spee utilisant des repères céphalométriques. Dans un système de coordonnées ayant pour origine le centre condylien Co et le plan axio orbitaire, il effectue la mesure de xDe, l'abscisse du dentalé (caractérisant la taille de la branche horizontale de la mandibule) et la coordonnée verticale zXi du point Xi de Ricketts (caractérisant la hauteur du Ramus). Un tableau à double entrée donne alors la valeur du rayon de la courbe de Spee assimilée à un cercle.

Le logiciel Modjaw détermine une courbe d'enveloppe occlusale en automatisant la construction du drapeau

## II.6.2- Prise en compte de la cinématique mandibulaire pour la détermination des courbes occlusales

De plus, en intégrant les données cinématiques ; position et vitesses, on accès en temps réels aux distances interocclusales ainsi qu'à la direction des actions (tangente à la trajectoire au point de contact en première approximation). Ces données permettraient de personnaliser complètement la courbe de Spee en s'appuyant sur deux critères :

- axialiser les pressions subies par les dents mandibulaires
- Maintenir un affrontement simultané des molaires et prémolaires lors des mouvements de mastication.

## II.6.3- Calotte occlusale générée numériquement

La plupart des logiciels de CAO génère un guide sous forme de calotte permettant de guider l'orientation et la conception des faces occlusales. Elles sont fondées sur une automatisation de la technique du drapeau(106,107)

La technique du drapeau se base sur le fait que le « plan d'occlusion » est une portion d'un cercle dont le centre est situé au niveau de l'apophyse Cristagalli. Ce centre est reporté sur un drapeau (recouvert de papier millimétré) placé au niveau de la branche supérieure de l'articulateur (plan sagittal ou sur le même plan vertical que l'hémi-arcade à réhabiliter) La détermination du rayon de courbure de la sphère, peut se faire selon une formule mathématique issue d'une analyse céphalométrique comme le préconise J.D. Orthlieb (approche personnalisée adaptée au patient). Plus simplement, en mesurant la distance qui sépare le dentalé (milieu inter-incisif inférieur) du centre du condyle selon la technique de Wadsworth. Une fois les branches du compas écartées à cette distance, le praticien trace au niveau du drapeau deux arcs de cercle : un premier arc avec la pointe du compas placé au niveau du condyle et un deuxième arc avec la pointe du compas positionnée soit au niveau du sommet de la canine (ou à proximité de l'angle distal si celle-ci est abrasée), soit au niveau du dentalé. Enfin la pointe de ce même compas est positionnée à l'intersection des deux arcs pour tracer la portion de cercle matérialisant la courbe de Spee et tracer la courbe d'occlusion idéale sur le modèle mandibulaire

## II.6.4 Reconstitution provisoire pour essayage clinique. Technique de la résine injectée (108–111)

La technique de la résine injectée est un procédé permettant de reproduire en bouche des wax up par une technique directe (au fauteuil) ou indirecte (intervention d'un laboratoire)

Lors d'une réhabilitation complexe, la transposition du projet prothétique planifié passe par une phase de prothèses provisoires. Le procédé des résines injectables est la solution idéale, à la fois rapide et précis, pour fabriquer ces provisoires et tester le nouveau schéma occlusal (courbe occlusales, guidage, nouvelle DVO....) défini lors de la planification. De plus le procédé de collage sans préparation rend la technique complètement réversible et non invasive.

La procédure peut être réalisée dans la cavité orale, sans anesthésie. Un matériau à empreinte transparent en polysiloxane de vinyle est utilisé pour reproduire le wax-up. La matrice transparente peut être placée en bouche, sur les dents non préparées, et utilisée comme moyen de transfert, permettant l'injection et la polymérisation de la résine composite fluide.

La matrice transparente peut être conçue dans le cadre d'un work flow numérique complet : Wax up numérique ; conception de la matrice par un logiciel de CAO, impression 3D de la matrice en résine transparente.

Les résines injectables sont des résines fluides chargées ce qui leur confère une très grande résistance mécanique, supérieure ou égale à la plupart des composites de restauration présents sur le marché(111)

### Protocole:(109)

- Réalisation dent par dent
- Isolation de la dent adjacente à l'aide d'une feuille de téflon glissée au niveau des points de contact
- Pour les dents postérieures l'embrasure est bouchée par du téflon packé en palatin ou linguale et vestibulaire
- Pour les zones à proximité gingivale, application d'un téflon roulé comme cordonnet rétracteur
- Dépose des anciennes restaurations
- Procédure adhésive (mordançage à l'acide orthophosphorique, adhésif universel)
- Insertion de la gouttière ou matrice
- Injection du composite injectable
- Photopolymérisation longue à travers la gouttière
- Retrait des excès (curette, fraise, strips, bistouri)
- Réglages occlusaux et polissage

Pour la réalisation de provisoires afin de faire un essayage clinique de ce qui a été planifié (augmentation de DVO, modification du guide antérieur, des courbes occlusales..) on peut réaliser cette technique sans préparation préalable des dents ni dépose des vieilles restaurations.

### II.7-Octa 7 Pentes de guidage et Octa 8 courbes de Wilson et concept de guidage

Le rôle du guidage antérieur est de provoquer un désengrènement postérieur des dents cuspidées en propulsion et d'éviter les interférences en propulsion et diduction. Le guidage permet d'atteindre l'OIM au cours des mouvements fonctionnels (déglutition, mastication) sans interférences.

La conception du guidage lorsque celui-ci est défectueux requière une réflexion globale s'appuyant sur :

### Différents déterminants occlusaux et leurs interdépendance : quadrilatère de vienne

Déterminant postérieur : pente condylienne

Déterminant intermédiaire : plan d'occlusion

Déterminant antérieur : pente de guidage (pente incisive et canine)

### Différentes zones et surfaces de guidages idéales

En propulsion : sur les crêtes mésiales des incisives maxillaires et un petit trajet sur la crête distale des canines maxillaires.

En diduction : pan mésial de la canine maxillaire

En anti-rétroposition (GAR) : pan mésial de la cuspide palatine de la première prémolaire maxillaire.

### Le concept de guidage :

Fonction groupe postérieure, fonction groupe antérieure, fonction unilatérale équilibrée ou fonction canine (cette dernière est à privilégier si les canines sont capables de supporter la contrainte)

Les outils numériques comme MODJAW, SICAT permettent d'enregistrer les mouvements mandibulaires et ainsi d'analyser de façon précise les surfaces de guidages. De plus, ceci peut être réalisé pour n'importe quel mouvement exécuté par le patient (en particulier la mastication) et non plus uniquement lors de mouvements excentrés.

Classiquement, le couple praticien/prothésiste après avoir défini sur articulateur à l'aide de wax up les différentes pentes de guidages, transférait en bouche le projet prothétique à l'aide de provisoires. Après des ajustements cliniques, et un essayage par le patient sur plusieurs semaines, le projet ainsi validé pouvait à nouveau être transféré au laboratoire de prothèse à l'aide d'une table incisive personnalisée enregistré dans de la résine (Duralay©) et guidant le prothésiste lors de la

correction des cires avant réalisation des prothèses définitives. Cela suppose aussi d'avoir réalisé un double jeu de cire d'occlusions de façon à pouvoir réaliser un montage croisé.

Avec les outils d'enregistrement des mouvements mandibulaires du patient, la conception du wax up virtuel intègre les mouvements exacts de la mandibule, réduisant les ajustements en bouche (inévitables car même si les mouvements enregistrés le sont avec une grande précision, la dépréssibilité desmodontale n'est pas prise en compte)

Le transfert du projet sur le patient via des provisoires est obligatoire pour tester la prothèse en situation, sur le plan esthétique et fonctionnel, comme dans une gestion classique.

Une fois le projet prothétique testé et finalisé sur le patient, la réalisation des prothèses définitives à l'identique (en terme de formes, surfaces de guidages) peut être effectuée en réalisant un simple scanner des provisoires en place qui seront réalisées par CFAO. Il n'y a que la phase de stratification qui devra être réalisée sur modèle manuellement.

La démarche est ainsi grandement simplifiée : la table incisive personnalisée est inutile, on ne réalise pas de montage croisé avec double jeu de cires d'occlusion. Ainsi les imprécisions accompagnant ces étapes sont évitées .

La conception des courbes de Wilson est fondée sur des considérations essentiellement statistiques issues de mesures sur un grand nombre de sujets.

J.D Orthlieb propose de guider la construction de ces courbes en adoptant les règles empiriques suivantes (46):

Rayon de la Courbe de Wilson (RCW) égal au Rayon de la Courbe de Spee (RCS) au niveau des premières molaires mandibulaires. Ce rayon sera diminué de 10mm pour les secondes molaires, de 20 mm pour les troisièmes molaires et augmenté de 10mm pour les deuxièmes prémolaires.

D'un point de vue cinématique, l'intérêt des courbes de Wilson serait de générer un rapprochement harmonieux des tables occlusales des dents cuspidées, sans interférence lors des mouvements de mastications. Les outils numériques (JMT, couplé aux empreintes optiques) permettant d'analyser les espaces interdentaires lors de la mastication pourraient dans un avenir proche optimiser les orientations des tables occlusales, afin de réaliser au mieux cet objectif.

D'un point de vue statique, l'inclinaison des axes dentaires, correspondrait à une meilleure répartition et absorption des forces occlusales par les structures osseuses et aériques crâniennes. En ce sens, l'exploitation de l'imagerie numérique 3D pourrait aussi permettre d'optimiser l'orientation des axes dentaires afin de réaliser une absorption maximale des forces occlusales par les structures osseuses crâniennes.

Pour l'instant les logiciels CAO génèrent une calotte sphérique pour positionner les cuspides et orienter les tables occlusales comme décrit précédemment lors de l'étude de la courbe de Spee.

III-Exemple de planification numérique sur des cas cliniques.

# III.1- Cas clinique n°1: réhabilitions minimalement invasive d'usures généralisées

## III.1.1-Anamnèse et examen clinique.

Le patient est âgé de 50 ans. Il se présente à la consultation essentiellement pour une demande esthétique (bloc incisif maxillaire très abîmé) mais aussi pour une demande fonctionnelle concernant les hypersensibilités dentinaires qu'il commence à ressentir dans les secteurs cuspidés mandibulaires.

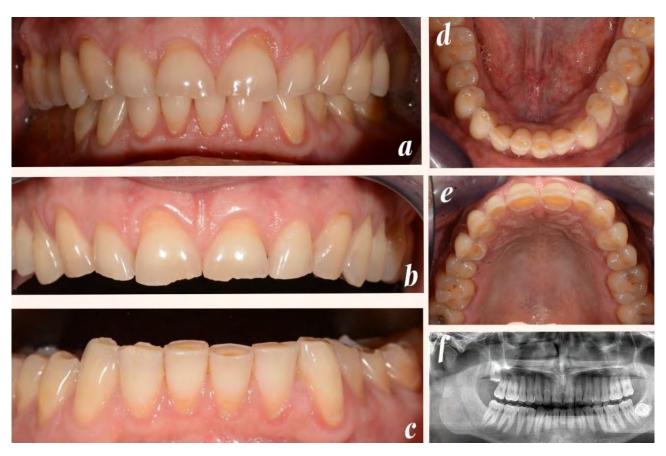


Figure 62 Etat initial a : vue intrabuccale en OIM de face b : vue du bloc antérieur maxillaire c : vue du bloc antérieur mandibulaire d : vue occlusal mandibulaire et e : maxillaire f : orthopantomogramme

L'examen révèle de nombreuses usures à type d'érosions, c'est-à-dire des usures d'origine chimique : couleur mat, usure en forme de cupule. L'anamnèse n'a pas pu révéler un facteur étiolo-

gique particulier pouvant expliquer ces nombreuses érosions. Elles se concentrent sur les faces palatines du bloc incisivo-canin maxillaire avec atteinte du versant interne des cuspides linguales des premières prémolaires et molaires en particulier la 14 (fig. 62 e) et les bords libres du bloc antérieur mandibulaire ainsi que les faces internes des cuspides vestibulaires des dents cuspidées. On note l'absence de prothèses dentaires, toutes les dents sont vivantes.

Aucune pathologie n'est observée au niveau des ATM, aucune douleur musculaire, ni articulaire; bien qu'un décalage transversal important de l'OIM par rapport à la rélation centrée soit objectivé sur le cliché (fig. 62a) représentant l'OIM de face.

L'hygiène est correcte, et le patient présente un état parodontal sain.

### III.1.2- Position mandibulaire thérapeutique.

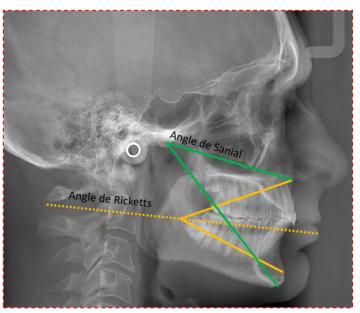


Figure 63 céphalométrie de profil

### Estimation de la DVO par céphalométrie

Angle de Ricketts : Hauteur faciale inférieur

 $ENA - Xi - Pm = 44^{\circ} + /-4,5^{\circ}$ 

L'angle de Sanial:

 $ENA - Co - Me = 40^{\circ} + / -3^{\circ}$ 

Les angles de Ricketts et de Sanial sont dans les moyennes habituelles. Il ne semble pas que le patient ait subit au cours des phénomènes d'usures une diminution de DVO (grâce à des égressions compensatrices). Pourtant il sera décidé d'augmenter la DVO de 4mm sur la tige incisive soit 2,7 mm au niveau incisif et 1,4mm au niveau molaire (règle des tiers) afin de ménager l'espace nécessaire aux matériaux prothétiques tout en étant minimalement invasif.

## III.1.3- Plan de traitement.

### Planification esthétique :

Des empreintes optiques sont réalisées au maxillaire et à la mandibule. Le patient est ensuite placé en relation centrée avec 2,7mm d'augmentation de DVO au niveau incisif. Cette position mandibulaire thérapeutique est ensuite stabilisée à l'aide d'une clé antérieur réalisée en résine Duralay© permettant de scanner les faces vestibulaires maxillaires et mandibulaires. Le praticien enregistre le rapport inter arcade dans la position mandibulaire thérapeutique.

L'analyse esthétique est menée à l'aide du DSD planning center en superposant une photo de face du patient avec les empreintes numériques. Le recalage des modèles sur la photographie s'effectue à l'aide d'un algorithme de superposition de façon semi-automatique : le praticien indique des points particuliers de reconnaissance entre les deux fichiers et l'algorithme finalise la superposition automatiquement.

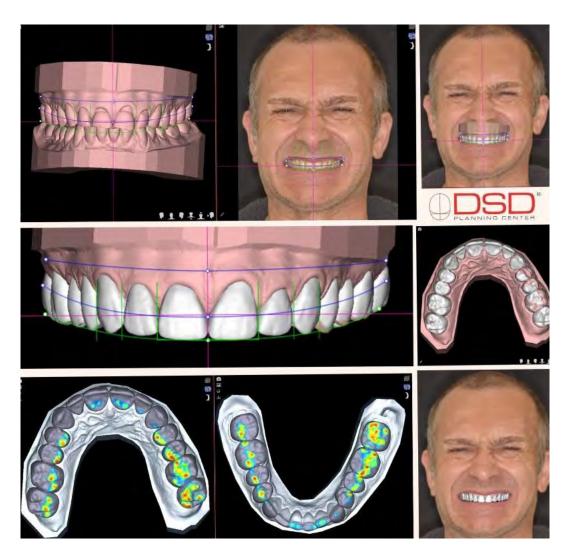


Figure 64 Planification esthétique en ligne avec DSD planning center ; en bas à gauche occlusogramme correspondant à la planification

Le wax up numérique est alors créé à partir de la planification esthétique, ce qui permet d'imprimer un modèle 3D en résine PMMA afin de réaliser une clé en silicone pour pouvoir transposer le projet prothétique en bouche (« mock-up »).

La planification parodontale avec la modification des contours gingivaux au niveau des collets des incisives maxillaires est réalisée à l'aide du même logiciel en superposant l'empreinte numérique initiale; wax up numérique du projet esthétique; le fichier CBCT.

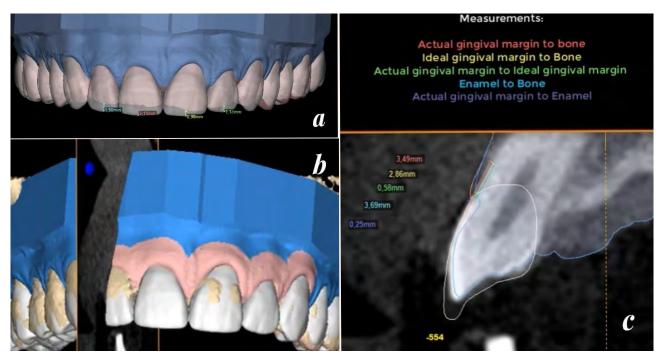


Figure 65 : a : wax up numérique (les allongements de chaque bord incisif sont notés) ; b : Superposition des trois fichiers numériques : empreinte numérique initiale ; wax up numérique ; CBCT c : Vu en coupe avec les mesures des différents niveaux de gencives (réel, planifié) par rapport à l'os.

Le logiciel permet de mesurer le soutien parodontal et d'évaluer les paramètres osseux et de gencive attachée. Ici au niveau du zénith de l'incisive latérale à droite.

Le niveau de la gencive actuelle par rapport à l'os ainsi que le niveau idéal est indiqué. Pour planifier l'élongation coronaire on doit normalement s'assurer que le niveau de gencive idéal planifiée sur le wax up est de 2.5 à 3mm de l'os, afin de respecter l'espace biologique.

Ici pour le zénith de l'incisive latérale le niveau actuel de la gencive par rapport à l'os est de 3.49 mm (en rouge). L'élongation coronaire prévue est de 0.58mm (en vert), ce qui placerai la gencive après gingivectomie pour réaliser l'élongation coronaire à 2.86 mm soit à une distance compatible avec le respect de l'espace biologique. Il ne sera donc pas nécessaire de procéder à une ostéotomie.

La gingivectomie est effectuée avec un bistouri électrique, grâce à un guide chirurgical réalisé par un logiciel de conception 3D sur le wax up numérique et fabriqué par impression 3D.



Figure 66 : planification et réalisation des élongations coronaires.

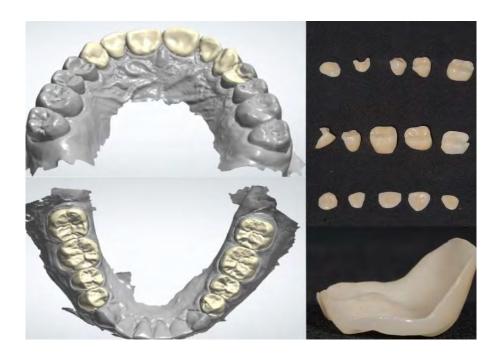


Figure 67 conception avec Exocad et réalisation par usinage des overlay mandibulaires et facettes palatines maxillaires

L'essayage clinique esthétique se fait directement en bouche par réalisation d'un mock-up à partir d'une clé en silicone remplie de résine provisoire. Les préparations sont conduites à travers le mock-up qui sert de projet prothétique, des empreintes numériques sont réalisées ainsi des rapports inter-arcades.

Le prothésiste réalise les prothèses d'usage en CAO puis en FAO, maintenant la chaine numérique.

### La réalisation du plan de traitement :

-réalisation des facettes palatines maxillaires de 13 à 24 et overlay occlusaux sur les secteurs cuspidés mandibulaires ; posés en une séance. Ils sont réalisés en e-max usinée et maquillée. -le secteur antérieur mandibulaire est réalisé par composite injecté. Le choix des facettes a été écarté pour être le moins délabrant possible ; aucune préparation ; sablage, protocole de collage M&R2.

-Réalisation des facettes céramiques e-max de 12à 22 avec le protocole de prise de teinte elab.



Figure 68 : collage en seule séance des overlays mandibulaire secteur premolo-molaire et des facettes palatines



Figure 69 : a : protocole elab ; b : préparation au travers du mock up ; c : préparation des facettes ; d : Préparations photographiées en lumière polarisée (protocole elab) ; e : Etat initial ; f : Après traitement.

Cas réalisé par le Dr Antonin Hennequin

# III.2- Cas clinique n°2 : Implantologie guidée. Pose en MCI d'un bridge complet maxillaire.

## III.2.1- Anamnèse et examen clinique.

Le patient se présente au cabinet pour une demande à la fois esthétique et fonctionnelle. Les dents du maxillaire sont en parodontolyse terminale, très mobiles et représentent une gêne importante à la mastication. Les édentements sont anciens. Un calage existe en OIM, et le guide antérieur est toujours fonctionnel malgré les édentements antérieurs. Le patient n'a pas de symptomatologie

articulaire ni musculaire, aucun signe de Désordre Temporo Mandibulaire. Le contrôle de plaque est moyen et demandera à être amélioré.



Figure 70 : Etat initial

## III.2.2- Plan de traitement.

### Planification Esthétique via le DSD (DSD smile design online) :



Figure 71 : DSD

Les nouvelles proportions et formes dentaires quantifiées par le DSD, permettront au prothésiste de réaliser un wax up numérique, puis la prothèse provisoire conformément à l'étude esthétique.



Figure 72 Photographie initiale du patient à gauche et projet virtuel à

Cette planification a été réalisé en janvier 2018. Les outils ont énormément évolué en deux années. A l'heure actuelle, le praticien réalise le DSD au fauteuil de façon très rapide, avec des outils beaucoup plus conviviaux (Appli DSD) et peut présenter le résultat directement au patient, favorisant énormément la communication et l'adhésion au plan de traitement.

La position mandibulaire thérapeutique choisie est l'OIM du patient, car celle-ci est stable et toujours fonctionnelle malgré les édentements.

#### Planification implantaire avec implant studio de 3SHAPE :

Le logiciel 3 Shape permet de façon très intuitive de superposer les fichiers DICOM et STL (empreinte optique ; wax up numérique) afin de réaliser la planification implantaire

Le rapports inter arcade est conservé tel quel (OIM)

Le logiciel demande de scanner l'arcade maxillaire, mandibulaire, puis l'occlusion.

Le logiciel superpose ensuite le fichier DICOM

-le logiciel convertit le DICOM en STL

-le praticien choisit à la demande du logiciel 3 paires de points entre les fichiers STL des empreintes optiques et le fichier DICOM converti en STL. Un algorithme de superposition (type ICP ) affine ensuite la superposition de façon automatisée.

Les wax up numériques, sont réalisés par le prothésiste dans le logiciel 3 Shape et intégrés dans la planification afin de conduire la planification implantaire.

Les différents niveaux osseux, muqueux ainsi que la position cervicale du wax up numérique apparaissent sur les différentes coupes. La position du wax up intègre l'analyse esthétique et donc une position satisfaisante par rapport à la ligne du sourire. Ces différentes lignes de niveaux permettent de faire des choix sur la nécessité de fausse gencive sur la prothèse planifiée.

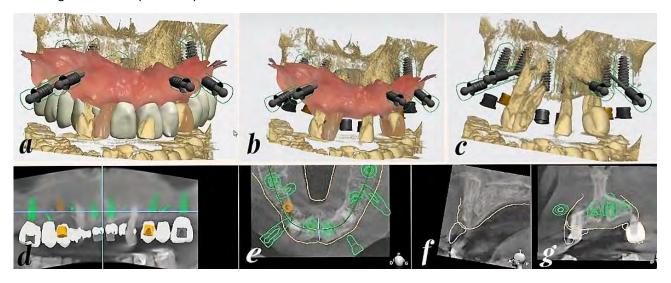


Figure 73: Planification implantaire a -superposition du wax up numérique, empreinte optique et DICOM b- Superposition empreinte optique et DICOM c- seul fichier DICOM avec mise en place des implants, douilles de forage et emplacement des puits pour vis de fixation du guide chirurgical. d- vue panoramique e- coupe horizontale f-coupe sagittale g-coupe transversale (dans chaque coupe la superposition des différents fichiers nous permet de repérer le niveau osseux, le niveau de la muqueuse, l'organe dentaire, le waxup)

Des greffes osseuses systématiques permettent de compenser les défauts osseux et modifier le biotype gingival après cicatrisation. Nous ne rentrerons pas dans le détail ici. La figure 74 b montre de façon assez spectaculaire ce qu'il est possible de réaliser.



Figure 74 vue intra buccale en post op et à 6mois avec la prothèse définitive.

### Réalisation de la chirurgie :

Le guide chirurgical, sur lequel est privilégié l'appuie dentaire, est édité (par impression 3D Formlab).



Figure 75 a : conception numérique du guide dans le logiciel implant studio de 3SHAPE b,c : guide chirurgical

Le laboratoire fabrique la prothèse provisoire en PMMA. La chirurgie consiste en la pose de six implant In-Kone® global D et la mise en charge immédiate de la provisoire en résine PMMA est alors réalisée.



Figure 76 a, b vues extra buccale postopératoires à 15 jours b- Vue intra buccale en postopératoire.

Le port de la prothèse provisoire dure 6 mois. Ce temps correspond au temps de la cicatrisation osseuse et du remodelage gingival. Le patient est revu régulièrement pour surveiller la bonne cicatrisation, mettre en place des mesures d'hygiènes progressives, effectuer d'éventuelles retouches de la prothèse provisoire : retouches occlusales mais aussi des zones contre la muqueuse pour guider la formation des papilles.

A 6 mois, de nouvelles empreintes optiques sont effectuées en vue de la réalisation du bridge définitif :

- -Celle du bridge provisoire comme référence pour la réalisation du bridge définitif full Zircone usiné (avec cut-back de 13 à 23, pour un meilleur rendu esthétique)
- -Nouvelle empreinte mandibulaire, et nouveau rapport inter arcade avec bridge provisoire en place.
- -Ensuite le bridge provisoire est déposé et coupé en deux.
- -Une moitié du bridge est remise en place, l'autre moitié non remise en place est effacée de l'empreinte optique. Une nouvelle acquisition est alors réalisée de la partie édentée pour compléter l'empreinte et acquérir la cartographie de la muqueuse, en particulier les profils d'émergences des piliers coniques. Les dents de la moitié du bridge restant sur l'arcade constituent un repère pour la caméra afin de pouvoir recaller précisément la nouvelle acquisition sur l'empreinte optique initiale.
- -On dépose ensuite l'autre moitié du bridge, on efface la partie correspondante sur l'empreinte numérique. Les piliers implantaires sur l'empreinte numérique acquise précédemment constituent des éléments fixes permettant à la caméra de se repérer. On réalise alors une nouvelle acquisition pour compléter l'empreinte. On obtient l'empreinte optique de la muqueuse maxillaire avec les profils d'émergence des piliers implantaires.

Il est à noter que l'empreinte initiale, celle du bridge provisoire n'a été que complétée à chaque étape. On efface en effet la partie de l'empreinte qui n'est plus pertinente et on complète la zone effacée par une nouvelle acquisition. La position du fichier STL dans le repère lié au logiciel est celle de l'empreinte maxillaire enregistrée au départ. Ainsi le RIA défini avec le bridge provisoire a été de fait conservé tout au long du processus.

- Une fonction du logiciel permet d'effacer les implants en conservant toute l'information sur la muqueuse. L'empreinte est ensuite complétée par une dernière empreinte avec scan bodies fixé sur chaque pilier conique, afin d'enregistrer la position précise de chaque implant sur l'empreinte. La muqueuse est très structurée autour des dents provisoires (profile d'émergence, papilles), tout comme la muqueuse au niveau du palais (papille retro



Figure 77 a-Tissus mous à 4 mois avant empreinte pour réalisation du bridge définitif b- Bridge définitif vue intrabuccale c-vue extrabuccale incisive, rides). Elle apporte des repères fixes suffisant au réalignement précis des données de l'acquisition des scan bodies sur l'empreinte préexistante de la muqueuse.

NB: Le protocole utilisé par Dr Mailhes a maintenant évolué. Au maxillaire les tissus mous, en particulier palatin permettent un recalage de l'image suffisamment précis pour une réalisation prothétique implantaire. Le bridge provisoire est déposé complètement, effacé sur l'empreinte en conservant les tissus mous vestibulaire et palatins. Puis deux nouvelles acquisitions de l'empreinte sans scan bodies et avec scan bodies sont réalisées. Les repères muqueux au maxillaire constitueront un repère fiable pour un réalignement des empreintes au sein du logiciel 3 Shape Implant Studio.



Figure 78 : De gauche à droite : photo initiale, Planification issue du DSD, sourire du patient avec le bridge définitif.

La chirurgie guidée ne représente pas une simplification de la chirurgie, au contraire elle aurait tendance à la complexifier (pose du guide, stabilité du guide, modification du sens tactile du praticien générée par le guide..) Elle représente le moyen de transposer le projet prothétique planifié et théorique en bouche. La chirurgie guidée permet de préserver le projet prothétique virtuel lors de l'étape chirurgicale.

Cas réalisé par le Dr David Mailhes

## V- Perspectives

Ce n'est que dans les années 1970 que s'est posé la question de l'introduction des technologies numériques dans l'univers de la dentisterie, alors que celle-ci était déjà présente dans l'industrie depuis les années 50. Au départ ces technologies semblaient, comme dans l'industrie, être dédiées à la reproduction de tâches répétitives afin d'en améliorer la rapidité, l'exactitude et la précision. L'exemple emblématique est l'empreinte numérique et la chaine de CFAO, conceptualisées par les travaux de François Duret.(112)

En réalité le numérique a permis de faire entrer la dentisterie dans le monde virtuel. Création d'un patient virtuel, réalisations de traitements virtuels, évaluations ou essayages de ces traitements de façon virtuelle... Le numérique a permis de virtualiser notre pratique clinique.

Dans ce processus, différents défis technologiques sont relevés : acquisitions de données précises, exactes, rapides et faciles, traitements de ces données (diagnostic, superposition de fichiers, étude esthétique, fonctionnelle, planification). Les technologies au départ très protectionnistes au sens économique fonctionnaient de façon fermée sur des systèmes propriétaires, avec des formats de fichiers non interchangeables. Maintenant ces technologies sont matures et il n'y a plus lieu de protéger jalousement son acquis technologique. Les formats de fichiers ont été normalisés et sont devenus interpolables d'un système à l'autre. La valeur ajoutée se situe ailleurs : dans le traitement de ces données.

En observant les tendances évolutives, plusieurs directions se profilent à l'horizon : (113–116)

- Amélioration du diagnostic (Big Data, intelligence artificielle)
- Amélioration de planification, création d'un patient virtuel véritable jumeau numérique.
- Assister le chirurgien-dentiste : acte clinique robotisé ou sous réalité augmentée.
- Intégration de la biologie : Bio impression, prothèses intelligentes (objets connectés)

Pour autant, les technologies ne cessent de s'améliorer répondant à des exigences de plus en plus pointues essayant de compenser les défauts ou insuffisances connues.

#### Par exemple:

- -Le problème de l'accès aux limites sous gingivales des préparations prothétiques : certains fabriquant commencent à envisager des scanners intrabuccaux qui pourraient permettre de visualiser les tissus dentaires sous gingivaux sans qu'il soit nécessaire d'écarter la gencive. (scanner IO scan de VOCO©)
- -On pourrait imaginer un porte empreinte optique qui permette d'acquérir l'empreinte numérique d'une arcade complète en une seule image évitant les différents recalages de fichiers et sources d'incertitudes (prototype iTray de Medentic présenté en 2015, non abouti commercialement).
- -Ou encore un seul appareil permettant l'acquisition du scan facial, du volume osseux, des surfaces dentaires et des mouvements mandibulaires, ce qui éviterait toute la problématique de la superposition des fichiers pour planifier et simuler un traitement sur un patient créé virtuellement.
- -De même, un hologramme en bouche créé à partir des fichiers du wax up numérique, permettrait de virtualiser le « mockup » et faire un essayage virtuel en bouche.
- Ou bien, des matériaux complètements mimétiques avec des pigments qui permettraient de façon dynamique de s'inspirer de l'environnement dentaire afin de recréer exactement la teinte permettant d'atteindre un biomimétisme parfait.
- -La bio impression qui permettrait d'imprimer des tissus biologiques pour les greffer ensuite dans la cavité buccale. (gencive, os , organe dentaire complet.. )
- -Les objets connectés ou prothèses intelligentes permettront d'obtenir des informations en continue sur le milieu buccal, savoir si la prothèse est toujours fonctionnelle ou s'il est nécessaire de la remplacer...

Les développements sont exponentiels et les exemples nombreux.

Mais cela est encore de la science-fiction même si des recherches et certaines avancées existent déjà en ces domaines dans d'autres univers que la dentisterie.

De façon ultra simplifiée, je résumerai le numérique en dentisterie comme une gestion de fichiers de données numériques. Un des objectifs du traitement de ces données est de recréer un patient virtuel, de pouvoir simuler des traitements virtuels puis de les réaliser sur le patient (avec guide clinique physique ou virtuel, statique ou dynamique).

L'approche classique pour réaliser cela est de mesurer un maximum de données anatomiques, cinématiques et dynamiques et de construire à partir de cet ensemble de données un patient virtuel au plus proche de la réalité.

La société Anatoscope(114) propose de créer des jumeaux numériques à partir d'un modèle générique sur lequel toutes les données anatomo-fonctionnelles pourront être personnalisées à partir des données numériques récoltées sur le patient. Cet avatar numérique permettra ensuite de simuler n'importe quel traitement ainsi que l'évolution d'une pathologie (usure dentaire et bruxisme par exemple) avec les données personnalisées du patient et ainsi de créer des dispositifs prothétiques sur mesure.

L'ensemble de ces données pourrait aussi permettre au praticien, lors de la réalisation de l'acte, de visionner son intervention en réalité virtuelle, au travers de lunettes sur lesquelles il pourrait voir toutes les structures anatomiques sous gingivales et intra osseuses. En même temps il pourrait bénéficier d'une visualisation de son forage superposé à la planification et ainsi être guidé en temps réel pour positionner l'implant dans la position prévue. Ce même principe, pourrait être appliqué lors de la préparation de support dentaires pour placer une prothèse ou lors d'éviction carieuse afin d'augmenter le niveau de contrôle et de précision. C'est déjà le cas dans de nombreuses chirurgie en médecine, avec le plus souvent une intervention via une interface robotique. Les progrès en science haptique représentent aussi potentiellement de nombreuses applications dans le domaine dentaire.

Un autre intérêt de cette nouvelle capacité technologique à traiter un grand nombre de données, concerne le diagnostic et l'amélioration des connaissances sur les pathologies buccales.

La relation entre les pathologies buccales et générales représente une part de plus en plus active en recherche buccodentaire. La prise en charge clinique des maladies buccales se réfère de plus en plus à une approche globale, multifactorielle, sur le modèle des pathologies parodontales ou encore des DTM (Dysfonction Temporo mandibulaire). La capacité de calcul des ordinateurs modernes, les nouveaux algorithmes appliqués au traitement de la big DATA, l'intelligence artificielle nous a permis d'atteindre des niveaux d'analyse encore jamais atteints. Ces nouveaux outils représentent une révolution potentielle, permettant d'intégrer cette approche globale, en terme d'aide au diagnostic, de suivi des pathologies (éventuellement à distance), de médecine prédictive et préventive, mais aussi d'apprentissage.

On pourrait imaginer dans cette optique une fois la dentition adulte acquise, enregistrer les données liées à chaque jeune adulte, permettant dans toute pathologie ultérieure et son éventuel traitement, de se référer à cet état initial pour personnaliser au mieux la prise en charge. Outre

l'aspect certainement bénéfique pour la prise en compte personnalisée du patient, cet ensemble de données pourrait constituer une source importante d'informations alimentant les algorithmes d'analyses de big Data et d'IA.

Le traitement des big Data implique des étapes quel que soit le domaine d'intervention : l'acquisition des données bien sûr, puis leur stockage avec indexation afin de pouvoir accélérer leur recherche ultérieure. En suivant, sont réalisées la validation de ces données, un premier tri algorithmique (élicitation) et l'intégration. Le modèle d'intégration dépendra des objectifs assignés : recherche d'information, prise de décision, extraction de connaissances...

Un des défis futurs sera donc de développer des approches pertinentes et originales afin de recueillir et d'exploiter de nouvelles données.

Le projet de création numérique MEDITRINAE (Médecine Intégrative Thérapeutique et Recherches en Intelligence Artificielle) (117) porté par les responsables de l'équipe d'occlusodontologie du CHU de Toulouse, le Dr F.Destruhaut et le Dr A.Hennequin, est un exemple d'une telle approche. Les auteurs, associés au département de génie informatique et génie logiciel de l'Ecole Polytechnique de Montréal au Canada, développent une application permettant, entre autre, d'améliorer la prise en charge des DTM (Désordres Temporo mandibulaires) au niveau du diagnostic et du traitement. Cet outil comporte aussi un module « analyse et recherche » qui donnera au logiciel la capacité d'apprendre et d'optimiser ses performances au fur et à mesure que le nombre de données collectées augmente, grâce aux algorithmes d'intelligence artificielle (machine learning).

Les algorithmes et la puissance de calcul des ordinateurs interviennent aussi dans l'acquisition des données et là encore on pourrait imaginer quelques approches originales. C'est le cas des méthodes inverses, très utilisées dans la modélisation de phénomènes complexes en mécanique des fluides par exemple, là où il est impossible d'obtenir les mesures de chaque paramètre du système pour le décrire de façon directe.

On définit les techniques inverses comme des méthodes permettant de remonter à des causes (estimation de « sources »), ou à des grandeurs d'influence ou structurelles (estimation de paramètres), inconnues à partir de l'observation de leurs conséquences. C'est à dire remonter aux causes connaissant les effets. Par leur appellation, elles s'opposent aux méthodes directes, qui déterminent les effets à partir des causes.

Il est possible d'illustrer la différence entre méthode directe et méthode inverse en prenant un exemple en mécanique : on sait calculer la vitesse à un instant quelconque d'un point matériel de masse m soumis à une force connue si sa position et sa vitesse initiales sont données, ainsi que les actions subies par le système (c'est le problème direct). Un des problèmes inverses correspondant serait de remonter à partir de la connaissance de la trajectoire et de la vitesse en fonction du temps aux actions instantanées exercées sur ce système matériel de masse m.

Comme nous l'avons vu précédemment, des dispositifs existent pour mesurer la vitesse en fonction du temps ainsi que la trajectoire d'un ou plusieurs points appartenant à la mandibule, avec une précision compatible avec un traitement prothétique du patient. Par contre les forces et actions s'exerçant sur la mandibule ne sont pas mesurables directement. L'EMG permet de mesurer

un potentiel d'action surfacique rendant compte indirectement de la contraction musculaire mais le champ de force s'exerçant sur le volume mandibulaire reste jusque-là inaccessible.

Des approches directes ont été tentées. Par exemple, Mesnard et al.(118) modélisent les actions musculaires s'exerçant sur la mandibule en décrivant chaque faisceau musculaire, à l'aide d'un logiciel de modélisation LifeMod. La simulation LifeMod est effectuée en deux étapes. Les muscles (11 paires) sont déclarés dans le logiciel LifeMod en décrivant toutes leurs caractéristiques comme les points d'insertions, orientation, longueur initiale....). La cinématique mandibulaire est alors enregistrée à l'aide d'un logiciel JMT (Jaw Motion Tracking) et intégrée au modèle. Grâce à ces mouvements, les allongements des muscles, rendus passifs dans le logiciel de simulation, sont enregistrés en fonction du temps ce qui permet de définir la longueur cible : ltarget(t). La deuxième étape consiste en la reproduction des allongements enregistrés, avec l'utilisation d'un contrôle P.I.D. (Proportionnel-Intégral-Différentiel) qui calcule l'activation musculaire à partir de la comparaison entre la longueur cible ltarget(t) et la longueur initiale.

A partir de la différence d'allongements, le logiciel détermine le profil d'activation A(t) pour chaque muscle. Il permet le calcul de la force musculaire. La force musculaire calculée ne dépasse jamais la force maximale, conditionnée par la section physiologique du muscle.

On se rend vite compte des limites d'une telle approche. La modélisation des actions sur la mandibule est de toute façon incomplète. Les forces de résistances, la compression du disque articulaires, les asymétries éventuelles (liées à des compensations de troubles de l'appareil manducateur par exemple), les actions exercées par les ligaments, ne sont pas prises en compte. Les modélisations musculaires sont issues de description moyennes. Les lois d'actions musculaires sont-elles même des approximations : la force ne dépend pas que de l'allongement et de la section du muscle. Il y a une régulation bien plus complexe qu'une régulation P.I.D. liée au seul allongement du muscle. On pourrait énumérer à l'infini les sources d'incertitudes liées au modèle. Seul le mouvement de la mandibule est enregistré et correspond aux données brutes du patient.

Les méthodes inverses pourraient représenter une façon originale de contourner ces difficultés afin de remonter à la description de la dynamique musculaire à partir des enregistrements de vitesse en fonction du temps et donc de l'accélération. Le problème reste complexe et là encore, afin de résoudre les équations en méthodes inverses, il faudra passer par la définition de différents paramètres arbitraires qui à leur tour pourront introduire une source d'incertitude.

Enfin pour conclure je commenterai la citation de David Pucheu placée en introduction de cette thèse : « L'autre n'est pas une donnée »

Le déploiement d'une informatique omniprésente « sorte de peau électronique superposée au réel » (119) pose les conditions d'une telle maîtrise.

Si nous déléguons nos capacités de compréhension inévitablement partielles et partiales à la dite objectivité des algorithmes, ne prenons-nous pas le risque d'effacer l'identité propre du patient et finalement de réduire notre rapport à celui-ci comme un rapport à nous-mêmes ?

Ce développement technologique exponentiel n'est pas sans réveiller les craintes qu'exprimait déjà le père de la cybernétique. À la fin de son célèbre ouvrage *The Human Uses of Human Being*,

Norbert Wiener (1971) avait mis en garde ses lecteurs sur l'hypothétique émergence d'un « Léviathan technologique ». Pour Wiener, « le salut n'est pas tant dans cette méga machine que dans l'usage qu'en feront les hommes. Plus important encore, il faudra engager quelques anthropologues sérieux dans sa conception qui pourraient garantir son adaptabilité au milieu humain »

## CONCLUSION

Les outils numériques, sans provoquer une remise en question des paradigmes concernant la planification prothétique, offrent au praticien de nouvelles possibilités concernant les échanges de données. Cela se traduit par un bien meilleur contrôle de la réalisation du plan de traitement. Auparavant la prise de décision thérapeutique nécessitait la réalisation de jeux de cires, de montages en articulateur, de wax-up, avec des sources d'erreurs inévitables liées aux matériaux, au transport, au montage, tout ceci étant opérateur dépendant. Maintenant il est possible d'enregistrer et de transférer ces paramètres au laboratoire de prothèse en s'affranchissant de certaines de ces contraintes, mais en en créant d'autres.

La chaine numérique total augmente le champ des possibilités concernant le recueil de données anatomiques et fonctionnelles du patient. A la fois plus exhaustives, intégrant une multitude de données nouvelles (exemple du système MODJAW pour la cinématique mandibulaire) plus proches que jamais de la réalité du patient. Cette technologie permet de créer un patient virtuel sur lequel le binôme praticien-prothésiste pourra simuler le traitement prothétique. Ainsi le praticien pourra évaluer le traitement d'un point de vue fonctionnel et esthétique et donnera au patient la possibilité de visualiser le projet envisagé. L'adhésion au traitement s'en trouvera facilitée.

Tous ces nouveaux outils, de plus en plus conviviaux facilitent l'analyse des données cliniques et permettent de guider efficacement le praticien vers la réalisation de réhabilitations étendues et complexes. La planification prothétique s'en trouve facilité sur certains aspects, procurant gain de temps et précision.

Cependant, comme dans l'approche classique, il existe dans la chaîne numérique, à chaque étape, de nombreuses sources d'erreurs et d'imprécisions que le clinicien doit connaître et garder à l'esprit. La superposition des différents fichiers numériques de formats différents, l'acquisition d'une empreinte optique d'une arcade complète édentée, la prise en compte de la dépressible tissulaire et desmondontale, constituent des sources nombreuses d'erreurs et d'imprécisions et représente encore de nombreux défis pour le praticien. Ces technologies sont une aide précieuse mais ne peuvent être utilisées sans le jugement que constitue le sens clinique du praticien.

Enfin tous ces moyens d'acquisitions, ces aides à la planification proposent pour le moment une vision très mécanistique du système manducateur. La mandibule et le système dentaire associé sont réduits à un solide en mouvement. Or nous savons que la réalité est toute autre. Les ligaments, la déformations symphysaire, l'action musculaire sont peu pris en compte pour l'instant. Le système manducateur est un système à multiples composants : osseux, dentaire, ligamentaire, musculaire, articulaire, nerveux, vasculaire. Tous ces systèmes sont en interaction. Des boucles de régulation, des rétroactions positives, négatives existent. La mandibule est un organe mobile intermédiaire entre les muscles antérieurs du cou et les muscles crâniens. Elle fait partie du jeu musculaire antagoniste et agoniste de la tête et du cou et en cela intéresse toute la dynamique musculaire du corps. La dynamique mandibulaire est donc très complexe et demande pour être interprétée la mise en

relation de nombreux systèmes. Une approche numérique est certainement une des voies d'avenir pour modéliser et interpréter cette complexité. L'étude de la variation des vitesses (l'accélération) des mouvements mandibulaires, suivant le principe fondamental de la dynamique Newtonienne, constituerait peut-être une première approche pour appréhender une part de cette complexité : les actions musculaires, ligamentaires, articulaires s'exerçant sur la mandibule.

La puissance de cet outil est potentiellement formidable et la possibilité de jumeaux numériques permettra de tester les limites de nos planifications esthétique, prothétiques, orthodontiques, implantaires et autre. C'est un horizon immense qui s'ouvre à ceux qui souhaiteront investir ces champs thérapeutiques.

Le président du Jury,

Pr F. Diemer



Vu le directeur de thèse Dr Antonin Hennequin



Le 24/06/2020

### Tables des illustrations :

Figure 1 exemple de stratégie de scannage tiré du manuel d'utilisation de Trios 3 shape	19
Figure 2 (A) vue intra buccale de l'arcade (B) Scan des implants avec scan body(4)	
Figure 3 (A) Scan avec objet annexe (B) Objet annexe effacé (4)	
Figure 4 Matériel nécessaire	20
Figure 5 Logiciels disponibles en 2017 pour la réalisation d'un projet esthétique	24
Figure 6 Bellus 3D Face camera pro	26
Figure 7 a-t-scan de l'ensemble du crâne. b-visualisation des tissus mous  de face c-de profil d-reconstitution	de la
surface du visage (fichier stl) à partir du nuage de points des tissus mous en surface et superposition d'une p	hoto 2D
via une série de points remarquables (glabèle, pointe du nez, nasion, lèvre inférieur) ce qui permet de créer l	a texture
du visage et reconstituer un scan facial réaliste e	27
Figure 8 Différentes tailles de champ de vue : petit champ 4 × 5 cm, champ moyen 8 × 8 cm ou 10 × 10 cm, e	t grand
champ	29
Figure 9 Schéma de principe du système Modjaw	31
Figure 10 : système modjaw	31
Figure 11 : Principaux composants du système SICAT Jaw Motion Tracking Systeme	32
Figure 12 : Appareil sur la tête du patient. De gauche à droite : Le SICAT Fusion Bite dans la bouche ; l'atto	ıchement
para occlusal en T attaché à l'arcade inférieure; L'arc facial  positionné de manière stable sur la tête du po	itient avec
le capteur mandibulaire fixé sur l'attachement para occlusal	33
Figure 13 :Stylet	
Figure 14 Plan meca 4D Jaw Motion	36
Figure 15 repérage du PAO	
Figure 16 Dispositif de repérage (« fourchette ») avec l'empreinte du maxillaire et fusion des fichiers 3D	
Figure 17 A PAO et système de coordonnée de référence B Position du maxillaire par rapport au scan facial (	
du modèle maxillaire dans l'articulateur	
Figure 18 Superposition du fichier STL issu de l'empreinte optique et des données du CBCT utilisant des trian <u>c</u>	_
marqueurs collés sur les dents comme point de référence	
Figure 19 a-importation des données au format STL de l'empreinte optique dans le fichier associé au CT-scar	
alignement manuel b-Un code couleur indique l'éloignement des points du CT-scan avec ceux du fichier STL.	
permet d'améliorer la superposition des volumes associés aux structures dentaires issues du fichier CT-scan	
l'empreinte optique c- Affinement de l'alignement grâce à un outil logiciel permettant de faire des ajusteme	
coupes construites à partir des deux fichiers numériques . d- superposition du scanner facial (parfaitement a	_
issu des données du CT-Scan)	
Figure 20 Fusion Bite et mordu silicone	
Figure 21 Identification des marqueurs radio opaques du fusion bite sur différentes coupes du CBCT et segm la mandibule	
Figure 22 Visualisation des mouvements mandibulaire sous plusieurs angles avec le tracé de la trajectoire du	ı dentalé
lors des phases d'ouverture et de fermeture	51
Figure 23 Algorithme de choix de la position de référence mandibulaire. RC : relation centrée OIM : occlusio	n
d'intercuspidie maximale(46)	52
Figure 24 : schéma d'établissement de la relation centrée de façon virtuelle. Le « virtual bite registration » o	u mordu
virtuel joue le rôle de la cire d'occlusion enregistrée en centrée et la superposition des différents fichiers de p	oints se
fait à l'aide d'un logiciel d'impression 3D du type Meshmixer	54
Figure 25 Evaluation de la précision de la méthode de placement de la mandibule en RC avec scan buccal	55
Figure 26 Coupe réalisée sur l'articulateur virtuel 3D Virtual articulator Système (Zebris medical, GmbH®)	59
Figure 27 a- Cartographie des zones de contact et de l'espace libre d'inocclusion avec le codage couleurs	
correspondant en coupe ; b- cartographie dynamique des zones de contact (contact prématuré sur 33)	59
Figure 28 système T-Scan	60

Figure 29 Triangle de Slavicek	61
Figure 30 Modèle théorique des surfaces de guidages	61
Figure 31 : (66)Effet du guidage antérieur sur la trajectoire du condyle travaillant. La ligne neutre représente le chem	in
incisif imaginaire (ligne pointillée) lorsque le condyle travaillant se déplace le long de l'axe transverse horizontal. La	
trajectoire incisive réelle est plus raide que la ligne neutre. Le condyle travaillant se déplace ensuite sous l'axe	
horizontal transverse ou détrusion (A). Si le trajet incisif réel est plus plat que la ligne neutre, le condyle de travail se	
déplace au-dessus de l'axe ou surtrusion (B)	62
Figure 32 : Paradoxe : Devons-nous concevoir le guide antérieur en fonction des déterminants postérieurs (comme le	
déplacement latéral du condyle A ou B ) ? Lesquels dépendent eux mêmes de la forme anatomique du guide antérieu	ur
(face palatine des dents antérieures maxillaire)	63
Figure 33 : Image de la tablette FGP avec la cire en position (a) Empreinte optique de l'enregistrement FGP (c) Fusion	,
du fichier précèdent (empreinte optique du FGP) et du fichier des prothèses conçues par CFAO en occlusion centrée. L	es
zones en blanc, dépassant la cire du FGP représentent les zones d'interférences à soustraire (d) Design des Prothèses	
corrigées ne produisant plus d'interférence	66
Figure 34 : Graphique illustrant le chemin d'ouverture et de fermeture de la bouche	68
Figure 35 Enregistrement de l'amplitude des mouvements : verticaux (en bleu, avec évaluation de l'espace libre	
d'inocclusion), antéro postérieur (en rouge) et latéraux (en vert)	69
Figure 36 Enregistrement de l'activité musculaire par EMG	69
Figure 37 Position myocentrée représentée par le point noir, marqueur de navigation pour réaliser le mordu	70
Figure 38 a -position verticale et sagittale de l'incisive mandibulaire selon l'analyse de Ricketts b-Principe	
d'orthogonalité	73
Figure 39 Guide chirurgical avec douille	75
Figure 40 Emboitement Foret , cuillere et canon de forage	
Figure 41 porte implant	76
Figure 42 : A position labiale au repos. B : sourire C : vue intrabuccale prétraitement	80
Figure 43 A:Réalisation du wax up virtuel B : L'outil permettant de mesurer l'allongement coronaire de 21 sur le wax	
up	81
Figure 44 Visualisation 2D du projet esthétique virtuel A :position de repos B : Lors du sourire	81
Figure 45 : A : réalisation de la gouttière dans le logiciel de CAO B : Gouttière imprimée	81
Figure 46 A : réalisation du mock up à l'aide de la gouttière imprimée B : visualisation des provisoires, position de rep	
C: sourire	81
Figure 47 :	82
Figure 48 Impression 3D du guide chirurgical	84
Figure 49 design du guide chirurgical pour élongation coronaire	
Figure 50 Guide pour la gingivectomie Figure 51 Guide pour l'avéoloplastie	
Figure 52 A : incision suivant le guide de gingivectomie B : lambeau de pleine épaisseur C : Osteoplastie en suivant le	<b>?</b>
guide d'alvéoloplastie C : Remise en place du lambeau et sutures	85
Figure 53 A : fichier DICOM issu du CBCT ; B : Modèle numérique 3D de la dent à extraire au format STL C : Impression	
3D de l'incisive centrale.	
Figure 54 A : Moulage de duplication dans lequel la dent usinée a été replacée ; B,C : Modèle en plâtre avec le profil	
d'émergence (fausse gencive)	86
Figure 55 a La composition d'un dispositif PCM se compose d'un Reflex numérique, d'un objectif et d'un flash macro,	
d'un dispositif de polarisation croisée adapté à l'appareil. b- Photo au flash sans polarisation croisée c- Dispositif de	
polarisation croisée : de part et d'autre sur les flash déportés un filtre polarisant la lumière dans une direction	
(marquée par un trait rouge). Sur l'objectif un filtre polarisant dont la direction de polarisation est croisée avec les	
précédents. d- Photo avec polarisation croisée : la structure des couches amélo dentinaire est beaucoup plus visible	88
Figure 56 : L'équilibrage des blancs est généralement effectué avec l'aide d'un objet achromatique telle que la carte	
grise ci-dessus (système elab émulation.org). Cette carte contient d'autres éléments permettant de standardiser la	
prise de vue :	89
Figure 57 : Les paramètres du système L*a*b* sont :	

rigure 38 cambration automatique et vandation du cliche à la prise de vue. Conjorme à gauche et non conjorn	ie a
droite. Le logiciel ne garantira pas un résultat précis avec la photo de droite	90
Figure 59 : teinte principale pour le pilier (a) et la teinte principale de la dent naturelle dans deux zones : une a	zone
cervicale(b) correspondant au deux tiers de la dent et une zone incisale(c) type de céramique (d), de l'épaisseu	ır de
dentine choisie en fonction de l'espace disponible (e,f), mélange de poudre à effectuer pour recréer la teinte	sur la
dent prothétique dans la zone cervicale (g) et dans la zone incisale (h)	91
Figure 60 (a) Photo standardisée sur modèle de la prothèse.(b) essais numériques de la prothèse, mesure des	
couleurs ΔΕ , ΔL, Δα, Δb	
Figure 61 Mesure de l'écart de couleurs dans la zone cervicale	92
Figure 62 Etat initial a : vue intrabuccale en OIM de face b : vue du bloc antérieur maxillaire c : vue du bloc ar	ntérieur
mandibulaire d : vue occlusal mandibulaire et e : maxillaire f : orthopantomogramme	99
Figure 63 céphalométrie de profil	100
Figure 64 Planification esthétique en ligne avec DSD planning center ; en bas à gauche occlusogramme corres	
à la planification	
Figure 65 : a : wax up numérique( les allongements de chaque bord incisif sont notés) ; b : Superposition des t	rois
fichiers numériques : empreinte numérique initiale ; wax up numérique ; CBCT c : Vu en coupe avec les mesure	es des
différents niveaux de gencives (réel, planifié) par rapport à l'os	
Figure 66 : planification et réalisation des élongations coronaires	103
Figure 67 conception avec Exocad et réalisation par usinage des overlay mandibulaires et facettes palatines n	
Figure 68 : collage en seule séance des overlays mandibulaire secteur premolo-molaire et des facettes palatin	es 104
Figure 69 : a : protocole elab ; b : préparation au travers du mock up ; c : préparation des facettes ;	105
Figure 70 : Etat initial	106
Figure 71 : DSD	106
Figure 72 Photographie initiale du patient à gauche et projet virtuel à droite	107
Figure 73 : Planification implantaire a -superposition du wax up numérique, empreinte optique et DICOM b-	
Superposition empreinte optique et DICOM c- seul fichier DICOM avec mise en place des implants, douilles de	forage et
emplacement des puits pour vis de fixation du guide chirurgical. d- vue panoramique e- coupe horizontale f-co	oupe
sagittale g-coupe transversale (dans chaque coupe la superposition des différents fichiers nous permet de rep	érer le
niveau osseux, le niveau de la muqueuse, l'organe dentaire, le waxup)	108
Figure 74 vue intra buccale en post op et à 6mois avec la prothèse définitive	109
Figure 75 a : conception numérique du guide dans le logiciel implant studio de 3SHAPE b,c : guide chirurgical	109
Figure 76 a, b vues extra buccale postopératoires à 15 jours b- Vue intra buccale en postopératoire	109
Figure 77 a-Tissus mous à 4 mois avant empreinte pour réalisation du bridge définitif b- Bridge définitif vue	
intrabuccale c-vue extrabuccale	110
Figure 78 : De gauche à droite : photo initiale, Planification issue du DSD, sourire du patient avec le bridge déf	finitif . 111

#### **BIBLIOGRAPHIE:**

- 1. Rekow ED. Digital dentistry: The new state of the art Is it disruptive or destructive? Dent Mater. sept 2019;S0109564119308061.
- 2. Richert R, Goujat A, Viguie G, Viennot S, Ducret M. L'empreinte optique intrabuccale : de la connaissance the orique a la strate gie clinique. 2016;(176):9.
- 3. Delaunay B. Comparaison des systemes d'empreintes optiques accessible au chirurgien dentiste dans leur cabinet en 2015. 2015.
- 4. Iturrate M, Minguez R, Pradies G, Solaberrieta E. Obtaining reliable intraoral digital scans for an implant-supported complete-arch prosthesis: A dental technique. J Prosthet Dent. févr 2019;121(2):237-41.
- 5. [En ligne]. Intention photographique et dentisterie Cahiers de Prothèse n° 2019 du 01/07/2019; [cité le 10 nov 2019]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-2019hs/intention-photographique-et-dentisterie-Transversal\_2019\_P07-P11.html?query=photographie&revues%5B0%5D=CLl&revues%5B1%5D=CDP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 6. Gouët, Ronco, Gaillard, Peuch Lestrade. Regeneration esthétique du sourire.
- 7. Quentin G. Projet esthétique virtuel: "comparaison des outils numériques''. 2017.
- 8. [En ligne]. Étude esthétique à travers l'application EASY© Cahiers de Prothèse n° 2019 du 01/07/2019; [cité le 11 nov 2019]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-2019hs/etude-esthetique-a-travers-l-application-easyc-Transversal\_2019\_P21-P24.html?query=sou-rire+types&revues%5B0%5D=CLI&revues%5B1%5D=CDP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 9. Gouët,Ronco,Gaillard, Peuch Lestrade E Vincent,Cyril,Geoffroy-renaud. Régénération esthétique du sourire. MED'COM. 2015. 392 p.
- 10. Coachman\_Interdisciplinary\_Treat\_Planning\_Chapter.pdf [En ligne]. [cité le 30 oct 2019]. Disponible: http://digitalsmiledesign.com/static/media/Coachman\_Interdisciplinary\_Treat\_Planning\_Chapter.pdf
- 11. Coachman C, Calamita MA. Digital Smile Design: A Tool for Treatment Planning and Communication in Esthetic Dentistry. Dans: 2012.
- 12. [En ligne]. Ditramax®: le trait d'union entre le cabinet et le laboratoire Cahiers de Prothèse n° 173 du 01/03/2016; [cité le 18 févr 2019]. Disponible: http://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-173/ditramax-le-trait-d-union-entrea-lea-cabinet-et-le-laboratoire-CDP\_173\_P21-P30.html?query=coachman&revues%5B0%5D=CLl&revues%5B1%5D=CDP&revues%5B2%5D=JPA&revues%5B3%5D=IMP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 13. Magne, Belser P urs. Restaurations adhesives en céramique sur dents antérieures. Approche biomimétique. Quintescence internationale. 2003. 400 p.
- 14. Heike CL, Upson K, Stuhaug E, Weinberg SM. 3D digital stereophotogrammetry: a practical guide to facial image acquisition. Head Face Med. 28 juill 2010;6:18.
- 15. [En ligne]. Scanner 3D facial Tous les fabricants de matériel médical Vidéos; [cité le 17 nov 2019]. Disponible: https://www.medicalexpo.fr/fabricant-medical/scanner-3d-facial-28443.html
- 16. Bellus3D Announces Dental Pro 3D Face Scanning App. :3.
- 17. [En ligne]. (127) Dolphin Imaging 3D Surgery Demo YouTube; [cité le 18 déc 2019]. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=GKHzH3vyrFg

- 18. Lee K-M, Lee WJ, Cho J-H, Hwang H-S. Three-dimensional Prediction of the Nose for Facial Reconstruction Using Cone-Beam Computed Tomography. Forensic Sci Int. 1 mars 2014;236.
- 19. Hwang H-S, Kim K, Moon D-N, Kim J-H, Wilkinson C. Reproducibility of facial soft tissue thicknesses for craniofacial reconstruction using cone-beam CT images. J Forensic Sci. mars 2012;57(2):443-8.
- 20. Felizardo R, Martin-Duverneuil N. Tomographie volumique à faisceau conique (cone beam computed tomography) α. Cone Beam Comput Tomogr. 2019;24.
- 21. Rocher. Tomographie volumique à faisceau conique. Justification, optimisation et lecture. Dossiers ADF; 2015.
- 22. 李萌. 2019 IDS Jaw Movement Tracing Systems [En ligne]. CEREC Digest. 2019 [cité le 13 sept 2019]. Disponible: https://www.cerecdigest.net/2019/06/24/2019-ids-jaw-movement-tracing-systems/
- 23. Brevet modjaw [En ligne]. [cité le 16 sept 2019]. Disponible: https://patentimages.sto-rage.googleapis.com/ef/20/d0/65ea4585e27bc3/US10265149.pdf
- 24. Dr Jaisson; M.Rodrigue M. Brochure Modjaw. 2018.
- 25. Kühnöl C, Kordaß B. Digital workflow for TMD diagnostics and bite alteration: description of a case treated using Sicat Function Digitaler Workflow bei CMD-Diagnostik und Bisslageänderung eine Fallbeschreibung in Anwendung von Sicat Function. Int J Comput Dent. :10.
- 26. SICAT Function Review Jaw Motion Tracking Data [En ligne]. [cité le 13 déc 2019]. 2:12. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=Cioos-fZJfY
- 27. He et al. 2016 The use of a dynamic real-time jaw tracking device.pdf.
- 28. Reyes Enciso, Ahmed Ali MemonDouglas Fidaleo. The virtual cranio facial patient. Studies in health technology and informatics. Fevrier 2003;
- 29. Kwon et al. 2019 A digital approach to dynamic jaw tracking using a.pdf [En ligne]. [cité le 4 nov 2019]. Disponible: https://pdf.sciencedirectassets.com/277418/1-s2.0-S1883195818X0005X/1-s2.0-S1883195818300835/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEDUaCXVzLWVhc3QtMSJH-MEUCIFKCSIQ48V2GL8O3D7LmyYly8634GAgmtbM07mfRLRjnAiEAmSxfMWv6Qk%2B9OBIiDlmPEp-nSl6XQCm6ZHO0xPYghkNgq0AllThACGgwwNTkwMDM1NDY4NjUiDl4vHHnq6frXEgvKlSqtAk-vLYIpT3kufnLszRzwvwkvZhQMM%2FkpA%2BmXrJ%2BLi%2BUfVd8XYG08UwBq0PdlLfRmjfvOVKxUr-SiCWZaaJaMEOfD7%2Fq0ICmFF3ZrsRs6Yto-

soxiPzdL%2FRdk6N4PuN2h2KXG%2FoNsw%2FogNGPpp%2Ff9JSj3OV5Tg23fEy89VYCK4iukJELt-SezZlz5Awi8owKfne4EjDp2MvYhXhwO%2FH7%2FEovycBtw5gmMAOG-

BzCulOufV1uJpdspQjMkvSWAQsRcGcZx9hQ8NkyGwQFl1DKUKk%2Baz8AtzcEUrhPXtCdP%2FltWNSedeG-GABsq1%2BQCkdc%2FkUtYghHW4wdQCd867vhw%2FwCecPssCHk8Oe1xJlhQN5cljYelqwjgftvmclxJPvKNuvENCfKSKipjRbWaBScpo4vb8w4aGC7gU6zwl9wiDJ1YVp6NUVWvzmzXLWX1HNx%2B4j8MsUPbQRv4pVULK2pO2cSU5kK5P7Mr16MH9T1k0%2FeaqdxQhjfNzRwtWZdCWF%2FlUqtOhCUJMlpzeNP9khVHeBa%2FJ%2BBSlin6%2FQLevFZdPeqatc%2FJPpyxOK81CMFYB0GUt-

 $Ndxv6WxGhdCOmo4c7G2JKXyWO9gxMGKXiSmDwkMKb2gsdxeUto7su7i1aeKPkBQxw68m0MaMRwULyOBe \\ 2\%2BcB4wF5\%2FDU8AwQBnS0pZDHqXXn-$ 

piJ4azsORz5N2eWRbFClQwQ6Nda3iUlddnhTF%2Fdeym7tGVEUXee7iXUb4Y%2FHCiz-

MwIjEJNnM7%2F%2B%2BXdnJX%2BmZsQZTYWGh29CChM-

pyQe21fHFQOhH57rHkaUAewpb10LMWCoDdzp47Elbwqqb%2BRr8W0EN2xJqguk0k29CHH8lDOsG5x7tKTz%2FZ%2BnlQ%3D%3D&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Date=20191104T213134Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=300&X-Amz-Credential=ASIAQ3PHCVTYYJ4AJUFG%2F20191104%2Fuseast-1%2Fs3%2Faws4\_request&X-Amz-Signa-

 $ture = d9de 98003a1d2626c876a28d15f819995a5be2a58f2c31f26eb536b5c579904d\&hash = 7c98185ec471ffe\\f02bb6a6ff036ba889bc37d7fac4bd8839d1ef4b70d3deb41\&host = 68042c943591013ac2b2430a89b270f6af2$ 

c76d8dfd086a07176afe7c76c2c61&pii=S1883195818300835&tid=spdf-ffa81a8e-8472-4fa8-bc37-06bd7ae72c7d&sid=c4f88912989ea246ce9aea413e758b9b13f6gxrqb&type=client

Terajima et al. - 2008 - Four-dimensional analysis of stomatognathic functi.pdf [En ligne]. [cité le 17 nov 2019]. Disponible: https://pdf.sciencedirectassets.com/272361/1-s2.0-S0889540608X00083/1-s2.0-S0889540608003983/main.pdf?X-Amz-Security-Token=IQoJb3JpZ2luX2VjEGcaCXVzLWVhc3QtMSJIMEY-CIQDJz0CmrAwNSOVQ9T51b9wAUeHwZVyJBfiJCJWXBHMqwAlhAMVq9Wy3vARwPJjvipLLi-Nif8c7O035ujcVxEM9fPRkwK-

toCCJD%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEQAhoMMDU5MDAzNTQ2ODY1Igwy0Ov-DmsQK99vWpvYqrgIEFyIqIEKe2izAmZ%2F96CldMIrtzD%2B2NHl0DA2hSDtfeSguBUuugu%2Bab-FDmrcKH%2F1wruG-

tGa2AucSgCH026H4qpp7czu6u8m4ltX2GjuwqFfgdNVqCb%2FB0f9MiIQVZvJW%2FXV6OONPV8oPsPhWHjOC6rVzSfl9g5KopCyK0drhFEUql45X5Ktcg8qMHV0VziwYl%2Fxe0JCLaj4YkYhedViQUk%2BSzP6i3%2Bc2eK-CtLtLCHWIAcq%2B%2BiSUA8VCkRqZ%2BJpPptskLT5Bee63EvfbGxH2s1FH46R4klZ%2FYGvXcYWW-NlbSQ%2BRP7Qc7zlXR5U9zVKZVx8k8AHVxgkb6AM6mFEE%2BMY0id-

Mlx f chbmns Lnh GBV4QZ34fV4VNDK6XeOS6ABBPkFOXGdDYaA%2Bp74ExGaCnSTDar8XuBTrNAukxCNQNhQFjvOasOcDFi6RkS2eDvdrTqCE-

GWbGpD4vcS2agOWgS8nvgRDjQvTIVL7uUkZzdEB87TULA0tQKSgXHTPUAhjAui-

Bun7zHN7dkAXvd21zhgsBMpl02XxCwVDLKOehH2jxcvNK-

dotocr%2FgY2r11lP28ZUKNU%2BTxYBq3InyqUaKl9ag4pVtBU-

MyWpBnO17l3x9d0m0WReN%2FyUtFl3TgcVsn-

Zodt8zpcksmrUHhbdL3%2FS7%2B6JbCMsGxubuZr3vpJ7ApS3TcZkV7UIcwWzisEC6O5m1rkSRTlyCko5Bz%2Ba MenUNdrXR%2Fy2ZsAbqS0N1HusBVHyeYiKRevEUa-

PoRgHcpOIdDUydi28kZVzCn5kJMK%2FzXWbJP8%2Bltrsqy5BkdGb0as27zQoaXcq%2B26unyFVLoZ-wEhyV3gBwe8Jrlx6GhlCX73eP9WA9z6cg%3D%3D&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Date=20191117T144302Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=300&X-Amz-Credential=ASIAQ3PHCVTYQ5OQBXPY%2F20191117%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\_request&X-Amz-Signature=bc3b62636a05794043d2b918b0bf23da00c3919e3bf18c53e13be6e799c87a63&hash=76a5834db042dad70fd5edddfdd0bc9d4093c6f1206ba7c458a660ed440639d4&host=68042c943591013ac2b2430a89b270f6af2c76d8dfd086a07176afe7c76c2c61&pii=S0889540608003983&tid=spdf-c29d7a52-0909-4b60-b635-f7e2f8aee955&sid=4078457b464d5546001b63a9695bd13d12aagxrqb&type=client

- 31. Gutman et Keller 2018 Jaw Tracking Device and Methods of Analysis of Pat.pdf [En ligne]. [cité le 16 sept 2019]. Disponible: https://actascientific.com/ASDS/pdf/ASDS-02-0330.pdf
- 32. JMAnalyser\_System\_Hardware-Manual\_131218\_en.pdf [En ligne]. [cité le 19 nov 2019]. Disponible: https://www.schuetz-dental.de/media/pdf/45/b0/9f/JMAnalyser\_System\_Hardware-Manual\_131218\_en.pdf
- 33. JMT\_JMA\_en\_190128\_web.pdf [En ligne]. [cité le 14 déc 2019]. Disponible: https://www.zebris.de/filead-min/Editoren/zebris-PDF/zebris-Prospekte-EN/JMT JMA en 190128 web.pdf
- 34. de Belleville R. Simulation virtuelle de l'occlusion dynamique: possibilités actuelles et perspectives [thd]. bordeaux : université de bordeaux odontologie; 2016.
- 35. Behin P, Boutigny H. Les articulateurs virtuels.
- 36. freecorder\_min\_en.pdf [En ligne]. [cité le 15 déc 2019]. Disponible: https://www.drdougerick-son.com/files/2015/12/freecorder\_min\_en.pdf
- 37. Freecorder\_Prospekt-EN\_2015-Final\_Boegen.pdf [En ligne]. [cité le 15 déc 2019]. Disponible: http://violadent.com/image/data/pdf/Freecorder\_Prospekt-EN\_2015-Final\_Boegen.pdf
- 38. JMA\_Optic\_en\_190128\_web.pdf [En ligne]. [cité le 15 déc 2019]. Disponible: https://www.zebris.de/filead-min/Editoren/zebris-PDF/zebris-Prospekte-EN/JMA\_Optic\_en\_190128\_web.pdf

- 39. Lo Russo L, Caradonna G, Biancardino M, De Lillo A, Troiano G, Guida L. Digital versus conventional workflow for the fabrication of multiunit fixed prostheses: A systematic review and meta-analysis of vertical marginal fit in controlled in vitro studies. J Prosthet Dent. nov 2019;122(5):435-40.
- 40. Di Fiore A, Meneghello R, Graiff L, Savio G, Vigolo P, Monaco C, et al. Full arch digital scanning systems performances for implant-supported fixed dental prostheses: a comparative study of 8 intraoral scanners. J Prosthodont Res. oct 2019;63(4):396-403.
- 41. Latham J, Ludlow M, Mennito A, Kelly A, Evans Z, Renne W. Effect of scan pattern on complete-arch scans with 4 digital scanners. J Prosthet Dent. janv 2020;123(1):85-95.
- 42. Revilla-León M, Jiang P, Sadeghpour M, Piedra-Cascón W, Zandinejad A, Özcan M, et al. Intraoral digital scans—Part 1: Influence of ambient scanning light conditions on the accuracy (trueness and precision) of different intraoral scanners. J Prosthet Dent. déc 2019;S0022391318309922.
- 43. Batak B, Yilmaz B, Shah K, Rathi R, Schimmel M, Lang L. Effect of coded healing abutment height and position on the trueness of digital intraoral implant scans. J Prosthet Dent. mars 2020;123(3):466-72.
- 44. Lo Russo L, Caradonna G, Troiano G, Salamini A, Guida L, Ciavarella D. Three-dimensional differences between intraoral scans and conventional impressions of edentulous jaws: A clinical study. J Prosthet Dent. févr 2020;123(2):264-8.
- 45. Bohner L, Gamba DD, Hanisch M, Marcio BS, Tortamano Neto P, Laganá DC, et al. Accuracy of digital technologies for the scanning of facial, skeletal, and intraoral tissues: A systematic review. J Prosthet Dent. févr 2019;121(2):246-51.
- 46. Orthlieb J-D. Gnathologie fonctionnelle volume 2: occlusion et reconstruction prothétique. CdP. 2011. (Mémento; vol. vole2).
- 47. Girault L'articulateur virtuel possibilités actuelles.pdf [En ligne]. [cité le 20 févr 2019]. Disponible: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01252219/document
- 48. The virtual articulator in dentistry: concept and development. Dent Clin North Am. 1 juill 2002;46(3):493-506.
- 49. Solaberrieta E, Garmendia A, Minguez R, Brizuela A, Pradies G. Virtual facebow technique. J Prosthet Dent. déc 2015;114(6):751-5.
- 50. Joda T, Bragger U, Gallucci G. Systematic Literature Review of Digital Three-Dimensional Superimposition Techniques to Create Virtual Dental Patients. Int J Oral Maxillofac Implants. mars 2015;30(2):330-7.
- 51. Lo Russo L, Di Gioia C, Salamini A, Guida L. Integrating intraoral, perioral, and facial scans into the design of digital dentures. J Prosthet Dent. juill 2019;S0022391319304032.
- 52. de Waard O, Baan F, Verhamme L, Breuning H, Kuijpers-Jagtman AM, Maal T. A novel method for fusion of intra-oral scans and cone-beam computed tomography scans for orthognathic surgery planning. J Cranio-Maxillofac Surg. févr 2016;44(2):160-6.
- 53. Mangano C, Luongo F, Migliario M, Mortellaro C, Mangano FG. Combining Intraoral Scans, Cone Beam Computed Tomography and Face Scans: The Virtual Patient. J Craniofac Surg. avr 2018;1.
- 54. Nilsson J, Richards RG, Thor A, Kamer L. Virtual bite registration using intraoral digital scanning, CT and CBCT: In vitro evaluation of a new method and its implication for orthognathic surgery. J Cranio-Maxillofac Surg. sept 2016;44(9):1194-200.
- 55. Joda T, Bragger U, Gallucci G. Systematic Literature Review of Digital Three-Dimensional Superimposition Techniques to Create Virtual Dental Patients. Int J Oral Maxillofac Implants. mars 2015;30(2):330-7.

- 56. Kurbad A. Three-dimensional registration of real jaw motion tracking data and its therapeutic consequences. International Journal of Computerized Dentistry. 26 mars 2018;57-70.
- 57. sicat-function-optimotion-brochure-en.pdf [En ligne]. [cité le 20 déc 2019]. Disponible: https://cdn.si-cat.cloud/sicat/website/downloads/funktionelle-zahnheilkunde/sicat-function-optimotion-brochure-en.pdf
- 58. He S, Kau C, Liao L, Kinderknecht K, Ow A, Saleh T. The use of a dynamic real-time jaw tracking device and cone beam computed tomography simulation. Ann Maxillofac Surg. 2016;6(1):113.
- 59. Kuric KM, Harris BT, Morton D, Azevedo B, Lin W-S. Integrating hinge axis approximation and the virtual facial simulation of prosthetic outcomes for treatment with CAD-CAM immediate dentures: A clinical report of a patient with microstomia. J Prosthet Dent. juin 2018;119(6):879-86.
- 60. Hanssen, Ruge, kordass N S, B. SICAT Function: Anatomical Real-dynamic Articulation by Merging Cone beam computed Tomography and jaw motion tracking data. 2014;65-74.
- 61. Felenc S, Jaisson M. L'imagerie en trois dimensions a envahi nos espaces de travail et bouleversé les procédures de conception des prothèses dentaires. La quatrième dimension ajoute le facteur temps à la visualisation des anatomies dentaires en animant les modèles selon l'exact déplacement des arcades des patients. 2018;6.
- 62. ruge, Kordass S B. 3D-VAS- Initial results from computerized visualisation of dynamic occlusion. Journal of comput dent. 2008;9-19.
- 63. Afrashtehfar KI, Qadeer S. Computerized occlusal analysis as an alternative occlusal indicator. CRANIO®. 2 janv 2016;34(1):52-7.
- 64. Ruge S, Quooss A, KordassB. Visual analysis of dynamic occlusion in a virtual articulator. Journal of cranio-mandibular function. 2009;215-28.
- 65. 1FE25ABF-5056-B71D-5E4CD8D6D0960D94-pdf.pdf [En ligne]. [cité le 30 mars 2020]. Disponible: https://www.dentisteexpo.com/\_\_media/libraries/liste-de-produits/services/1FE25ABF-5056-B71D-5E4CD8D6D0960D94-pdf.pdf
- 66. Twin-tables technique for occlusal rehabilitation: Part I—Mechanism of anterior guidance. J Prosthet Dent. 1 sept 1991;66(3):299-303.
- 67. Investigation of the effects of a variable lateral guidance incline on the pantronic registration of mandibular border movement: Part II. J Prosthet Dent. 1 oct 1993;70(4):336-44.
- 68. [En ligne]. La gestion de l'occlusion par les systèmes de CFAO : les critères de choix Cahiers de Prothèse n° 161 du 01/03/2013; [cité le 21 janv 2020]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-161/la-gestion-de-l-occlusion-par-les-systemes-de-cfao-les-criteres-de-choix.html?query=%22La+gestion+de+l%E2%80%99occlusion+par+les+syst%C3%A8mes+de+CFAO+%3A+les+crit%C3%A8res+de+choix%22&re-vues%5B0%5D=CLl&revues%5B1%5D=CDP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 69. Park S, Kim M, Yoo J, Yoon J-H. Application of the functionally generated path technique in designing an implant-supported fixed prosthesis with CAD-CAM technology: A dental technique. J Prosthet Dent. oct 2019;S0022391319303610.
- 70. [En ligne]. K7 Brochure Myotronics PDF Catalogs | Technical Documentation; [cité le 15 déc 2019]. Disponible: https://pdf.medicalexpo.com/pdf/myotronics/k7-brochure/74768-118031.html
- 71. Rumerio A. Temps de pose de stens en occlusodontologie Neuro-musculaire. etude clinique préliminaire. Toulouse : Odontologie; 2014.

- 72. Dao TTT, Feine JS, Lund JP. Can electrical stimulation be used to establish a physiologic occlusal position? J Prosthet Dent. oct 1988;60(4):509-14.
- 73. Noirrit-Esclassan ME. CHARGÉSDE MISSION Mr Karim NASR. :75.
- 74. Jankelson B. Neuromuscular aspects of occlusion. Effects of occlusal position on the physiology and dysfunction of the mandibular musculature. Dent Clin North Am. avr 1979;23(2):157-68.
- 75. Pokorny PH, Wiens JP, Litvak H. Occlusion for fixed prosthodontics: A historical perspective of the gnathological influence. J Prosthet Dent. avr 2008;99(4):299-313.
- 76. Manchanda S, Bhawsar SV, Manchanda J, Ramchandani A. Recording Myocentric Relation in a Partially Edentulous Patient: A Case Report. J Int Oral Health JIOH. 2015;7(Suppl 2):92-5.
- 77. Aslanidou K, Kau CH, Vlachos C, Saleh TA. The fabrication of a customized occlusal splint based on the merging of dynamic jaw tracking records, cone beam computed tomography, and CAD-CAM digital impression. J Orthod Sci. 2017;6(3):104-9.
- 78. Abizmil Y. THESE POUR LE DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE. :66.
- 79. Ella B, Moreau E, Bayle E, Fortin T, Rouas P, Hauret L, et al. Chirurgie numérique guidée en implantologie orale. Une alternative pour les écueils anatomiques et chirurgicaux. Wwwem-Premiumcomdatatraitesod123-57556 [En ligne]. Elsevier Masson; 23 juill 2013 [cité le 29 févr 2020]; Disponible: https://www-em--premium-com-s.docadis.ups-tlse.fr/article/801309
- 80. Margossian P, Mariani P, Laborde G. Guides radiologiques et chirurgicaux en implantologie. Wwwem-Premiumcomdatatraitesod123-46604 [En ligne]. Elsevier Masson; 15 juin 2009 [cité le 29 févr 2020]; Disponible: https://www-em--premium-com-s.docadis.ups-tlse.fr/article/218848
- 81. Les différents types de guides chirurgicaux Article 3Dcelo [En ligne]. 3D Celo. 2018 [cité le 29 févr 2020]. Disponible: https://www.3dcelo.com/2018/03/05/les-differents-types-de-guides-chirurgicaux/
- 82. Arcuri L, Vico G, Ottria L, Condo R, Cerroni L, Mancini M, et al. Smart fusion vs. Double scan: A comparison between two data-matching protocols for a computer guided implant planning. Clin Ter. 1 mai 2016;167:55-62.
- 83. blueskyplan [En ligne]. Logiciel d'implantologie Dentaire Gratuit | France | Blue Sky Plan; [cité le 1 mars 2020]. Disponible: https://www.blueskyplan.com/france
- 84. Miller EL, Bodden WR, Jamison HC. A study of the relationship of the dental midline to the facial median line. J Prosthet Dent. juin 1979;41(6):657-60.
- 85. Cattoni F, Mastrangelo F, Gherlone EF, Gastaldi G. A New Total Digital Smile Planning Technique (3D-DSP) to Fabricate CAD-CAM Mockups for Esthetic Crowns and Veneers. Int J Dent. 2016;2016:1-5.
- 86. Coachman C, Georg R, Bohner L, Rigo LC, Sesma N. Chairside 3D digital design and trial restoration workflow. J Prosthet Dent. janv 2020;S002239131930695X.
- 87. Scanning [En ligne]. Mangano F, Mangano C, Margiani B, Admakin O. Combining Intraoral and Face Scans for the Design and Fabrication of Computer-Assisted Design/Computer-Assisted Manufacturing (CAD/CAM) Polyether-Ether-Ketone (PEEK) Implant-Supported Bars for Maxillary Overdentures; 2019 [cité le 29 oct 2019]. Disponible: https://www.hindawi.com/journals/scanning/2019/4274715/
- 88. [En ligne]. Dentistry Journal | Free Full-Text | Dental Restorative Digital Workflow: Digital Smile Design from Aesthetic to Function; [cité le 11 juin 2019]. Disponible: https://www.mdpi.com/2304-6767/7/2/30

- 89. Revilla-León M, Raney L, Piedra-Cascón W, Barrington J, Zandinejad A, Özcan M. Digital workflow for an esthetic rehabilitation using a facial and intraoral scanner and an additive manufactured silicone index: A dental technique. J Prosthet Dent. juill 2019;S0022391319302318.
- 90. [En ligne]. Étude esthétique à travers l'application EASY© Cahiers de Prothèse n° 2019 du 01/07/2019; [cité le 13 janv 2020]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-2019hs/etude-esthetique-a-travers-l-application-easyc-Transversal\_2019\_P21-P24.html?query=cfao+occlusion&revues%5B0%5D=CLI&revues%5B1%5D=CDP&page=2&bypage=25&sortby=date
- 91. Ye H, Wang K-P, Liu Y, Liu Y, Zhou Y. Four-dimensional digital prediction of the esthetic outcome and digital implementation for rehabilitation in the esthetic zone. J Prosthet Dent. août 2019;S0022391319302884.
- 92. Savino T. La fabrication additive en odontologie: applications et perspectives. 2018;93.
- 93. Le projet esthétique en dentisterie adhésive Cahiers de Prothèse n° 173 du 01/03/2016 [En ligne]. [cité le 11 nov 2019]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-173/le-projet-esthetique-en-dentisterie-adhesive-CDP\_173\_P31-P45.html?query=%22analyse+diagnostique+d%27un+traitement+esth%C3%A9tique%22&revues%5B0%5D=CLI&revues%5B1%5D=CDP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 94. Quentin Projet esthétique virtuel `` comparaison des outi.pdf [En ligne]. [cité le 3 juin 2019]. Disponible: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01494608/document
- 95. [En ligne]. Retour sur un « live patient course » Cahiers de Prothèse n° 186 du 01/06/2019; [cité le 11 nov 2019]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-186/retour-sur-un-a-livea-patient-course-a-CDP\_186\_P145-P157.html?query=sourire+types&revues%5B0%5D=CLI&re-vues%5B1%5D=CDP&page=1&bypage=25&sortby=date
- 96. [En ligne]. The application of parameters for comprehensive smile esthetics by digital smile design programs: A review of literature | Elsevier Enhanced Reader; [cité le 18 nov 2019]. Disponible: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1013905217300597?token=D7D3118521F82C319C782C4F63A7CC556854773BA1A366F5BBC555C043AF21EFB7B7E163AFD106DC4C2923B44E8AF8D6
- 97. Revilla-León M, Besné-Torre A, Sánchez-Rubio JL, Fábrega JJ, Özcan M. Digital tools and 3D printing technologies integrated into the workflow of restorative treatment: A clinical report. J Prosthet Dent. janv 2019;121(1):3-8.
- 98. Four-dimensional digital prediction of the esthetic outcome and digital implementation for rehabilitation in the esthetic zone. J Prosthet Dent [En ligne]. 2 août 2019 [cité le 10 janv 2020]; Disponible: https://www-sciencedirect-com-s.docadis.ups-tlse.fr/science/article/pii/S0022391319302884
- 99. Liu X, Yu J, Zhou J, Tan J. A digitally guided dual technique for both gingival and bone resection during crown lengthening surgery. J Prosthet Dent. mars 2018;119(3):345-9.
- 100. Passos L, Soares FP, Choi IGG, Cortes ARG. Full digital workflow for crown lengthening by using a single surgical guide. J Prosthet Dent. nov 2019;S002239131930527X.
- 101. [En ligne]. Apport combiné des techniques de cone beam et CFAO pour le maintien du profil d'émergence naturel dans les techniques d'extraction-implantation immédiate Cahiers de Prothèse n° 186 du 01/06/2019; [cité le 13 janv 2020]. Disponible: https://www.editionscdp.fr/revues/les-cahiers-de-prothese/article/n-186/apport-combine-des-techniques-de-cone-beam-et-cfao-pour-le-maintien-du-profil-demergence-naturel-dans-les-techniques-d-extraction-implantation-immediate-CDP\_186\_P101-P109.html?query=cfao+occlusion&revues%5B0%5D=CLI&revues%5B1%5D=CDP&page=2&by-page=25&sortby=date
- 102. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor\_aid: a new approach to digital shade management. Clin Res. 2017;17.

- 103. L\*a\*b\* CIE 1976. Dans: Wikipédia [En ligne]. 2019 [cité le 7 janv 2020]. Disponible: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=L\*a\*b\*\_CIE\_1976&oldid=162808742
- 104. L'Information Dentaire [En ligne]. Azogui A, Pomès B, Ibraimi D, Derman D. Le protocole eLAB dans la réalisation d'une restauration unitaire antérieure; [cité le 24 déc 2019]. Disponible: https://www.information-dentaire.fr/formations/le-protocole-elab-dans-la-realisation-d-une-restauration-unitaire-anterieure/
- 105. Tutoriel eLAB\_prime par Simon Legault du Canada [En ligne]. [cité le 7 janv 2020]. 9:01. Disponible: https://www.youtube.com/watch?v=oiAEQ5YY0pl&feature=emb\_rel\_pause
- 106. Fajri L, Berrada S, Merzouk N. L'articulateur dans l'étude pré-prothétique en Prothèse amovible partielle Partie 1. Actual Odonto-Stomatol. mai 2016;(276):4.
- 107. Ré J-P, Perez C, Giraudeau A, Ager P, El Zoghby A, Orthlieb J-D. Reconstruction of the curve of Spee. Stomatologie. 1 mai 2008;105(2):29-32.
- 108. [En ligne]. Résine composite injectable : une nouvelle technique Part I; [cité le 17 déc 2019]. Disponible: https://fr.dental-tribune.com/clinical/resine-composite-injectable-une-nouvelle-technique-part-i/
- 109. [En ligne]. (29) French Kiss; [cité le 8 janv 2020]. Disponible: https://www.face-book.com/photo.php?fbid=10218979664175197&set=oa.2448522355273301&type=3&theater&ifg=1
- 110. The injectable composite resin technique: minimally invasive reconstruction of esthetics and function. Clinical case report with 2-year follow-up. Quintessence Int. 9 sept 2019;50(9):712-9.
- 111. Shaalan OO, Abou-Auf E, El Zoghby AF. Clinical evaluation of flowable resin composite versus conventional resin composite in carious and noncarious lesions: Systematic review and meta-analysis. J Conserv Dent JCD. 2017;20(6):380-5.
- 112. Maillard A. Présentée et soutenue publiquement. :83.
- 113. Duret F, Duret É, Pelissier B. 8 L'apport du numérique à la dentisterie. :4.
- 114. [En ligne]. AnatoScope Digital Anatomy for Personalized Healthcare; [cité le 18 avr 2020]. Disponible: https://www.anatoscope.com/
- 115. Pour la sciences Hors Série. 2018.
- 116. Ça m'intéresse La curiosité en continu [En ligne]. Qu'est-ce que des prothèses intelligentes ? Ça m'intéresse; 30 déc 2018 [cité le 20 avr 2020]. Disponible: https://www.caminteresse.fr/sante/quest-ce-quedes-protheses-intelligentes-11106567/
- 117. Destruhaut, Pomar, Letellier Hennequin F P,T,A. Intelligence artificielle, médecine 4P et rééducation fonctionnelle de l'appareil manducateur . . Cahier de prothèse CDP N°189. 1 mars 2019;403-13.
- 118. Mesnard M, Zwetyenga N, Taiar R, Dubois G, Debrosses E, Lipinski P, et al. Réflexions sur la reconstruction prothétique de l'Articulation Temporo- Mandibulaire (ATM) à travers une étude biomécanique comparative entre sujets asymptomatique et pathologique. :200.
- 119. Pucheu D. L'altérité à l'épreuve de l'ubiquité informationnelle. Hermes Rev. C.N.R.S. Editions; 24 avr 2014;n° 68(1):115-22.

**NOM**: **VEYSSIERE** Christophe

Titre : Apport des technologies numériques dans la planification prothétique des réhabilitations de grande étendue.

## Résumé:

Les technologies numériques deviennent incontournables dans le monde de la dentisterie contemporaine. Les exigences esthétiques de plus en plus prégnantes dans nos sociétés, exigent du praticien une planification prothétique de plus en plus rigoureuse et précise. Ce travail présente les apports des technologies numériques pour répondre à ces objectifs lors de l'élaboration de réhabilitations prothétiques étendues. Nous détaillerons tous les moyens d'acquisitions de données numériques dento-faciales concernant le patient, première étape de la chaîne numérique prothétique : photographie numérique, scanner intrabuccaux, scanner faciaux, Cone Beam Computed Tomographie ; système d'enregistrement de la cinématique mandibulaire (Jaw Motion Tracking systèmes). Les nombreux avantages qu'offre la dentisterie numérique sont développés suivant l'OCTA, démarche de planification prothétique élaborée par J.D Orthlieb, pour des réhabilitations globales.

# Mots clés:

Planification, diagnostic, caméra intra buccal, technologies numériques, chaîne numérique, guide chirurgical, 3D, DICOM, STL, DSD, articulateur virtuel, arc facial virtuel.

Title: Bringing digital technologies to prosthetic planning for large-scale rehabilitations

# Summary:

Digital technologies are becoming a must in the world of contemporary dentistry. Aesthetic requirements, which are increasingly more prevalent in our societies, require the practitioner to be more and more rigorous and precise in prosthetic planning. This work presents the contributions of digital technologies to meet these objectives in the development of extensive prosthetic rehabilitations. We will detail all the ways of acquiring dentofacial digital data concerning the patient, the first step of the digital prosthetic chain: digital photography, intraoral scanner, facial scanner, Cone Beam Computed Tomography; Jaw Motion Tracking Systems. The many advantages of digital dentistry are developed according to OCTA, a prosthetic planning approach developed by J.D Orthlieb, for comprehensive rehabilitation.

<u>DISCIPLINE ADMINISTRATIVE</u>: CHIRURGIE DENTAIRE

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU LABORATOIRE:

UNIVERSITE III-PAUL SABATIER

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

3 chemin des Maraîchers

31400 TOULOUSE CEDEX 9

**DIRECTEUR DE THESE:** Docteur Antonin Hennequin