

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER

FACULTE DE SANTE

ANNEE 2021

2022 TOU3 3015

THESE

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

Présentée et soutenue publiquement

par

Maite FRAYSSE

le 17/02/2022

**La CFAO en prothèse amovible partielle
Etat de l'art en 2021-développement d'un workflow numérique au
cabinet**

Directeur de thèse : Dr Julien DELRIEU

JURY

Président : Pr Franck DIEMER

1er assesseur : Dr Jean CHAMPION

2ème assesseur : Dr Thibault CANCEILL

3ème assesseur : Dr Julien DELRIEU



Faculté de santé
ancienne Faculté
de Chirurgie Dentaire

➔ DIRECTION

DOYEN

M. Philippe POMAR

ASSESEUR DU DOYEN

Mme Sabine JONOT

Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

DIRECTRICE ADMINISTRATIVE

Mme Muriel VERDAGUER

PRÉSIDENTE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Mme Cathy NABET

➔ HONORARIAT

DOYENS HONORAIRES

M. Jean LAGARRIGUE +

M. Jean-Philippe LODTER +

M. Gérard PALOUDIER

M. Michel SIXOU

M. Henri SOULET

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*)

➔ PERSONNEL ENSEIGNANT

Section CNU 56 : Développement, Croissance et Prévention

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

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

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

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

Assistants : Mme Marion GUY-VERGER, Mme Alice BROUTIN (associée)

Adjoints d'Enseignement : M. Sébastien DOMINE, M. Robin BENETAH, M. Mathieu TESTE,

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

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

Assistants : Mme Isabelle ARAGON, M. Vincent VIDAL-ROSSET

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, M. Jean-Noël VERGNES

Assistante : Mme Géromine FOURNIER

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

M. Jean-Philippe GATIGNOL, Mme Carole KANJ

Section CNU 57 : Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

57.01 CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE (M. Philippe KEMOUN)

PARODONTOLOGIE

Maîtres de Conférences : 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, M. Matthieu RIMBERT,

CHIRURGIE ORALE

Professeur d'Université : Mme Sarah COUSTY
Maîtres de Conférences : M. Philippe CAMPAN, M. Bruno COURTOIS
Assistants : M. Clément CAMBRONNE
Adjoints d'Enseignement : M. Gabriel FAUXPOINT, M. Arnaud L'HOMME, Mme Marie-Pierre LABADIE, M. Luc RAYNALDY, M. Jérôme SALEFRANQUE,

BIOLOGIE ORALE

Professeur d'Université : M. Philippe KEMOUN
Maîtres de Conférences : M. Pierre-Pascal POULET, M. Vincent BLASCO-BAQUE
Assistants : M. Matthieu MINTY, Mme Chiara CECCHIN-ALBERTONI, M. Maxime LUIS, Mme Valentine BAYLET GALY-CASSIT
Adjoints d'Enseignement : M. Mathieu FRANC, M. Hugo BARRAGUE, M. Olivier DENY

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX (M. Franck DIEMER)

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeur d'Université : M. Franck DIEMER
Maîtres de Conférences : M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN, Mme Delphine MARET-COMTESSE
Assistants : M. Sylvain GAILLAC, Mme Sophie BARRERE, Mme. Manon SAUCOURT, M. Ludovic PELLETIER M. Nicolas ALAUX, M. Vincent SUAREZ
Adjoints d'Enseignement : M. Eric BALGUERIE, M. Jean- Philippe MALLET, M. Rami HAMDAN, M. Romain DUCASSE, Mme Lucie RAPP

PROTHÈSES

Professeurs d'Université : M. Philippe POMAR
Maîtres de Conférences : M. Jean CHAMPION, M. Rémi ESCLASSAN, M. Florent DESTRUHAUT, M. Antoine GALIBOURG,
Assistants : M. Bertrand CHAMPION, Mme Margaux BROUTIN, Mme Coralie BATAILLE, Mme Mathilde HOURSET Mme Constance CUNY
Adjoints d'Enseignement : M. Christophe GHRENASSIA, Mme Marie-Hélène LACOSTE-FERRE, M. Olivier LE GAC, M. Jean-Claude COMBADAZOU, M. Bertrand ARCAUTE, M. Fabien LEMAGNER, M. Eric SOLYOM, M. Michel KNAFO, M. Alexandre HEGO DEVEZA, M. Victor EMONET-DENAND M. Thierry DENIS, M. Thibault YAGUE

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Maîtres de Conférences : Mme Sabine JONJOT, M. Karim NASR, M. Paul MONSARRAT, M. Thibault CANCEILL
Assistants : M. Julien DELRIEU, M. Paul PAGES, Mme. Julie FRANKEL
Adjoints d'Enseignement : Mme Sylvie MAGNE, M. Thierry VERGÉ, Mme Josiane BOUSQUET, M. Damien OSTROWSKI

Mise à jour pour le 22 janvier 2022

Remerciements

A notre président de jury,

Monsieur le Professeur Franck Diemer

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- D.E.A. de Pédagogie (Education, Formation et Insertion) Toulouse Le Mirail,
- Docteur de l'Université Paul Sabatier,
- Responsable du comité scientifique de la Société française d'Endodontie
- 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
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier

*Vous nous faites l'honneur et le plaisir de présider cette thèse et nous
vous en remercions.*

*Merci de nous avoir fait bénéficier de la qualité de vos enseignements
théoriques et cliniques.*

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur Jean Champion

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur d'Etat en Odontologie,
- DU Implantologie de la Faculté de Chirurgie dentaire de Marseille,
- Diplôme d'Implantologie Clinique de l'Institut Bränemark – Göteborg (Suède),
- Vice-Président du Conseil National des Universités (section : 58),
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.
- Colonel de réserve citoyenne du service de santé des armées (CDC-RC)

Nous vous remercions de nous faire l'honneur de participer au jury de thèse.

Soyez sûr de notre pleine reconnaissance et de nos sincères remerciements pour vos enseignements et votre pédagogie.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur Thibault Canceill

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Master 1 Santé Publique : biostatistique, modélisation et méthodologie des essais cliniques
- Master 2 de Physiopathologie : du moléculaire au médical
- CES Biomatériaux en Odontologie
- D.U.de Conception Fabrication Assistée par Ordinateur en Odontologie (CFAO)
- D.U. de Recherche Clinique en Odontologie

*Nous tenons à vous remercier pour l'honneur que vous nous faites d'avoir accepté
de participer à notre jury de thèse.*

A notre directeur de thèse,

Monsieur le Docteur Julien DELRIEU

- Assistant Hospitalier-Universitaire
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- CES de Prothèse Fixée
- Master 1 de Santé Publique
- Master 2 Anthropobiologie intégrative

*Pour avoir accepté la direction de cette thèse et d'y avoir apporté votre
expérience et vos compétences.*

*Soyez assuré de notre considération pour vos qualités humaines et
professionnelles, vos enseignements théoriques et cliniques, et votre bienveillance
tout au long de la rédaction de ce travail.*

*Ces quelques lignes témoignent de l'expression de nos plus sincères remerciements et de
notre profond respect*

Table des matières

Remerciements	1
Table des matières	5
Introduction.....	7
Première partie : Plan de traitement	8
1. Rappel de prothèse amovible partielle	8
1.1 Classe d'édentements.....	8
1.2 Structures d'appui.....	13
1.3 Occlusion	15
2. Conception de la prothèse amovible partielle.....	17
2.1 La triade de Housset	17
2.2 Les crochets.....	19
2.3 Les attachements préfabriqués	23
2.4 Tracé de l'armature.....	23
2.5 Choix des dents prothétiques	25
2.6 Demandes du patient.....	26
3. Rappel du protocole traditionnel analogique de conception et de fabrication	27
Deuxième partie : Empreinte, scan et acquisition numérique	28
1. Différents moyens d'acquisition	28
1.1 La triangulation	29
1.2 L'imagerie confocale parallèle	29
1.3 Acquisition par utilisation des données du CBCT/scanner facial (24,25)	30
2. Avantages et inconvénients des empreintes numériques.....	30
2.1 Avantages.....	30
2.2 Inconvénients.....	31
3. Evaluation de la précision et déformation de l'empreinte comparé aux moyens analogiques.....	31
4. Enregistrement de l'occlusion et de la DVO idéale.....	33
Troisième partie : Conception par ordinateur	34
1. Logiciels de conception de PAP par ordinateur	34

2. Articulateur numérique de détermination de l'occlusion	35
3. Calcul de l'axe d'insertion – zone de dépouille / contre-dépouille	38
4. Détermination de la position du crochet et de la zone de rétention	39
5. Aide à la préparation, guide pour parallélisme, préparation à minima.....	40
Quatrième partie : Fabrication assistée par ordinateur	41
1. Procédés de fabrication	41
1.1 Techniques additives (20)	41
1.2 Techniques soustractives.....	42
2. Biomatériaux utilisés en PAP et système d'usinage en FAO.....	43
2.1 Matériaux utilisés pour l'armature	43
2.2 Selles et dents prothétiques	45
3. Précision et ajustement.....	45
Cinquième partie : Mise en place d'un workflow, protocole de séances.....	47
1. PAP d'usage	47
2. PAP post-extractionnelle.....	48
3. Conception et fabrication d'une couronne sur dent support de crochet d'une PAP préexistante.....	49
3.1 Cas où la dent support de crochet est encore présente	49
3.2 Cas où la dent support de crochet n'a plus de partie coronaire	49
Sixième partie : Avantages et limites	51
1. Avantages	51
2. Limites	52
3. Recul clinique précision – ajustement, acceptabilité par les patients, études in vivo .	52
Conclusion	54
Bibliographie	55
Table des illustrations	63

Introduction

La prothèse amovible partielle, ou PAP, dans le cadre du traitement d'un édenté partiel a deux objectifs qui sont en premier lieu de remplacer les dents absentes, mais aussi de conserver les dents restantes et les tissus environnants le mieux possible. Le traitement par prothèse amovible partielle est inclus dans une démarche de reconstitution globale des arcades dentaires. Il est important pour obtenir un résultat fiable et durable de remettre la bouche en bon état de santé avant de penser à remplacer les dents manquantes, car en effet la prothèse sera maintenue en bouche grâce aux dents restantes et en s'appuyant aux structures muqueuses environnantes.

L'indication thérapeutique première des prothèses amovibles partielles correspond aux contre-indications de la prothèse fixée et même si le développement de l'implantologie permet d'augmenter les possibilités de traitements par prothèse fixée, la prothèse partielle amovible reste un moyen de traitement incontournable pour les patients que ce soit pour des raisons médicales ou financières.

La prothèse amovible partielle est depuis de nombreuses décennies, voire des siècles (1–4), un des moyens fréquents de compenser des édentements partiels. La conception des prothèses a évolué progressivement dans le temps au fil de l'approfondissement des connaissances en médecine odontologique mais aussi du perfectionnement des techniques de réalisation et des propriétés des matériaux utilisés.

La technologie de conception et fabrication assistée par ordinateur a fait sa première apparition dans les années 80. Dans un premier temps, restreinte aux reconstructions unitaires, elle s'est petit à petit ouverte aux autres champs des sciences odontologiques parallèlement aux avancées techniques des processeurs informatiques mais aussi de la mise en place de système de mise en forme des matériaux. Les premiers essais de réalisation de prothèse amovible partielle coulée à l'aide de technologie de conception et de fabrication par ordinateur ont été faits au début des années 1990. Pendant longtemps limités uniquement à la conception de l'armature coulée et à sa fabrication, on observe depuis une dizaine d'année une multiplication des travaux de recherches sur l'application de la CFAO aux champs des PAP. Ces différentes avancées permettent d'envisager un workflow entièrement numérique de conception et fabrication d'une PAP pour les patients en 2021, sujet sur lequel portera cette thèse.

Première partie : Plan de traitement

Il existe plusieurs choix possibles lorsque l'on souhaite réhabiliter la bouche d'un patient souffrant d'édentement partiel : une des possibilités est une réhabilitation par solution implantaire, ou bien encore une prothèse sur couronne télescopique, choix fréquemment fait en Allemagne du fait du remboursement offerts par la plupart des mutuelles des patients. Cependant une solution fréquente de nos jours reste encore la prothèse amovible partielle principalement pour des raisons financières mais aussi dans des cas de contre-indication de la solution implantaire.

1. Rappel de prothèse amovible partielle

Avant de créer une prothèse partielle amovible, il est indispensable de connaître l'environnement dans lequel la prothèse devra s'intégrer. Un examen clinique approfondi des différentes structures buccales et dentaires est donc nécessaire pour orienter les choix thérapeutiques.

1.1 Classe d'édentements

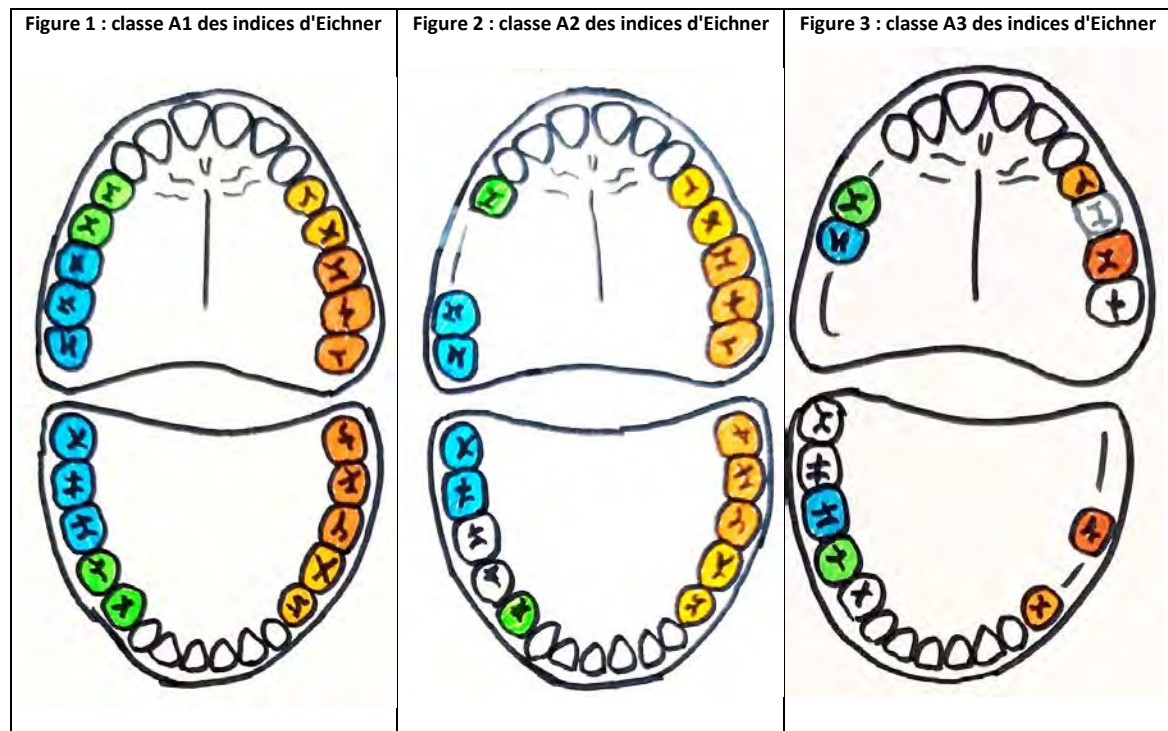
L'édentement est un état qui résulte d'une édentation. Il existe différentes façons de classer les édentements.

1.1.1. *L'indice d'Eichner*

L'indice d'Eichner est un ensemble de critères considérant la notion de calages postérieurs sous forme de groupes contacts qui prennent en compte les molaires et les prémolaires. Dans une bouche il y a quatre groupes contacts, deux molaires et deux prémolaires(5,6). Dans les schémas qui suivent, les dents sont colorées lorsqu'elles sont en occlusion, chaque couleur caractérisant un groupe contact distinct.

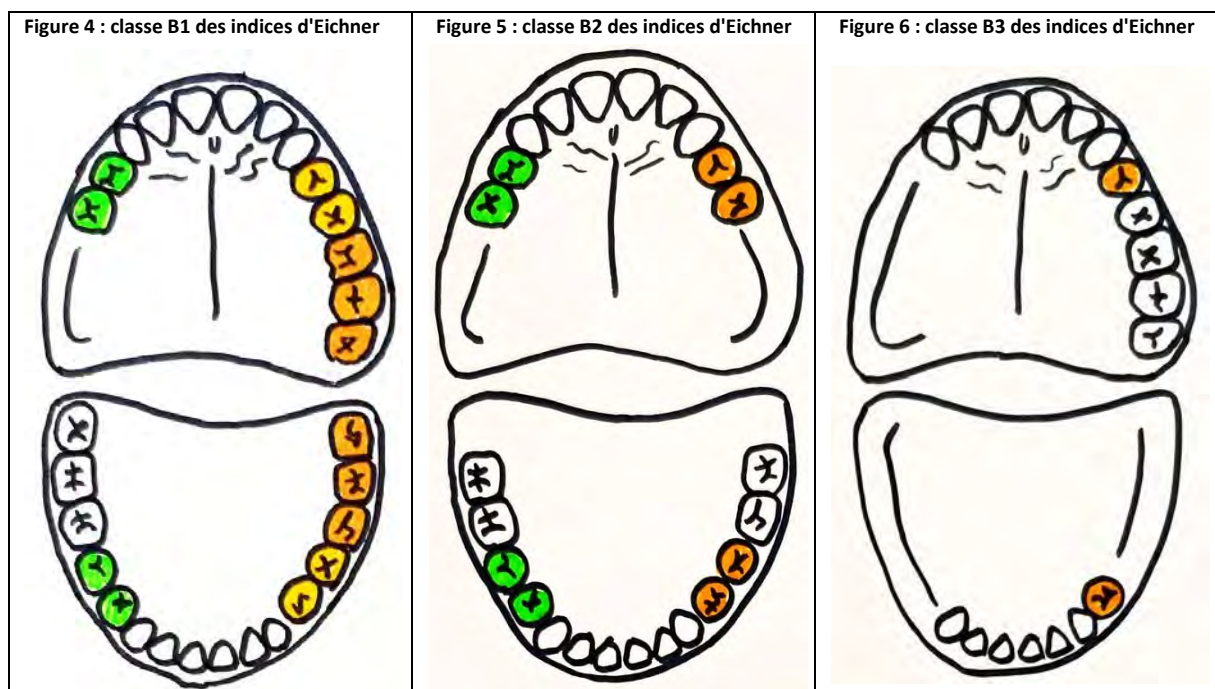
Catégorie A : les quatre groupes contacts sont présents

- A1 : toutes les dents sont présentes sur les arcades
- A2 : une ou des dents sont absentes sur uniquement une arcade
- A3 : des dents sont absentes sur les deux arcades



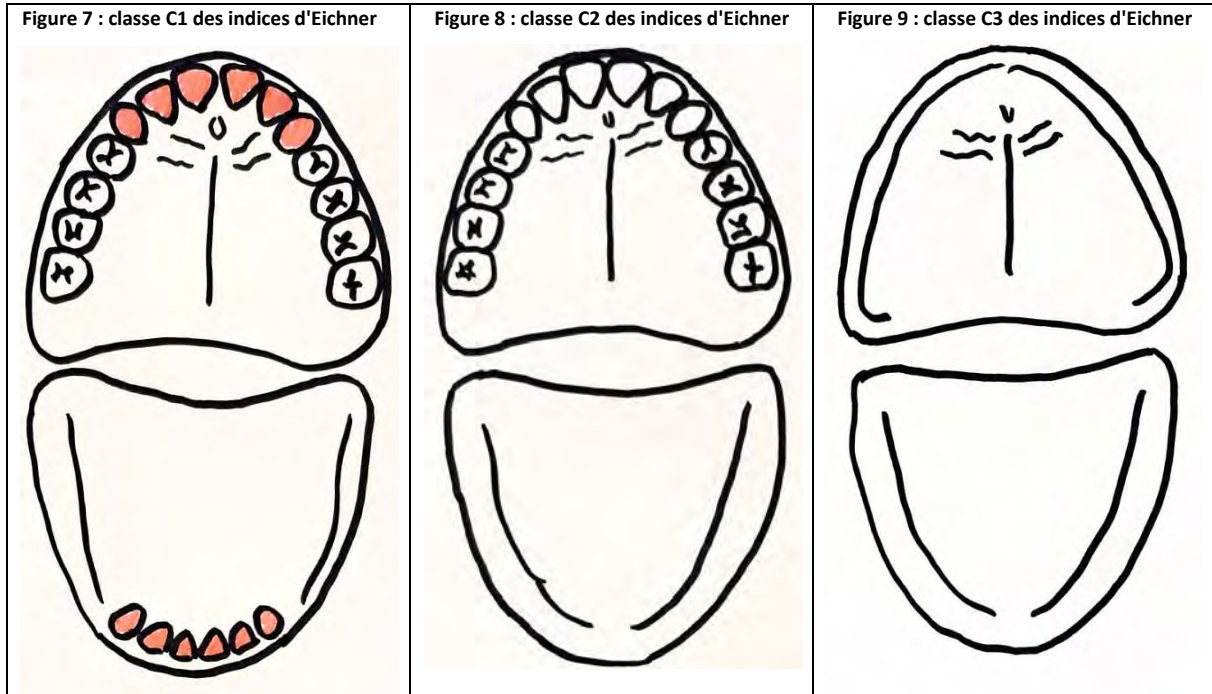
Catégorie B : il existe un à trois groupes contact uniquement en position antérieure

- B1 : dents manquantes sur les deux arcades avec trois groupes de contact présents en position antérieure
- B2 : dents manquantes sur les deux arcades avec deux groupes de contact présents en position antérieure
- B3 : dents manquantes sur les deux arcades avec un seul groupe de contact présent en position antérieures



Catégorie C : il n'existe plus de groupe de contact

- C1 : des dents sont présentes sur les deux arcades
- C2 : des dents sont présentes sur une seule arcade uniquement
- C3 : les deux arcades sont complètement édentées



1.1.2. La classification de Kennedy

Cette classification se fonde sur l'axiome qui privilégie les molaires car ce sont les dents qui permettent de stabiliser l'occlusion et qui sont essentielles à la fonction de mastication.(7) Les édentements sont donc classés en quatre classes selon qu'ils soient postérieurs, unilatéraux ou bilatéraux :

- classe 1 : édentement postérieur bilatéral

La zone édentée se trouve des deux côtés de l'arcade en postérieur des dents restantes. Le calage postérieur du patient est donc affecté négativement dans la plupart des cas.

- classe 2 : édentement postérieur unilatéral

Le patient est édenté d'un seul côté, cette asymétrie entre la proprioception majoritaire du côté denté de la bouche et l'extéroception majoritaire du côté édenté rend cette classe difficile à traiter. Cette asymétrie est aussi responsable de la présence d'un axe de rotation en travers de la bouche du patient rendant difficile l'acceptation du port de la prothèse amovible partielle (PAP).

- classe 3 : édentement intercalé
- classe 4 : édentement antérieur

Seules les dents antérieures sont absentes. Cependant la classification ne précise pas si on doit considérer les canines qui sont des dents très importantes pour la reconstruction prothétique car elles sont à la jonction entre le secteur antérieur et postérieur.

1.1.3. La classification de Kennedy-Applegate

La classification de Kennedy-Applegate correspond à la classification de Kennedy avec deux autres classes ajoutées par Applegate pour plus de précision. Cette classification est celle utilisée par la majorité des praticiens car elle permet une classification utilisant des repères anatomiques ainsi qu'une systématisation des principes de traitement par la prothèse amovible partielle. Cette classification comporte six classes d'édentements.

- classe I : édentement bilatéral postérieur aux dents restantes



Figure 10 : classe I de Kennedy-Applegate

- classe II : édentement unilatéral postérieur aux dents restantes

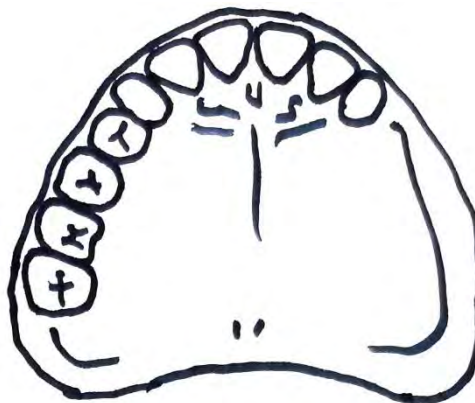


Figure 11 : classe II de Kennedy-Applegate

- classe III : édentement unilatéral encastré

L'édentement est limité de part et d'autre par des dents restantes.

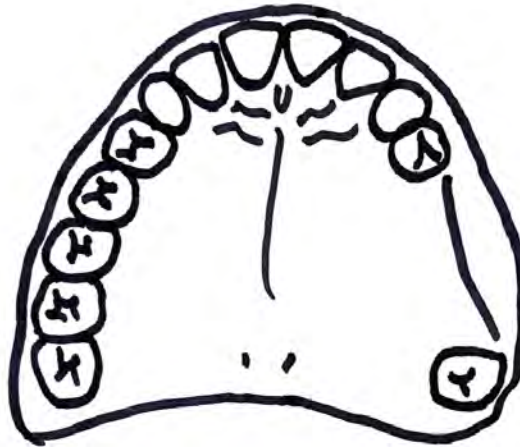


Figure 12 : classe III de Kennedy-Applegate

- classe IV : édentement antérieur aux dents restantes

L'édentement est situé de part et d'autre de l'axe médian de l'arcade dentaire.



Figure 13 : classe IV de Kennedy-Applegate

Les ajouts d'Applegate concernent la classe 3 de Kennedy qui est la classe des édentements unilatéraux encastrés, il propose deux nouvelles classes pour mieux la définir.

- classe V : édentement unilatéral limité de part et d'autre des dents restantes mais la dent antérieure ne peut pas servir de support de prothèse

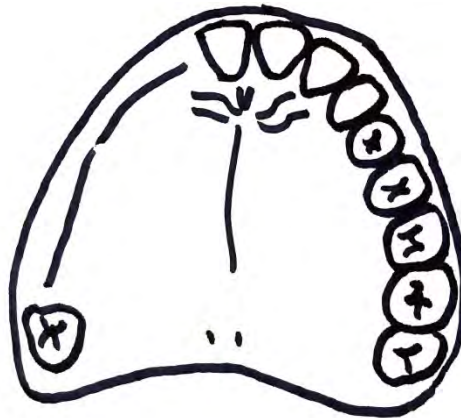


Figure 14 : classe V de Kennedy-Applegate

- classe VI : édentement unilatéral limité de part et d'autre par des dents qui peuvent assurer à elles seules le support de prothèse

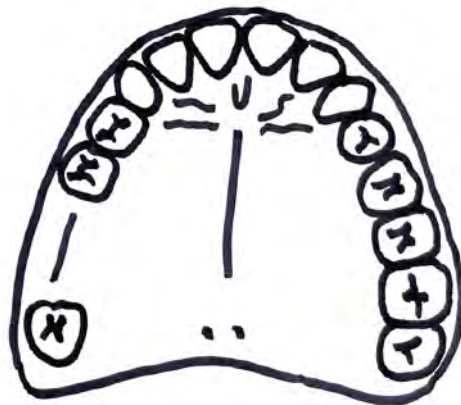


Figure 15 : classe VI de Kennedy-Applegate

1.2 Structures d'appui

1.2.1 Les indices de Housset

La connaissance du terrain se fait par un examen clinique des différentes structures d'appui. Différents critères sont à évaluer ils sont répertoriés en deux catégories les indices positifs et négatifs de Housset.

		Positif	Négatif
Commun aux deux arcades	Insertions ligamentaires		Freins latéraux et médians
	Insertions musculaires		Buccinateur
	Crêtes édentées	Forme en U Haute et large	En lame de couteau Morphologie en épines Zone de contre-dépouilles Crêtes flottantes
Mandibule	Ligne mylo-hyoïdienne	Position basse	Position haute
	Tori mandibulaires		X
	Frein de la langue		Insertion haute
	Eminences piriformes	Adhérente à l'os sous-jacent	Non adhérente à l'os sous-jacent
Maxillaire	Raphé médian	Forme plate	Forme en V en creux Forme en V en relief
	Zones de Schroeder		X
	Torus		X
	Papilles bunoïdes		X
	Voûte palatine	X	Sauf si plat ou ogival
	Papilles rétro-incisives		X
	Tubérosités		Sauf si contre-dépouille
	Jonction vélo-palatine	Nécessité de respecter cette limite en postérieur	

1.2.2. Dents, restes radiculaires

L'examen des dents et des restes radiculaires a pour but d'évaluer la valeur prothétique des dents restantes, afin de déterminer si elles pourront servir de support pour la prothèse, avec ou sans soins pré-prothétiques.

1.2.3. Parodonte

L'examen clinique de l'état de santé du parodonte permet d'estimer le niveau d'hygiène du patient, ainsi que de possibles mobilités dentaires. Si l'on détecte un problème au niveau des muqueuses et gencives ou une maladie parodontale celle-ci devra être traitée avant la réalisation de la prothèse amovible partielle.

1.3 Occlusion

Après l'examen clinique des surfaces d'appui de la prothèse, il faut ensuite examiner l'occlusion du patient. Cette étude de l'occlusion se fait en deux étapes, la première lors de l'observation clinique et la seconde grâce aux moulages des arcades montés sur articulateur.

La situation occlusale du patient est analysée afin d'estimer si elle est saine ou au contraire nécessite un traitement. En effet lors d'un édentement ancien, les dents ayant perdu leurs antagonistes ont tendance à égresser et entraînent ainsi une modification de l'occlusion du patient. Les dents jouxtant la zone édentée sur l'arcade vont se verser suite à la répartition des forces qui n'est plus équilibrée. Cette version peut provoquer des problèmes d'axes d'insertion, et donc nécessiter des traitements pré-prothétiques tels que des coronoplasties, réalisation de couronnes, voire avulsion afin d'obtenir un axe d'insertion cohérent et non iatrogène.

1.3.1 Courbes occlusales

Durant cette étape du traitement il faut établir un plan de référence occlusal dans lequel s'inscrivent, le mieux possible, les différentes courbes occlusales. Il faut tenir compte de deux courbes occlusales principales.

- la courbe de Wilson

La courbe de Wilson se situe dans le plan frontal et concerne les dents cuspidées (molaires et prémolaires). Elle décrit une courbe à concavité supérieure. Plus les dents cuspidées maxillaires sont situées en postérieur, plus leurs faces occlusales sont orientées vers l'extérieur. De façon correspondante, plus les dents mandibulaires sont postérieures plus les faces occlusales sont orientées vers l'intérieur de la cavité buccale.

- la courbe de Spee

La courbe de Spee est concave vers le haut dans un plan sagittal. Elle est définie comme la courbe antéro-postérieure des surfaces occlusales, partant de la canine et suivant les pointes cuspidiennes jusqu'au bord antérieur de la branche montante de la mandibule. Cette courbe est très importante et est souvent perdue lors d'un édentement ancien. Les dents ayant perdu leurs antagonistes vont, avec le temps, égresser afin de retrouver un contact occlusal, et la courbe de Spee sera perdue sur cette zone si l'édentement n'est pas compensé à temps. Il est très important d'orienter les grands axes des dents par rapport à cette courbe car cela permet de limiter la sollicitation du parodonte pour les dents naturelles et des structures ostéo-muqueuses pour les dents prothétiques.

- la courbe incisivo-canine

Il s'agit d'une troisième courbe aussi appelée ligne du sourire. Cette courbe, située dans un plan frontal comme la courbe de Wilson, est formée par les bords coronaires des dents antérieures (canines et incisives). Cette courbe est décrite une concavité supérieure au maxillaire. Cette courbe est primordiale pour l'esthétique du sourire.

1.3.2 Dimension verticale d'occlusion

La dimension verticale d'occlusion (DVO) est d'une importance majeure dans la reconstruction car elle guide les opérations prothétiques. La dimension verticale d'occlusion correspond à la hauteur de l'étage inférieur de la face lorsque les dents (naturelles et prothétiques) sont en occlusion d'intercuspidie maximale (OIM). Le visage humain présente une certaine harmonie entre les trois étages de la face. Pour les patients d'ethnie eurasiennne, ces étages sont de hauteurs comparables voire identiques. Les trois étages de la face sont :

- l'étage supérieur : du front jusqu'à l'ophryon ;
- l'étage moyen : du l'ophryon au point sous-nasal ;
- l'étage inférieur : du point sous-nasal au menton.

On peut grâce à des moyennes des mesures des différents étages définir une DVO du patient selon la méthode anthropométrique, en gardant à l'esprit les particularités personnelles de chaque patient.

Il est également possible de déterminer la DVO selon la méthode fonctionnelle, notamment chez les personnes âgées. On recherche donc la DVO par l'intermédiaire de la position de la mandibule par rapport au maxillaire lors de la déglutition et en fin de prononciation de certains phonèmes. Cette méthode se base sur la persistance d'un même schéma de mouvement mandibulaire tout au long de la vie d'un individu (8–10). Le cycle de déglutition commence de la position de repos de la mandibule pour ensuite s'élever jusqu'au point de contact inter-cuspidien puis retourne à sa position initiale de repos. Il a été déterminé que cette technique était autant fiable que les autres techniques de détermination de la DVO (11,12). Il reste cependant préférable de contrôler cette technique en la combinant à d'autres afin d'augmenter la fiabilité de détermination de la CVO et de limiter le risque d'erreurs(13).

Il est très important de définir cette hauteur car elle sert de référence pour toute la reconstruction prothétique. Elle doit être valide tant sur le plan esthétique, que fonctionnel afin de permettre un équilibre neuromusculaire qui serait perturbé en cas de sous, ou sur-évaluation de la DVO.

1.3.3 Guidage de propulsion et de diduction

Les mouvements de propulsion suivent un guidage antérieur, les bords libres des incisives mandibulaires glissant sur la face palatine des incisives maxillaires. Lors de l'observation clinique de la mandibule en mouvement de propulsion, il faut repérer les dents naturelles prenant en charge ce guidage, leur nombre ainsi que la qualité de leur ancrage parodontal. Il est également nécessaire d'observer la présence de toute interférence pouvant gêner ce mouvement comme un surplomb horizontal défavorable au guidage ou un recouvrement vertical trop important. Ces interférences doivent être prises en compte sinon elles risquent de déstabiliser la prothèse amovible partielle lors de mouvements durant la fonction du patient.

Les mouvements de diduction sont des mouvements de latéralité correspondant au déplacement de la mandibule vers la droite ou la gauche. L'observation de ces mouvements permet d'observer l'existence d'une protection canine, la présence des fonctions de groupe, et d'objectiver les guidages du côté non-travaillant.

D'un point de vue clinique, on observe ces différents guidages ensemble, on cherche à repérer dans l'usure des dents des points de contact excentrés, des facettes d'usures, des marques de bruxisme. On peut pour aider l'examen utiliser des marqueurs colorés (comme le papier à articuler) qui permettent de mieux visualiser les zones de contact entre les dents des deux arcades.

2. Conception de la prothèse amovible partielle

Une prothèse amovible partielle doit être portée tous les jours par le patient, il faut donc pour cela qu'elle lui permette de retrouver l'esthétique de son sourire (surtout si les dents sont situées en antérieur et présentes dans le sourire) mais aussi qu'elle soit confortable lors du port, d'où l'importance d'une bonne définition des limites de la prothèse. Enfin bien sûr, il faut que la prothèse soit suffisamment stable et rétentive pour que le patient puisse être en confiance lorsqu'il mange, parle, sourit, mais aussi permettre la désinsertion volontaire pour son entretien.

2.1 La triade de Housset

La prothèse amovible partielle est insérée et désinsérée plusieurs fois dans une journée il faut donc que ces mouvements n'altèrent pas les tissus dentaires et gingivaux du patient. Il

faut de plus que ces gestes soient facilement réalisables par le patient et ce *a fortiori* dans le contexte de sujets âgés qui sont plus souvent atteints d'édentement partiel, et dont la dextérité manuelle se détériore avec les années, rendant la mise en bouche et le retrait plus difficiles. Cependant les structures de rétention et de stabilisation doivent aussi être suffisamment efficaces pour éviter tout mouvement de la prothèse lors du port et de la fonction. Ces impératifs sont réalisés par l'association de trois forces : rétention, stabilisation, sustentation.

2.1.1 Rétention

Il existe plusieurs moyens pour obtenir la rétention d'une prothèse amovible partielle. De façon générale, on utilise les zones de contre-dépouille de la face vestibulaire des dents cuspidées, avec les crochets qui forment une rétention au niveau de ces zones de retrait. Les crochets doivent être réalisés dans un matériau présentant des propriétés élastiques, le bras du crochet doit pouvoir se déformer en s'ouvrant légèrement pour passer la ligne guide de la dent puis se positionner en retrouvant sa forme initiale dans la zone de contre-dépouille. La force nécessaire à la déformation du crochet permet de s'opposer à la désinsertion de la prothèse et contribue ainsi à la rétention. Il faut, pour avoir une bonne rétention ainsi qu'une mise en place facile, définir un axe d'insertion optimal qui permet de répondre à la fois aux attentes du patient tout en limitant au maximum les interventions pré-prothétiques pour conserver au mieux l'intégrité des tissus.(14)

2.1.2 Stabilisation

La stabilisation représente l'ensemble des forces qui s'opposent à la translation horizontale et à la rotation de la prothèse(15–17). Elle permet de résister aux forces horizontales s'exerçant sur la prothèse.

On distingue deux types de stabilisation :

- la stabilisation ostéo-muqueuse ;
- la stabilisation prothétique.

2.1.3 Sustentation

La sustentation représente l'ensemble des forces qui s'opposent à l'enfoncement de la prothèse (15–17). Elle est particulièrement importante lors des mouvements de mastication car elle s'oppose aux forces verticales s'exerçant dans le sens occluso-cervical.

On distingue deux types de sustentation :

- la sustentation muqueuse ;
- la sustentation dentaire et prothétique.

2.2 Les crochets

Les crochets sont les éléments de la prothèse amovible qui assurent la rétention, et peuvent participer à la sustentation et à la stabilisation. Ils constituent un élément majeur de l'équilibre de la prothèse qui doit être rigoureusement respecté. Ils sont indispensables à toute prothèse amovible partielle et peuvent comprendre une partie sustentatrice pour les crochets de prothèse amovible partielle coulée qui sont les taquets occlusaux.

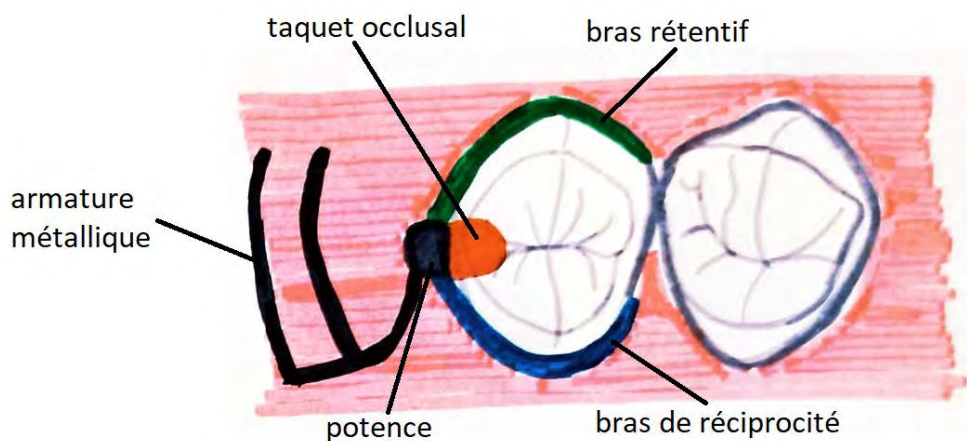


Figure 16 : crochet d'une prothèse amovible partielle

Les crochets sont des éléments du châssis métallique et comportent de façon générale trois parties :

- un bras rétentif : située du côté vestibulaire, l'extrémité rétentive du crochet se situe dans le dernier tiers du bras rétentif, sous la ligne guide.

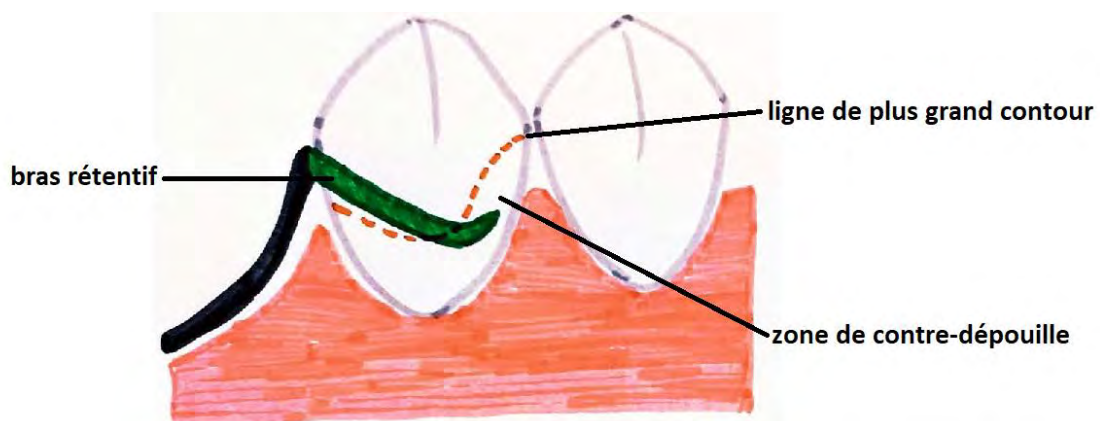


Figure 17 : positionnement du bras rétentif

- le taquet ou épaule du crochet : s'insère dans une logette préalablement préparée par le chirurgien-dentiste. Le taquet assure la sustentation de la prothèse partielle amovible coulée dans le sens où il empêche l'enfoncement de la prothèse. Il permet la transmission des forces occlusales à la dent, dans un axe qui se rapproche au plus possible du grand axe de la dent.
- le bras de réciprocité : situé du côté lingual à la mandibule et du côté palatin au maxillaire. Le bras se situe au-dessus de la ligne guide, et lutte contre les forces horizontales déployées par la partie rétentive du crochet lors de l'insertion de la prothèse amovible partielle. Le bras de réciprocité permet aussi la stabilité de la prothèse en évitant les mouvements horizontaux de la prothèse lors du port.

On peut ainsi observer que les éléments fondamentaux des principes de Housset sustentation, stabilisation et rétention sont retrouvés au niveau d'un crochet coulé de prothèse partielle amovible.

Il existe un grand nombre de crochets différents, mais la pratique a montré qu'un nombre réduit de types de crochets suffit à couvrir toutes les indications de traitement d'édentement partiel par prothèse amovible(5). Le choix du crochet se fait en fonction de son potentiel rétentif, de son absence d'effet scoliodontique et de son incidence sur l'esthétique.

Les crochets les plus souvent retrouvés sont :

- le crochet d'Ackers

Ce crochet correspond parfaitement à la structure théorique du crochet avec la rétention assurée par un bras vestibulaire dont l'extrémité flexible franchit la ligne guide pour ensuite se placer dans une zone de contre-dépouille. Le crochet présente aussi un taquet par l'extension occlusale de l'épaule du crochet qui rejoint la selle métallique au niveau du tiers occlusal en formant une embrasure qui sert à protéger la gencive marginale. Ce type de crochet est indiqué pour les segments encastrés (classe III). L'extrémité rétentive du bras du crochet se situe, lorsque les zones de contre-dépouille sont exploitables, sur la face vestibulaire de la dent support de crochet dans le secteur opposé à l'édentement(5). Ce crochet enserre la dent et est utilisé surtout sur les molaires (maxillaires et mandibulaires) car au niveau des canines et prémolaires il est souvent inesthétique.



Figure 18 : crochet d'Ackers

- le crochet de Nally-Martinet

Ce crochet est destiné principalement aux prémolaires et aux canines. Il présente un unique bras rigide prenant appui au-dessus de la ligne guide sur les trois quarts de la circonférence de la dent support de crochet. Son extrémité linguale est reliée à l'armature par une connexion mésiale se prolongeant par un taquet occlusal. La rétention est faite par l'extrémité vestibulaire qui franchit la ligne guide dans la partie mésio-vestibulaire. Ce crochet qui fait tout le tour de la dent du côté opposé à l'édentement est indiqué pour les édentements mandibulaires terminaux.

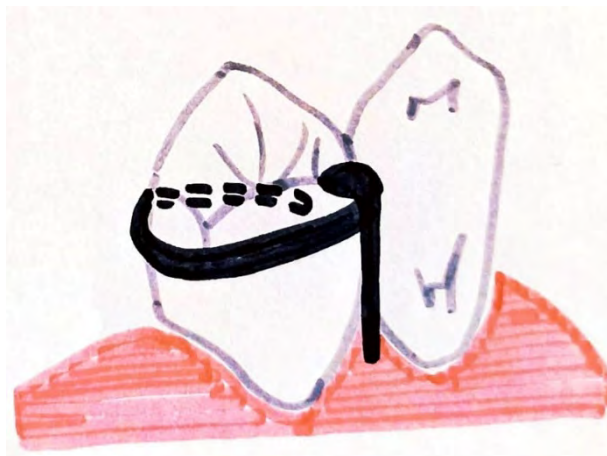


Figure 19 : crochet de Nally-Martinet

- le crochet en Y

Le contact du crochet avec la dent se fait au niveau de la ligne guide par deux bras plus ou moins divergents. Une des extrémités est située au-dessus de la ligne guide tandis que l'autre se trouve au niveau de la zone de contre-dépouille jouxtant l'édentement. Un taquet occlusal opposé au bras rétentif et une barre coronaire (ou cingulaire) sont

indispensables pour assurer la réciprocité et la stabilisation. Ce type de crochet est indiqué pour les classes I et II de Kennedy à la mandibule. Il est considéré comme plus esthétique car il vient du fond du vestibule et s'arrête sous la ligne guide de la dent, il est donc mieux dissimulé par la lèvre.

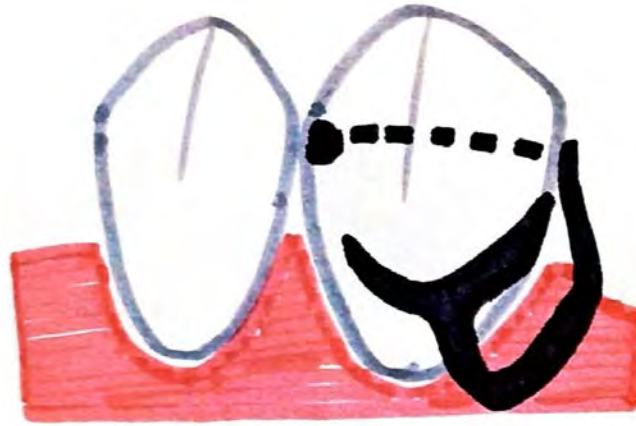


Figure 20 : crochet en Y

- le crochet en I

Il se constitue d'une simple barre dont l'extrémité vient en contact avec la surface de la dent dans une zone de contre dépouille le plus souvent située en distal. Un taquet occlusal ainsi qu'une barre cingulo-coronaire doivent être mis en place pour compenser le manque de stabilisation du crochet seul. Il est principalement indiqué pour des secteurs encastrés avec un appui dento-parodontal prédominant. Il est considéré comme un crochet esthétique grâce à son faible volume et sa position distale.

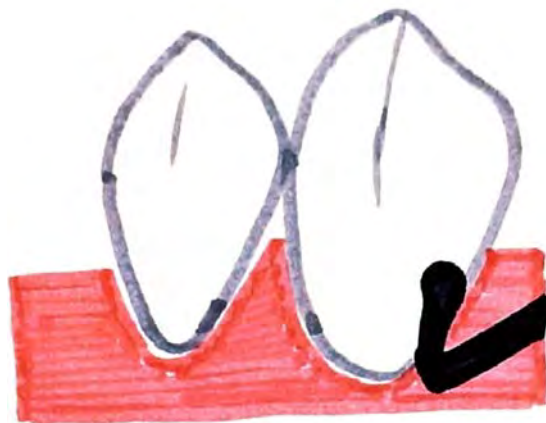


Figure 21 : crochet en I

2.3 Les attachements préfabriqués

Il existe de nombreux types d'attachement préfabriqués. Ils peuvent être extra-coronaires qui sont aussi les plus souvent utilisés, mais il existe également des attachements axiaux ou des barres. Leur utilisation ne doit cependant rien changer des étapes cliniques et de la conception des châssis des prothèses amovibles partielles conventionnelles avec des crochets.

Ces attachements préfabriqués constituent surtout un moyen de rétention qui permet de répondre à une demande esthétique du patient. Leur rôle est d'absorber les contraintes entre les dents supports et la prothèse tout en assurant une rétention.

2.4 Tracé de l'armature

Le tracé de l'armature dépend de l'importance de la perte des dents et de la situation des zones édentées, de différents facteurs anatomiques comme les brides musculaires, les tori, mais aussi de la musculature mandibulo-maxillaire (comme les insertions des freins et les insertions musculaires, (voir indices positifs et négatifs partie I-1)

Le tracé de la prothèse intervient à deux stades dans la conception de la prothèse partielle amovible. Dans un premier temps lors des moulages d'étude afin de décider des interventions pré-prothétiques, aider à la conception des possibles prothèses fixées et d'informer le patient, et dans un second temps au laboratoire de prothèse.

L'armature doit :

- contribuer à la rigidité du châssis ;
- dégager au maximum le parodonte marginal ;
- permettre une proprioception desmodontale la mieux répartie possible sur les dents de l'arcade ;
- limiter au maximum les potentiels axes de rotation de la base prothétique ;
- solliciter des informations extéroceptives le plus symétriques possibles pour permettre un équilibre neuromusculaire ;
- prévoir la connexion entre tous les éléments de rétention et de stabilisation.

Le tracé de la plaque s'appuie sur les indices biologiques de Housset, qui sont divisés en deux catégories : les indices positifs qui sont favorables à une bonne rétention, stabilisation et sustentation de la prothèse, et les indices négatifs qui y sont défavorables.

Au maxillaire :

Les limites de l'armature doivent éviter les zones d'indices négatifs de Housset qui sont :

- la région rétro-incisive qui contient une masse importante de tissu à éviter, les papilles rétro-incisives forment une émergence au niveau du palais antérieur avec un paquet vasculo-nerveux qu'il ne faut surtout pas comprimer. Il faut donc prévoir une zone de décharge pour que l'armature n'appuie pas de façon directe sur l'armature.
- la musculature périphérique notamment les insertions musculaires ainsi que l'insertion des freins.
- le raphé médian situé sur la ligne médiane du palais il peut jouer un rôle d'axe de rotation et déstabiliser la prothèse s'il est rentrant ou saillant.
- les zones de Schröder sont situées au tiers postérieur de la voûte palatine de part et d'autre du raphé médian. Il existe une variation d'épaisseur de muqueuse, et donc d'enfoncement, à ce niveau qui peut déstabiliser la prothèse.

Au contraire il existe des zones d'indice positif qu'il faut exploiter au maximum :

- les points de contacts permettent de stabiliser latéralement la prothèse.
- la ligne de crête des zones édentée permet d'augmenter la sustentation. D'où la difficulté de traiter des édentements très anciens car la ligne de crête a tendance à se résorber avec le temps.
- les tubérosités maxillaires situées au niveau postérieur du maxillaire sont utiles pour la sustentation et la stabilisation de la prothèse.

À la mandibule :

Les limites de l'armature doivent éviter les zones d'indices négatifs de Housset qui sont :

- le frein lingual, une prothèse dont les limites empiètent sur l'espace d'insertion du frein lingual sera déstabilisée lors de chaque mouvement de la langue et pourra léser les tissus et causer des douleurs de cette façon au patient.

- le frein labial situé au niveau des incisives centrales mandibulaires, si sa zone d'insertion n'est pas évitée le frein sera lésé par la prothèse et la prothèse pourra être déstabilisée lors de certains mouvements des lèvres.
- la gencive marginale, les limites de la prothèse au niveau vestibulaire doivent se situer à 1mm de la ligne de réflexion muqueuse.
- la masse linguale et le plancher buccal
- les brides musculaires vestibulaires
- les lignes obliques externe et interne ne doivent donc pas être dépassées car les muscles insérés sur ces lignes avec des brides musculaires risquent de désolidariser la prothèse amovible partielle de l'arcade mandibulaire.

Il existe aussi au niveau mandibulaire des zones d'indice positif qu'il faut exploiter pour assurer le meilleur maintien de la prothèse mandibulaire en bouche. Ces zones sont :

- le trigone rétro-molaire qui est une zone triangulaire située à l'arrière des molaires mandibulaires.
- la ligne de crête qui exactement comme au maxillaire permet d'augmenter la sustentation.
- les points de contacts qui stabilisent la prothèse latéralement de la même façon qu'au maxillaire.

2.5 Choix des dents prothétiques

Les dents prothétiques sont issues du commerce, elles existent en différents matériaux, notamment en résines PMMA, résines composites, et porcelaine. La très grande majorité des prothèses amovibles partielles sont réalisées avec des dents en résine qui permettent une équilibration occlusale plus facile, se lient de manière chimique à la résine de base (résine PMMA et certains modèles de dents en résine composite), et moins onéreuses, ce qui explique leur généralisation.

Les dents en résine possèdent comme autre avantage de ne pas produire de bruit lors du contact entre les dents à l'inverse des dents en céramiques qui sont plus bruyantes et produisent un son de claquement lors de la fermeture.

Il existe pour les dents prothétiques un large choix de taille, forme et de teinte permettant de choisir des dents correspondant le plus possible aux dents restantes ou perdues du patient

dans le but de restaurer un sourire naturel. Le choix de la teinte doit se faire avec l'aide du patient en présence d'une lumière naturelle à l'aide d'un teintier. Le choix de la forme des dents est surtout important pour les dents des secteurs antérieurs. Celle-ci a une influence sur l'esthétique et doit être déterminée par rapport à la forme du visage du patient, et aux dents naturelles du patient. Le choix de la taille des dents dépend surtout de la place disponible dans l'espace édenté.

Pour respecter au mieux l'esthétique, et mimer au maximum les dents naturelles, il est possible de maquiller les dents en résine si les dents restantes présentent une coloration non homogène et plus rare.

2.6 Demandes du patient

L'esthétique est une demande fréquente des patients. Elle peut parfois être difficile à combler en raison de l'âge du patient, de sa denture naturelle ou même en contradiction avec les exigences fonctionnelles du traitement. Il est donc indispensable de communiquer avec le patient et de le faire participer, notamment lors du choix de teinte. Il est très important de lui expliquer pourquoi certains éléments de la prothèse bien qu'inesthétiques sont nécessaires, mais aussi de le guider dans ces choix afin que le traitement choisi offre le meilleur pronostic tout en étant en adéquation avec les volontés, l'état de santé et les capacités financières du patient.

On peut aussi, lors de la réalisation de la prothèse, réaliser la mise en place des dents prothétiques en recréant des diastèmes afin de reproduire l'ancien sourire naturel du patient.

Les crochets sont un des obstacles majeurs à l'acceptation du traitement d'un point de vue esthétique par les patients. Il est donc possible d'utiliser des crochets plus discrets comme les crochets en T ou en I qui se situent dans des zones de retrait masqués par la lèvre, de sectionner une extrémité du crochet pour qu'il soit caché par le bombé de la dent support.

Dans le cas d'un refus d'un crochet, surtout pour les dents antérieures comme les incisives, il est parfois possible d'utiliser un attachement de précision. Il faut alors faire un compromis entre la solution offrant la meilleure satisfaction sur le plan de l'esthétique et le problème lié à la préparation, et donc la mutilation de dents potentiellement saines.

3. Rappel du protocole traditionnel analogique de conception et de fabrication

Au fauteuil	Au laboratoire
Phase préclinique : analyse clinique, examen exobuccal et endobuccal radiologique, évaluation DVO	
Prise d'empreinte primaire	
	Coulée des modèles d'études
	Analyse paralléliseur axe d'insertion
	Réalisation du PEI
Préparation coronaire	
Empreinte secondaire avec le PEI	
	Coulée de l'empreinte secondaire
	Fabrication du châssis de la prothèse
Essayage du châssis	
Bourrelets d'occlusion	
Empreinte tertiaire au niveau des selles	
Prise de teinte choix des dents prothétiques	
	Montage des dents prothétiques sur cire
Essayage de l'occlusion	
	Polymérisation de la prothèse +polissage
Pose	

Deuxième partie : Empreinte, scan et acquisition numérique

1. Différents moyens d'acquisition

La numérisation d'un objet est la transcription de son volume dans l'espace en information numérique. Historiquement deux types de méthodes ont été utilisées, avec ou sans contact physique. La première technique avec palpeur a été abandonnée il y a déjà de nombreuses années de par l'impossibilité de l'appliquer en pratique intraorale (18) (micro-palpeur piccolo Procera de Nobel Pharma devenu Nobel Biocare n'est plus commercialisé (19)).

La méthode privilégiée en chirurgie dentaire est donc une méthode sans contact sur le modèle optique. En pratique dentaire, l'utilisation de la lumière blanche est privilégiée (20).

L'empreinte optique se base sur l'utilisation d'une source lumineuse. Deux types de sources lumineuses peuvent être exploités pour l'empreinte optique(20).

- la lumière blanche : Elle est aussi appelée incohérente car elle est composée d'ondes électromagnétiques de différentes phases et longueur d'onde se déplaçant dans tous les sens de l'espace. Elle est produite par des LED dans les caméras optiques utilisant la lumière blanche.
- le laser : Ce rayonnement peut aussi être appelé lumière cohérente car les ondes électromagnétiques issues de la source sont en phase, de même longueur d'onde et se déplacent dans la même direction.

Le processus permettant de réaliser une empreinte à partir d'un rayonnement lumineux se base sur une réalisation de mesure de déformation. Le rayonnement lumineux envoyé sur l'objet à enregistrer est de caractéristiques connues (phase et longueur d'onde). L'objet ainsi éclairé va renvoyer une partie du rayonnement reçu. Cette partie de rayonnement réfléchi par l'objet est mesurée alors par une caméra. La mesure est analysée et comparée au rayon initial par le logiciel.

Dans l'univers de l'empreinte optique appliquée à la dentisterie, deux méthodes de mesure sont principalement utilisées par les logiciels.

1.1 La triangulation

La triangulation se base sur l'analyse d'un même objet depuis différents points de mesure afin d'en calculer les dimensions dans les trois sens de l'espace. Il existe plusieurs méthodes de conception de la triangulation.

- par projection de rayons lumineux : La caméra est constituée d'une partie qui émet une onde lumineuse matérialisée sous forme de lignes parallèles. Le rayonnement est déformé lors de sa réflexion sur l'objet. Une deuxième partie de la caméra est constituée d'une partie enregistrant la déformation de l'onde réfléchi. La tête de la caméra est, de par les organes, nécessaire à cette technique de taille plus imposante mais le logiciel de traitement est moins lourd de par une plus grande simplicité des calculs requis.
- par stéréophotogrammétrie : Il s'agit une variation de la technique traditionnelle de triangulation. La tête de l'appareil est constituée de deux caméras utilisant la lumière blanche. De façon similaire à la vision humaine où l'objet est perçu de deux points de vue distincts (œil droit et gauche) générant deux images d'un même objet légèrement différentes qui sont ensuite traitées par le cerveau afin d'en générer une perception en trois dimensions. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter que des « organes » minimales : deux caméras qui désormais, grâce à la miniaturisation et à leur démocratisation, rendent le coût de fabrication minime et permettent d'avoir une taille restreinte de tête de la caméra. Cependant la méthode de triangulation nécessaire pour ce type de caméra requiert une plus grande puissance du logiciel de traitement des données.

1.2 L'imagerie confocale parallèle

Le principe de l'imagerie confocale parallèle réside dans l'utilisation d'un rayonnement lumineux de type laser. La lumière laser est contrainte à l'aide d'une lentille optique et projetée sur l'objet à enregistrer. L'objet réfléchit le rayonnement lumineux qui entre par le sténopé situé juste devant le récepteur. Le sténopé est un dispositif optique constitué d'une plaque opaque percée d'un simple trou permettant de filtrer les rayons réfléchis provenant des autres plans de l'espace. Le récepteur acquiert une série d'images nettes dites in focus, situées sur les différentes profondeurs de champ sélectionnées.

Les caméras optiques actuelles fonctionnent actuellement soit avec un système d'acquisition point and click : une succession d'images se superposant soit par un système d'acquisition full motion avec une capture en continue à la manière d'une vidéo (20).

Dans la pratique actuelle plusieurs méthodes d'acquisition optique de la situation intra-orale du patient sont possibles :

- empreinte physique puis numérisation par empreinte optique scan chez le prothésiste ;
- empreinte physique, moulage en plâtre puis acquisition numérique chez le prothésiste ;
- empreinte numérique intra-orale directe.

Depuis quelques années grâce aux améliorations technologiques il est désormais possible de réaliser des empreintes numériques sur des surfaces étendues (21–23), ainsi que de soustraire de certains éléments qui étaient auparavant des obstacles majeurs tels que la salive. La plupart des caméras d'empreinte optique désormais sur le marché permettent de réaliser l'empreinte des arcades entières ainsi que de l'occlusion en scannant les faces vestibulaires en position d'intercuspédie maximale si une DVO satisfaisante est conservée avec suffisamment de bloc contact.

1.3 Acquisition par utilisation des données du CBCT/scanner facial (24,25)

Le CBCT fournit des informations tridimensionnelles sur la cavité orale du patient notamment certaines invisibles lors d'une empreinte intra-orale physique ou optique tels que les reliefs osseux. La possibilité de coupler une empreinte optique de la cavité orale d'un patient à celle de son CBCT présente de très nombreux intérêts en implantologie mais aussi en prothèse amovible car elle permet de modéliser les reliefs osseux restants ou d'estimer la crête osseuse cicatricielle en vue de réaliser une prothèse post-extractionnelle (25,26).

2. Avantages et inconvénients des empreintes numériques

2.1 Avantages

- Mesure la plus précise, pas de problèmes de déformation (23) ;
- Conservation facilitée, pas d'altération de l'empreinte, archivage ;
- Position plus ergonomique pour le praticien positionnement du dos droit pour regarder dans l'écran ;
- Possibilité de correction de l'empreinte sur une zone au lieu de tout recommencer en cas de bulle ou tirage sur une empreinte physique ;

- Plus confortable pour le patient, limite le réflexe nauséux ;
- Outil de communication avec le patient ;
- Gain de temps quand cette empreinte est comprise dans un workflow numérique (27,28) ;
- Communication praticien –prothésiste facilitée, plus rapide ;
- Elimine le transport physique de l’empreinte ;
- Pas de risque de contamination infectieuse ;
- Des modèles physiques de l’empreinte optique peuvent être réalisés au besoin.

2.2 Inconvénients

- Investissement financier et matériel pour le praticien ;
- Investissement en temps pour le praticien du fait de la longue courbe d’apprentissage (29) ;
- Certains systèmes de CFAO sur le marché sont « fermés » d’où l’importance du choix du matériel par le praticien ;
- Les techniques d’accès aux limites doivent toujours être réalisées ;
- Les cas nécessitant une empreinte anatomo-fonctionnelle ne peuvent être réalisés entièrement en empreinte numérique. Il sera nécessaire de réaliser l’empreinte anatomo-fonctionnelle de façon traditionnelle.

3. Evaluation de la précision et déformation de l’empreinte comparé aux moyens analogiques

La théorie de la prise d’empreinte numérique réside dans l’accumulation d’images d’un même objet depuis plusieurs points d’observation distincts et leur mise bout à bout avec une légère superposition afin de reproduire virtuellement le volume de l’objet numérisé. Cette technique pose un problème de « stiching » : avec chaque superposition une légère déformation de l’empreinte numérique se fait sur sa reconstruction virtuelle créant une déformation qui augmente parallèlement à la surface à enregistrer (30). Les empreintes arcades entières présentent donc un plus fort taux de déformation par rapport aux empreintes numériques se focalisant sur seulement une zone restreinte de l’arcade comme utilisée pour des reconstructions unitaires notamment.

Afin de limiter ce phénomène il est conseillé d’utiliser une caméra avec une zone d’enregistrement plus grande , prenant donc des images plus grandes elles aussi et d’enregistrer ainsi la surface en minimisant le nombre de superpositions causant la déformation (31). Les zones édentées présentent encore une difficulté pour les logiciels de

reconstitution tridimensionnelle de par leur manque de points caractérisant comme il peut exister sur les dents avec les cuspides et sillons. Pour les empreintes arcades entières, plus les zones édentées seront larges plus la précision sera impactée(32).

La qualité d'une empreinte numérique est analysée par sa capacité à reproduire en données numériques de la façon la plus fidèle possible l'objet numérisé. Pour cela on analyse deux valeurs : l'exactitude ou « trueness » qui est la distance de la mesure à la valeur « vraie » et la précision qui est la distance entre les différentes mesures, combinées ensemble, elles définissent l'« accuracy ». Plus le niveau d'« accuracy » est élevé pour une empreinte plus celle-ci est une reproduction fidèle de l'objet numérisé.

Il a été déterminé que dans la précision des empreintes numériques, les valeurs de « trueness » et « accuracy » sont similaires aux empreintes par méthodes conventionnelles par double mélange polyéther pour les empreintes de surface réduites mais inférieures pour les empreintes arches complètes (23,33), tout en restant dans le domaine de l'acceptabilité pour une utilisation clinique. De même on observe sur le temps une amélioration de la précision des empreintes numériques des arcades entières avec l'évolution de la technologie. Elles présentent depuis peu de temps une précision similaire ou supérieure aux empreintes par alginate mais encore légèrement inférieure aux empreintes par polyéthers pour les empreintes arcades complètes(32). On peut donc espérer une amélioration dans les années à venir de la précision des empreintes numériques d'arcades complètes leur permettant de rivaliser ou même de surpasser en précision les empreintes par polyéthers conventionnelles et ce même pour de larges zones édentées.

De la même façon, la déformation augmente au fur et à mesure de l'éloignement à l'image référence, endroit où commence l'enregistrement (22). Ainsi sur une empreinte où le début du trajet de la caméra commence au niveau du point inter-incisif, les zones postérieures molaires présenteront le plus fort taux de déformation par rapport à l'arcade réelle.

On observe alors du fait de ce « stitching » un motif de déformation de l'empreinte optique différent de celui des empreintes conventionnelles (33). Là où les empreintes physiques présentent une déformation relativement uniformément répartie sur la totalité de sa surface de l'empreinte quand elles sont réalisées correctement (en excluant donc les problèmes de tirage rendant une empreinte non exploitable d'un point de vue clinique), les empreintes numériques présentent une précision très forte sur les premières zones enregistrées par la caméra, tandis qu'inversement la déformation va augmenter en s'éloignant avec en conséquence la dernière zone enregistrée par la caméra présentant la plus grande déformation par rapport à l'arcade de référence.

4. Enregistrement de l'occlusion et de la DVO idéale

La dimension verticale d'occlusion, telle que définie dans la première partie 1.3.2, correspond à la hauteur de l'étage inférieur de la face lorsque les dents (naturelles et prothétiques) sont en occlusion d'intercuspidie maximale (OIM). Elle occupe un rôle majeur dans la reconstruction prothétique. Celle-ci en fonction de l'édentement du patient peut être conservée (catégorie A et B des indices d'Eichner) ou bien perdue (catégorie C des indices d'Eichner). Elle peut aussi avoir subi des modifications suite à la version de certaines dents ou à un bruxisme.

Il y a deux situations possibles :

- la DVO du patient est conservée et correcte car il reste suffisamment de blocs contacts

Dans ce cas l'enregistrement de l'occlusion est très simple après avoir réalisée l'empreinte optique de l'arche maxillaire et mandibulaire, il suffit de prendre une empreinte optique des dents du patient en position d'intercuspidie maximale. L'ordinateur peut alors se servir de cette empreinte pour positionner les deux arches en occlusion ou dans un articulateur numérique (30).

- la DVO du patient n'a pas été conservée ou n'est pas satisfaisante à cause de la perte des blocs contact

Dans ce cas, nous sommes obligés d'avoir recours à un montage en articulateur (30) qui peut être l'articulateur physique classique après l'utilisation de maquettes d'occlusion, ou bien à l'utilisation d'un logiciel d'articulateur numérique comme le MODJAW.

Troisième partie : Conception par ordinateur

La conception des châssis des prothèses amovibles partielles doit tenir compte de différentes notions de biomécanique, de fonctionnement neuromusculaire de l'appareil manducateur ainsi que de la psychologie du patient afin d'assurer une réussite du traitement.

Le châssis doit donc permettre la rigidité de la PAP, protéger au maximum le parodonte marginal en ayant l'appui le plus minime possible dessus et permettre une proprioception la plus symétrique possible afin que la prothèse soit bien tolérée lors de son usage. Sa conception doit limiter au maximum les axes de rotation de la prothèse. Les crochets de la prothèse sont conçus de façon simultanée avec le châssis. Le châssis sera donc une seule pièce comprenant les crochets nécessaires à la bonne rétention, sustentation et stabilisation de la prothèse en bouche. L'analyse des zones de dépouille et contre-dépouille permettant une bonne rétention de la prothèse sera faite par le logiciel de conception en fonction de l'axe d'insertion du châssis déterminé afin de positionner l'extrémité rétentive du crochet ainsi que les taquets occlusaux de manière optimale selon la triade de Housset (sustentation, stabilisation, rétention).

1. Logiciels de conception de PAP par ordinateur

La conception de PAP par ordinateur permet la visualisation directe du modèle ainsi que des différents composants de l'armature directement matérialisés sur l'écran permettant une approche qui gagne en rapidité (34).

Voici les trois principaux logiciels de CAO utilisés :

- Digistell est un logiciel de CAO dentaire spécialisé dans les prothèses amovibles fait pour les laboratoires de prothèse dentaire. C'est un logiciel qui fonctionne en système ouvert avec des fichiers au format Standard Tessellation Language (STL). Ce logiciel permet à l'heure actuelle de réaliser la conception des armatures des prothèses adjointes en permettant de calculer les zones de dépouilles et contre-dépouille ainsi que l'axe d'insertion optimal(35).
- Dental Wings fonctionne en système ouvert STL permet de nombreuses possibilités avec des modules complémentaires (prothèses conjointe, prothèse complète, prothèse amovible partielle, gouttière occlusale, orthodontie, modèle d'étude) avec un logiciel en chairside et un logiciel pour le laboratoire. Pour la PAP le logiciel permet la conception du châssis (36,37).

- 3shape dental system utilise et fonctionne avec des fichiers au format DCM, mais le système s'est ouvert en 2020 et permet depuis le logiciel d'exporter les fichiers au format STL si le praticien ou le prothésiste le désire (38). Il s'agit d'un logiciel complet et poussé permet de réaliser de nombreuses prothèses fixes ou amovibles, gouttières occlusales, orthodontie, modélisation sur articulateur. Le logiciel intègre aussi la plupart des dents prothétiques pour prothèses adjoindables disponibles sur le marché permettant aussi au laboratoire de réaliser l'occlusion et le montage des dents de la prothèse au sein de la même conception grâce à l'articulateur intégré du logiciel (39).

2. Articulateur numérique de détermination de l'occlusion

Les articulateurs virtuels sont des logiciels-outils capables de reproduire la relation inter-arcade et de simuler les mouvements de l'articulation dento-dentaire. Ils reproduisent les relations entre la base du crâne, la mandibule et les arcades dans les 3 plans de l'espace dans un environnement virtuel. Le premier logiciel d'articulateur virtuel a été créé dans la fin des années 90. La recherche et le développement sur ces logiciels ont énormément avancé durant la dernière décennie, le but étant désormais de pousser au-delà des limites de l'articulateur mécanique traditionnel. Des améliorations continues sont faites sur les articulateurs virtuels en parallèle des logiciels d'empreinte optique. Ils permettent désormais de réaliser des diagnostics occlusaux, des wax-up virtuels et des modifications d'anatomie dentaires afin d'essayer différentes occlusions sur le patient. Dans le domaine de la prothèse dentaire l'articulateur est un outil supplémentaire d'aide au diagnostic et à la réalisation du plan de traitement par le praticien, tout particulièrement lors du traitement de cas complexes avec une perte de la dimension verticale d'occlusion.

Il existe deux types principaux d'articulateur virtuel à ce jour (30):

- les articulateurs complètement ajustables (CA) : ils reproduisent exactement les trajectoires de la mandibule lors de ses différents mouvements grâce à la reproduction des mouvements masticatoires et extrêmes du patient ayant préalablement enregistré à l'aide d'un accessoire fixé relié au logiciel. Ce type d'articulateur est indiqué lors de morphologie occlusale complexe afin d'éviter des interférences occlusales lors des excursions de la mandibule. Le praticien peut introduire dans l'articulateur des informations spécifiques au patient sur sa dynamique occlusale et ses mouvements mandibulaires. Les CA capturent les mouvements du patient et les appliquent aux modèles d'arcades virtuels importés dans le logiciel permettant de passer directement en 4D. Les deux articulateurs CA disponibles sur le marché à ce jour sont MODJAW et JMAAnalyser+. Ces articulateurs CA permettent de dépasser les capacités des articulateurs mécaniques en permettant d'étudier les mouvements spécifiques au patient grâce à la cinématique des articulateurs virtuels.

- les articulateurs simulés mathématiquement (SM) : ce sont des articulateurs aux valeurs normées que l'on peut modifier si besoin dans les paramètres afin de reproduire les mouvements de la mandibule du patient. Les paramètres ajustables sont identiques aux articulateurs mécaniques : angle de Bennett, pente condylienne, dimension verticale d'occlusion (DVO), inclinaison de la table occlusale, les inserts de Bennett ainsi que les inserts condyliens. Ces articulateurs sont indiqués dans des cas où la relation inter-arcade est suffisante pour rétablir la morphologie occlusale. Leur grand avantage est qu'ils sont plus simples d'utilisation et souvent inclus dans la plupart des logiciels de CFAO les rendant donc plus démocratisés auprès des dentistes. Cependant ils ne permettent pas d'obtenir les mouvements individuels du patient.

L'étape de numérisation et de montage des modèles d'arcades sur l'articulateur est essentielle afin de reproduire correctement les mouvements occlusaux du patient. Il existe deux types de workflow afin d'obtenir le montage des arcades sur l'articulateur virtuel : direct et indirect(30).

Direct	Indirect
Empreinte optique des arcades	Empreinte analogique/physique
Enregistrement de l'occlusion statique et des mouvements en excursion de la mandibule	Montage sur articulateur mécanique
Transfert de la position de l'arcade maxillaire par rapport au crâne	Scan du montage des deux arcades
Montage virtuel des modèles sur l'articulateur	Transfert sur l'articulateur virtuel

La position d'intercuspidie maximale (PIM) et la relation centrée (RC) sont deux éléments essentiels dans une bonne réhabilitation par prothèse amovible partielle respectant la courbe occlusale idéale du patient. On sait que le workflow indirect permet de rendre visible les contacts occlusaux de manière plus précise que le papier à articuler (40). La précision de la PIM lors d'une empreinte numérique dépend de la zone scannée. Les relations au niveau du bloc antérieur sont plus précises qu'au niveau des blocs postérieurs. Pour des empreintes arcade entière, il est conseillé de réaliser plusieurs zones d'enregistrement de dimension 24mm x 15 mm (41) pour les caméra Lavas Cos, Zfx intrascan et Trios 3-Shape, avec le plus grand écart possible entre les zones d'enregistrement afin de minimiser le plus possible la déviation. Le plus souvent, il est conseillé de réaliser trois zones larges d'enregistrement : blocs postérieurs droite et gauche ainsi que le bloc antérieur (41). Il est aussi important de contrôler la pression exercée en PIM surtout au niveau du secteur antérieur, une pression trop forte peut fausser l'enregistrement de l'occlusion et mener à des problèmes de suroccclusion (42). Il est aussi important afin d'éviter un assemblage inadéquat de vérifier qu'il n'y ait pas de décalage au niveau du montage virtuel (43). Avec les caméras optiques couleur, il est

possible de réaliser l'empreinte des arcades une fois que les contacts ont été marqués au papier à articuler afin de vérifier les contacts et la mise en PIM sur l'articulateur virtuel (44).

L'arc facial virtuel est essentiel afin d'orienter les arcades en respectant le plan de référence (Plan de Camper) du patient. Ce plan de référence doit passer par trois points arbitraires ou anatomiques de la face du patient, deux postérieurs et un antérieur. Les points postérieurs déterminent alors l'axe de rotation de la mandibule. Il existe de nombreuses possibilités afin de pouvoir placer les arcades dentaires par rapport à la face du patient de façon numérique (30).

- Utiliser des images céphalométriques (CôneBeam, scanner ou IRM) : avec un positionnement point à point par superposition des fichiers du scan (DICOM) avec les empreintes numériques (STL) des arcades du patient. Cette technique est particulièrement utile en orthodontie ainsi qu'en prothèse maxillo-faciale.
- Scanner la position d'un marqueur en 6 positions avec une référence à la tête, à l'aide d'une caméra optique (45).
- Convertir une série de photo de la face en scan 3D, grâce à la photogrammétrie, avec un marqueur comme point de référence (46,47). Cette technique est à la base des procédés modernes d'arc facial numérique les plus utilisés car il permet d'utiliser des marqueurs cutanés comme la projection des condyles afin de déterminer arbitrairement un axe charnière transversal postérieur.
- Axiographie digitale (46) : technique utilisée à ce jour uniquement dans le cadre expérimental. Les modèles des maxillaires sont positionnés numériquement par rapport à des coordonnées fixes placées sur le crâne du patient pour être ensuite transférés sur un articulateur virtuel. Cette méthode représente une approche indirecte pour la construction d'un arc facial cinématique virtuel.
- Stéréophotogrammétrie (48) : un porte-empreinte avec une extrémité extérieure suffisamment grande est positionné sur l'arcade lors de la réalisation du scan optique de la face du patient. L'empreinte physique prise par le porte-empreinte en bouche est scannée et le rapport entre la face et les arcades est alors permis grâce au porte-empreinte modifier qui a été lui aussi numérisé. Cependant cette technique ne permet pas de se passer des empreintes analogiques.
- Photographies extra-orales standardisées (49) : il s'agit d'une technique simple pouvant être réalisée avec un logiciel de CFAO usuel par le dentiste. Cependant cette technique est très opérateur-dépendant car le praticien doit placer lui-même les marqueurs du plan de référence
- Modjaw (50) : c'est un logiciel remplaçant l'articulateur, l'arc facial et l'axiographe qui permet l'enregistrement des mouvements mandibulaires du patient. La reconstitution et l'étude des mouvements du patient sont alors possibles dans les 4 dimensions (30) (la 4^{ème} étant le temps, essentielle pour les mouvements en excursion). Le Modjaw est un articulateur virtuel complètement ajustable basé sur une technologie optique. Ce logiciel permet de calculer et de visualiser le plan d'occlusion du patient, les contacts

dentaires de façon dynamique, ainsi que les déterminants postérieurs : pente condylienne, courbe de Spee, angles de Bennett, permettant de localiser l'axe de rotation de la mandibule. Le Modjaw peut fonctionner en système ouvert avec des fichiers au format STL.

- JMAnalyser+ : c'est un articulateur complètement ajustable basé sur une technologie ultrasonore. Les mouvements de la mandibule sont enregistrés par des ultrasons. Le logiciel permet de visualiser la cinétique occlusale du patient, il peut réaliser les mêmes tracés qu'un axiographe et également enregistrer l'enveloppe limite des mouvements (51).
- Protar de Kavo du logiciel 3shape (39) : le 3shape dental system intègre dans son système de CAO la modélisation numérique de l'articulateur Protar de Kavo. Il permet d'analyser l'occlusion du patient et d'adapter la pièce à concevoir en fonction de celle-ci, en calculant les points de contact ainsi que leur force tant du côté travaillant que non-travaillant. Il s'agit d'un articulateur virtuel simulé mathématiquement. Il existe aussi des accessoires permettant de transférer la position exacte des modèles physiques montés sur articulateur physique vers l'articulateur virtuel du logiciel 3shape(52)

Les articulateurs virtuels présentent de nombreux avantages dans la pratique quotidienne. D'un point de vue clinique, ils permettent une simulation plus précise des données du patient avec un enregistrement de l'occlusion statique mais aussi dynamique, ainsi qu'une analyse de l'état de l'ATM dans le cas des articulateurs CA. La communication au sein de l'équipe est facilitée et la prise en charge des cas interdisciplinaires en est aussi améliorée. La transition d'une modélisation 3D à une modélisation 4D grâce à la reproduction des mouvements du patient est une réelle avancée technologique qui deviendra probablement une pratique commune bien que l'on manque encore de recul sur le sujet.

3. Calcul de l'axe d'insertion – zone de dépouille / contre-dépouille

La rétention de la prothèse est obtenue principalement en plaçant le bras des crochets de rétention dans les zones de contre-dépouille. L'extrémité des crochets est donc située sous la ligne guide et tous les autres éléments du châssis non rétentifs doivent donc se situer au-dessus ou à distance de cette même ligne.

Afin de déterminer cette ligne guide, un parallélomètre est utilisé dans le protocole traditionnel. Cet instrument permet d'analyser les zones de contre-dépouille afin de déterminer un axe d'insertion ainsi que les modifications nécessaires à apporter sur les dents restantes afin d'obtenir un axe d'insertion optimal de la prothèse.

La même démarche est possible de façon numérique lors de l'utilisation d'un parallélogramme numérique, les modèles numériques sont analysés par le logiciel qui affiche sur le modèle les zones de contre-dépouille avec un système de code couleur permettant de quantifier la profondeur de la zone en fonction de l'axe d'insertion déterminé.

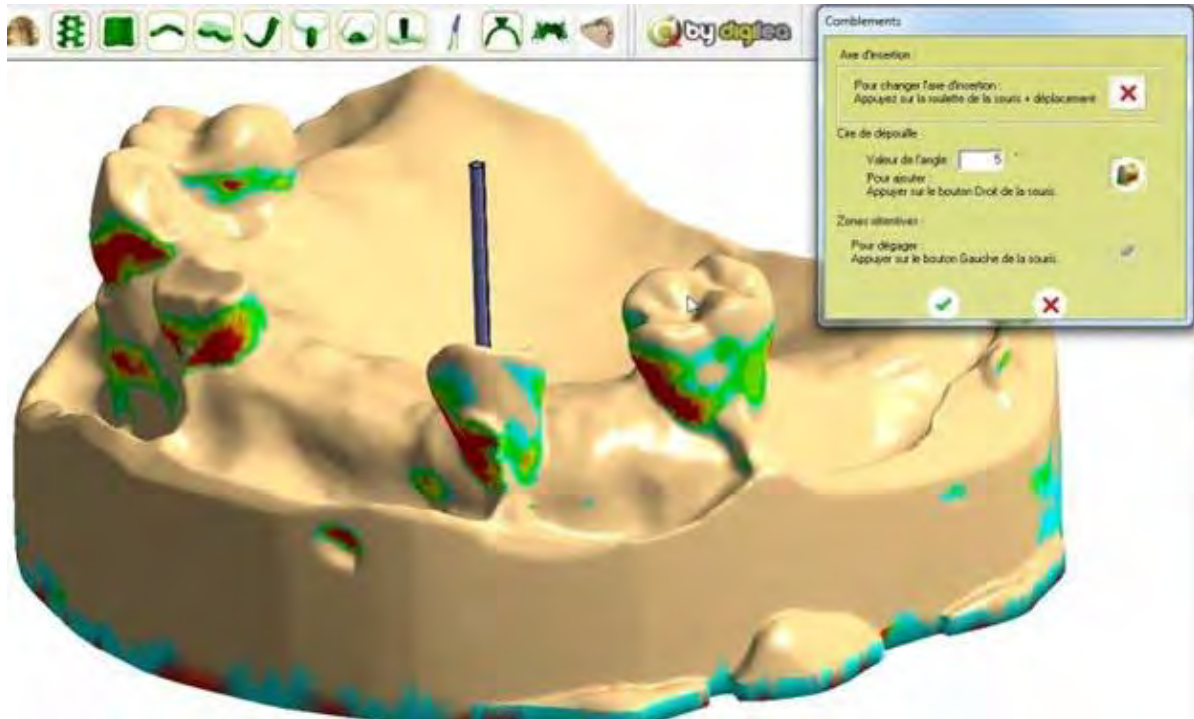


Figure 22 : visualisation des zones de contre-dépouilles sur le modèle numérique (54)

4. Détermination de la position du crochet et de la zone de rétention

Suite à l'analyse des zones de dépouille et contre-dépouille et l'axe d'insertion de la prothèse déterminé, le prothésiste peut commencer à modéliser le châssis de la future prothèse. Le logiciel suit les mêmes règles de conception de l'armature que lors de la réalisation du tracé par un praticien, le bras des crochets est positionné en fonction de ses impératifs (extrémité rétentive sous la ligne guide), il est possible de modifier le positionnement et d'augmenter ou diminuer la force de rétention grâce à la visualisation en couleur des différentes profondeurs de contre-dépouilles.

5. Aide à la préparation, guide pour parallélisme, préparation à minima

L'analyse des arcades au parallélogramme numérique permet de déterminer les zones de dépouille et contre-dépouille ainsi que leur intensité en fonction de l'axe d'insertion choisi. Il est donc possible de visualiser les zones nécessitant des préparations coronaires pré-prothétiques afin d'optimiser l'insertion, la stabilité et la rétention de la prothèse. Le logiciel permet aussi d'évaluer la quantité de retouches à réaliser ainsi que de modéliser la morphologie devant être obtenue. Il est alors possible de générer un guide de préparation qui permettra au praticien de réaliser des préparations à minima protégeant au maximum l'intégrité des tissus tout en optimisant le respect du parallélisme et de l'axe d'insertion assurant ainsi une meilleure fiabilité et prédictibilité de la réussite du plan de traitement (53).

Quatrième partie : Fabrication assistée par ordinateur

1. Procédés de fabrication

1.1 Techniques additives (20)

La fabrication assistée par ordinateur par addition revient à réaliser la pièce prothétique directement, ou un prototype qui sera ensuite transformé en métal généralement par méthode de la cire perdue. La pièce numérique conçue par CAO est découpée en plusieurs couches d'épaisseurs égales qui seront accolées les unes à la suite des autres lors de la réalisation de la pièce par addition. Par conséquent la précision de la pièce est directement impactée par l'épaisseur des strates de découpage et de réalisation, plus celles-ci sont fines et donc nombreuses plus la précision augmente. Les matériaux les plus fréquemment utilisés sont le métal, la résine et la cire. Il existe 4 techniques additives :

- La stéréolithographie SLA stereolithography apparatus (20,54)
Les strates sont réalisées par polymérisation successives d'une résine liquide photosensible à l'impact d'un faisceau laser. Le plateau de support de la pièce est immergé dans la résine et descend par incrémentation couche par couche au fur et à mesure de la polymérisation des strates.
- Stéréolithographie par polymérisation sélective (20,54)
Les strates sont réalisées par polymérisation d'une résine photosensible par l'émission d'une image lumineuse (.bitmap). Dans cette technique, ce sont les ultra-violets qui sont utilisés.
- Impression 3D par dépôt de matière fondue (20,54)
Les strates sont réalisées par le dépôt goutte à goutte d'un matériau en phase plastique qui se solidifie une fois déposé. Cette technique est surtout utilisée avec de la cire et de la résine afin de réaliser des prototypes, aussi appelées maquettes de fonderie. La fabrication de la pièce prothétique finale se fait selon le principe de la cire perdue. Si cette technique permet de limiter une partie des erreurs dépendantes de l'opérateur et de réaliser la pièce plus rapidement, elle ne permet cependant pas d'éliminer les problèmes liés à la coulée du métal et de la mise en moufle du modèle responsable de déformation, de bulles et d'autres défauts de coulée. Cette technique n'est donc plus à privilégier pour la réalisation du châssis d'une prothèse amovible partielle.

Des recherches sont faites actuellement sur la possibilité d'utiliser l'impression 3D pour réaliser des pièces en céramiques, permettant donc de limiter le gaspillage de matériel et de nouvelles applications (55,56).

- Fusion laser (20,54,57)

Pour les châssis métalliques des prothèses dentaires, nous utilisons la fusion laser sélective (SLM selective laser melting) sur un principe similaire à la stéréolithographie. Une poudre de métal sera soudée sous l'impact d'un faisceau laser. La poudre est étalée et impactée par le laser selon le tracé de la strate. Le plateau descend d'une incrémentation correspondant à l'épaisseur d'une strate tandis qu'un rouleau étale une nouvelle couche de poudre d'une épaisseur calibrée. Cette technique est utilisée avec des poudres de chrome-cobalt. Il s'agit de la technique de choix à privilégier pour la réalisation de châssis métallique car elle permet de limiter au maximum les erreurs opérateur-dépendantes mais est aussi plus économe en matériau puisque la poudre non-impactée peut être réutilisée.

Afin d'améliorer l'aspect ainsi que l'état de surface de la pièce prothétique certaines machines permettent un système combinant à la fois la FAO additive de la fusion laser avec la technique soustractive de l'usinage permettant une plus grande précision et ajustement de l'armature ainsi obtenue (58).

1.2 Techniques soustractives

La fabrication assistée par ordinateur par soustraction est une procédure qui va retrancher de la matière d'un bloc à usiner à l'aide de fraiseuses afin de sculpter la pièce prothétique à réaliser. Cette technique est principalement utilisée pour la céramique mais aussi pour des blocs de résines et de métal. La précision des pièces usinées dépend grandement du logiciel contrôlant les mouvements des fraiseuses mais aussi du nombre d'axes selon lequel elles peuvent usiner la pièce. Des blocs de Cobalt-Chrome pré-frittés peuvent être usinés en couronnes ou armatures. Cependant cette technique est contre-indiquée pour la réalisation de châssis de prothèses amovibles partielles du fait de la quantité de matière à soustraire et de la complexité de la forme de la pièce qui peut être, dans certains cas, incompatible avec les axes d'usinage de la machine.

2. Biomatériaux utilisés en PAP et système d'usinage en FAO

2.1 Matériaux utilisés pour l'armature

2.1.1 *Cobalt-chrome*

Le cobalt-chrome est un alliage avec une forte résistance à l'usure, il va être utilisé dans des situations où le frottement est important. L'utilisation de cet alliage pour une prothèse amovible partielle qui sera mise et retirée six fois par jour par le patient si celui-ci respecte les recommandations de son chirurgien-dentiste est donc indiquée. Un châssis réalisé en alliage cobalt-chrome par fusion laser a une meilleure microstructure que celui réalisé par coulée selon la technique de la cire fondue

2.1.2 *Titane*

Le titane est très biocompatible, résistant et léger. Ses propriétés mécaniques lui confèrent une légèreté et une rigidité qui sont supérieures à l'alliage traditionnel en cobalt-chrome. Ces caractéristiques en font donc un candidat de choix pour la fabrication de châssis mais sa trop grande rigidité augmente le risque de fracture au niveau de l'extrémité rétentive des crochets qui nécessite une certaine élasticité afin de pouvoir passer la ligne de plus grand contour régulièrement lors de l'usage fait par le patient. Cependant il a pendant longtemps été un matériau difficile à utiliser en prothèse dentaire du fait de son haut point de fusion pour les techniques par coulée. Pour les implants et les petites pièces unitaires, la technique soustractive est utilisée mais à l'échelle d'un châssis de prothèse amovible, l'usure des fraises et la complexité des formes à réaliser en limite fortement l'usage. La possibilité de pouvoir l'utiliser par frittage laser pourrait permettre la démocratisation de son utilisation dans le futur avec la défense du modèle de restauration dentaire « mono-métal » (58,60,61). Cependant l'apport d'un prothésiste bien formé dans les techniques de CFAO et la programmation de la machine de SLM vont se révéler essentiels car il a été démontré, par exemple, que l'orientation du faisceau laser lors de la construction des crochets impacte la microstructure et les propriétés de l'alliage (62).

2.1.3 *Hybrid processing*

L'hybrid processing est un procédé simultané de stéréolithographie laser et d'usinage à haute-vitesse qui est en essai de fabrication pour les armatures titane (LUMEX Avance,

Matsuura, Fukui, Japon). Les crochets produits ont alors une surface de contact plus lisse et les forces de rétention sont significativement meilleures que celles des crochet coulés (58,61). Le point négatif de la fusion laser conventionnelle est qu'elle utilise la plupart du temps des particules de 50 μm environ créant une surface rugueuse nécessitant le travail manuel du prothésiste afin de polir la pièce. Celle-ci perd de sa précision d'ajustement car le polissage soustrait de la matière et il est difficile de contrôler de manière constante la soustraction afin de compenser par un surdimensionnement de la pièce à produire. Cette fabrication hybride combinant addition et soustraction permet une génération précise de la pièce assortie de surface lisse ajustée de façon simultanée.

2.1.4 PEEK

Le polyetherkétone est un matériau aromatique thermoplastique de haute température. Le polyetherkétone est une molécule composée de plusieurs cycles aromatiques conférant au matériau une résistance mécanique similaire à l'os. Sous sa forme de polymère, il présente une structure semi-cristalline. Ce matériau est utilisé dans les chirurgies orthopédiques, mais aussi en tant qu'implant osseux de plaques crâniennes, et d'implants au niveau de la colonne vertébrale depuis les années 80. Le PEEK est inerte biologiquement avec d'excellentes propriétés physiques et biologiques, bien qu'il manque encore d'études à long terme, ce biomatériau semble adaptée à l'utilisation en tant que suprastructure en dentisterie telles que les armatures de prothèses amovibles partielles. Plusieurs avis contradictoires sont donnés à propos du PEEK comme biomatériau. Certains le trouvent plus esthétique de par sa blancheur, d'autres au contraire lui reprochent un manque d'esthétique pour la même raison. Il est plus biocompatible que le cobalt-chrome (qui a été classé comme présumé cancérigène (63)), suspecté plus durable bien qu'il n'y pas d'étude in-vivo au résultat significatif à ce jour et plus léger à volume équivalent (64). Le PEEK des propriétés mécaniques supérieures au PMMA mais encore légèrement inférieures aux alliages cobalt-chrome notamment pour la rigidité. Le PEEK modifié à visée médicale et biocompatible étant moins rigide, il est nécessaire afin de maintenir une bonne rétention de la PAP d'augmenter le volume des crochets et du châssis pour compenser la souplesse du matériau. L'existence d'autres types de PEEK modifiés avec différentes applications laisse présager des possibilités d'amélioration des propriétés mécaniques du PEEK biocompatible qui lui permettront de rivaliser avec le cobalt-chrome. Les châssis réalisés en PEEK sont plus précis s'ils sont réalisés par fraisage que par technique de cire-perdue (65).

2.2 Selles et dents prothétiques

Le polyméthylméthacrylate est le polymère du monomère de méthylméthacrylate (PMMA). Il est le polymère de choix pour réaliser les selles et les dents prothétiques des reconstructions adjacentes. Le PMMA peut être fondu et coulé par compression. Cependant en dentisterie, on préférera utiliser la thermo-pression des particules de PMMA partiellement polymérisées qui sont mélangées avec des monomères colorants et d'autres adjuvants entraînant une réaction sur le modèle du radical libre à température ambiante. Cette réaction est ensuite complétée par une cuisson à 100°C (66). Un polymère hétérogène est donc issu de cette procédure avec des monomères de MMA emprisonnés entre la matrice de PMMA polymérisée, ces monomères pouvant potentiellement être relargués dans la salive du patient provoquant une irritation de contact des muqueuses si la concentration est suffisamment élevée. Le PMMA se charge d'eau lorsque la prothèse est portée en bouche. L'eau contenue peut affecter la dimension du polymère impactant par conséquent l'ajustement et la tenue de la prothèse en bouche. Il s'agit cependant d'une déformation minimale pouvant être considérée comme non-significative dans la plupart des cas (67–69).

Pour les dents, il est possible d'utiliser également le PMMA avec quelques adjuvants permettant d'améliorer légèrement sa résistance mécanique, notamment à l'abrasion, et des pigments afin d'obtenir une teinte de dent acceptable.

Contrairement aux techniques de coulage-pressage, les méthodes de fabrication d'éléments en PMMA par CFAO se basent sur les principes de stéréolithographie ou d'usinage. La composition chimique du PMMA produit par FAO est similaire au PMMA conventionnel obtenu par cuisson. Le PMMA travaillé par soustraction en FAO présente des propriétés physiques améliorées sur notamment la dureté, la force de flexion, le module de flexion et la force d'impact (70). La polymérisation de PMMA dans des conditions industrielles, puis son usinage par FAO permet d'obtenir des propriétés mécaniques supérieures, augmentant par là même, la durabilité de la prothèse obtenue dans le temps en réduisant son taux d'usure (71). Pour ce qui est de la biocompatibilité le PMMA produit par CFAO est identique au PMMA conventionnel avec un taux de relargage de monomère similaire (72). Il faut cependant noter que le PMMA produit par FAO présente une hydrophobicité et des propriétés de surface supérieures limitant donc l'accumulation de plaque en surface et une adhérence moindre du *Candida albicans* (73). Les prothèses réalisées avec du PMMA produit par CFAO permettent donc de réduire le risque de stomatites prothétiques. (67)

3. Précision et ajustement

Les études in-vitro tendent à montrer un ajustement des armatures améliorées par production CFAO par rapport aux armatures réalisées de façon conventionnelle. Les

propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés (cobalt-chrome, titane, PEEK et PMMA) présentent de meilleures propriétés mécaniques que lorsqu'ils sont fabriqués de manière conventionnelle (59) grâce à une meilleure homogénéité, un meilleur contrôle des proportions de monomères/polymères, pour le PMMA notamment, ou même de la structure cristalline du matériau notamment pour les métaux avec la fusion laser.

Il a été observé un meilleur ajustement des bases résines produites par CFAO que celles par technique conventionnelle dû à l'absence de contraction de prise lors de la cuisson puisque les bases sont réalisées par usinage dans un bloc déjà polymérisé (74). De la même manière, les dents prothétiques n'étant pas placées dans le moule avec la résine PMMA rose à l'état plastique, elles ne subiront pas de déplacement lors de la contraction de prise de la résine pendant la polymérisation. L'occlusion est donc mieux respectée permettant alors un meilleur calage et donc un confort accru, et une plus grande puissance masticatoire lors de l'usage de sa prothèse (74–77).

Cependant l'assemblage des trois éléments constituant la PAP et leur attachement ne se fait pas comme pour les prothèses conventionnelles par rétention chimique et mécanique lors de la prise de la résine des selles mais par ajustement des pièces s'emboîtant à la manière de pièces de puzzles. Le joint/jonction entre les dents prothétiques et la selle résine est réalisé par un adhésif de type composite. Ce joint est donc de moins bonne qualité, et le risque de décollement s'en trouve accru (74,78).

Cinquième partie : Mise en place d'un workflow, protocole de séances

1. PAP d'usage

Pour des cas complexes il peut être envisagé d'associer le protocole classique par CFAO à d'autres techniques numériques de pointe. Il est possible de superposer les empreintes du maxillaire et de la mandibule à un CBCT (25,79), d'évaluer l'occlusion en mouvement grâce à des logiciels d'articulateur et d'enregistrement de l'occlusion (Modjaw). Mais aussi d'associer ces empreintes à une analyse photographique du patient sur les mêmes modalités que le Digital Smile Design en dentisterie esthétique (25,80).

Au fauteuil	Au laboratoire
Empreinte optique et RIM	
Si nécessaire mise en articulateur numérique avec Modjaw	
Associer à un CBCT moyen champ	
Associer photographies face, ¾ face et profil du patient	
	Analyse des empreintes numériques afin de déterminer l'axe d'insertion de la prothèse et le positionnement idéal des crochets afin de préparer à minima les dents support
	Analyse complémentaire si besoin afin de rétablir occlusion optimale, ou smile design
Préparation coronaire et modification des empreintes sur les zones retouchées	
Prise de teinte (immédiate par logiciel 3shape)	
	Conception de l'armature, occlusion et selles trois éléments à coller avec une résine auto polymérisable : - armature en CoCr fritté(81) ou en PEEK(82) - selles en PMMA usiné - dents en PMMA usiné (78,83)
Pose de la prothèse	
Rdv de suivi et retouche si nécessaire	

2. PAP post-extractionnelle

A l'heure actuelle, et à notre connaissance, il n'existe pas de logiciel capable de concevoir des prothèses amovibles partielles immédiates. Cela requiert donc le développement de procédures originales afin d'étendre les indications de dentisterie digitales actuelles à ces situations cliniques (80,84,85). L'avantage de la technique de prothèse post-extractionnelle immédiate est qu'elle permet de limiter le risque d'extraction de la dent lors de la prise d'empreinte à l'alginate lors du protocole conventionnel s'il s'agit d'une dent avec une forte mobilité. Elle permet aussi d'éviter une période pour le patient où les édentements ne sont pas remplacés entre les extractions et la pose de la prothèse. Il peut aussi être envisagé d'associer cette technique réalisée uniquement avec des empreinte optique à un CBCT afin d'évaluer le relief osseux post-extractionnel et réaliser immédiatement une prothèse dont l'assise sera adaptée à l'anatomie du patient (25,26).

Au fauteuil	Au laboratoire
Empreinte optique maxillaire, mandibulaire et RIM	
Prise de teinte +/- CBCT	
	Effacer numériquement la ou les dents à extraire de l'empreinte numérique
	Génère les dents à remplacer soit grâce à la dent controlatérale et l'outil miroir, soit grâce à l'empreinte de la dent elle-même
	Création de zone de rétention dans la modélisation des dents prothétiques
	Création des crochets
	Délimitation de la selle/assise de la prothèse avec l'outil pointer-cliquer et génération de la prothèse par duplicata de la muqueuse avec l'épaisseur choisie, avec les zones d'insertion des éléments crochets et dents prothétiques
	Usinage des pièces selles et dents prothétiques dans des blocs de PMMA de teinte adéquate
	Frittage des crochets de rétention
	Montage de la prothèse, adhésion des éléments par résine auto polymérisable
Avulsion des dents avec acte chirurgical le plus atraumatique possible et bonne hémostase	
Pose de la prothèse	
Contrôle et vérification de la cicatrisation et de l'adaptation de la prothèse	

3. Conception et fabrication d'une couronne sur dent support de crochet d'une PAP préexistante

Il existe deux procédures différant légèrement en fonction de deux types de situation clinique :

- La dent support de crochet présente une anatomie coronaire exploitable : la surface dentaire au contact du crochet encore intacte (qu'il s'agisse de la dent naturelle ou d'une couronne (86).
- La dent support de crochet présente une anatomie compromise : nous n'avons plus de point de référence pour la surface occlusale de la dent (87,88).

3.1 Cas où la dent support de crochet est encore présente

En bouche	En chairside
Examen clinique	
Prise de l'empreinte numérique sur la zone de l'arcade au niveau de la dent à traiter	
Préparation coronaire de la dent	
Prise d'empreinte de la dent préparée, de l'arcade antagoniste et de l'occlusion	
	Utilisation du logiciel de CAO afin de tracer les limites de la couronne et fusion de l'anatomie coronaire de la couronne avec celle de la dent préexistante grâce à l'outil miroir
	Usinage de la couronne conçue
Contrôle de l'ajustement	
Scellement de la couronne	

3.2 Cas où la dent support de crochet n'a plus de partie coronaire

En bouche	En chairside
Examen clinique	
Préparation de la dent	
Empreinte des deux arcades	Empreinte de la PAP
Empreinte de l'arcade avec la PAP en position	
Empreinte de l'occlusion	
	Utilisation du logiciel de CAO afin de : - tracer les limites de la couronne - délimiter un modèle respectant l'occlusion ainsi que le tracé du crochet de la PAP
	Usinage de la couronne conçue
Contrôle de l'ajustement	
Scellement de la couronne	

Cette technique est plus difficile à réaliser, elle requiert une très bonne maîtrise des outils de conception du logiciel utilisé par le praticien. Afin d'améliorer la précision et la réussite de cette manipulation une petite empreinte en polyéther au niveau de la dent avec la PAP en place est souvent nécessaire. Cette empreinte est numérisée elle aussi et permet de mieux déterminer le tracé du crochet notamment par rapport à la position du congé de la préparation (87,88)

Sixième partie : Avantages et limites

1. Avantages

La CFAO permet des réhabilitations réalisées plus rapidement avec des résultats prédictibles : grâce à la simplification des protocoles, la prédictibilité d'une réhabilitation complexe peut être améliorée grâce à des provisoires au long terme (89). La réalisation peut permettre, dans certains cas, le regroupement de différents rendez-vous et ainsi en réduire le nombre :

1. Coronoplasties et empreinte ;
2. Pose de la prothèse à opposer aux 4 ou 5 RDV nécessaires en prothèse conventionnelle(90).

Le gain de temps et de prédictibilité se fait aussi grâce à la réduction des erreurs liées à la déformation des matériaux d'empreintes lors des étapes intermédiaires. La précision et la reproductibilité sont constantes pour toutes les prothèses lorsque le praticien maîtrise son outil. Pour les cas complexes, la CFAO facilite la réalisation de plan de traitement alliant prothèse conjointe et prothèse adjointe ,telle que la réalisation d'une couronne sous PPA existante (86–88,91), mais aussi pour d'autres plan de traitement plus complexes, nécessitant par exemple des attachement de précision ou la parallélisation de contournements fraisés sur des couronnes.

La CFAO peut aussi constituer une aide à la préparation, en aidant au respect du parallélisme et de l'axe d'insertion afin de réaliser une préparation à minima avec ainsi un meilleur ajustement, et donc meilleure stabilité et durabilité de la prothèse dans le temps

Les prothèses réalisées par CFAO ont en général un meilleur retour de la part des patients, la caméra optique est considérée comme plus supportable pour le patient car ce type d'empreinte peut être moins générateur de réflexe vomitif (42,92,93).

La communication est facilitée avec le patient mais aussi entre professionnels, prothésistes et dentistes pour une meilleure prise en charge du patient grâce à la visualisation en direct des empreintes et des modélisations numériques de la prothèse. Cela contribue à limiter les erreurs lors des étapes intermédiaires mais aussi à l'acceptabilité du plan de traitement et de la prothèse de la part du patient. Cumulé à la conservation des enregistrements sur support numérique, facilitant et simplifiant le travail en cas de perte ou casse de la prothèse, il est estimé que l'utilisation d'un workflow numérique contribue à une réduction des coûts d'environ 25% (78).

2. Limites

Une longue courbe d'apprentissage est nécessaire pour l'équipe de soin et il faut réorganiser les protocoles en fonction de la CFAO.

L'investissement initial a un coût élevé.

Bien que la technologie se démocratise de plus en plus, de nombreux systèmes fonctionnent encore en système fermé ou avec une possibilité d'ouverture du système en STL mais avec un protocole plus complexe ainsi qu'une perte d'ergonomie, avec convertissage supplémentaire et perte potentielle d'information (ex : 3shape).

Peu de machines d'usinage sont disponibles pour le moment et un nombre limité de prothésistes sont équipés actuellement.

A ce jour, nous manquons de logiciels adaptés au processus simplifiés et spécialisés pour la réalisation des PPA.

Il persiste encore des limites techniques telles que les déformations du scan de l'empreinte optique bien que les dernières études à propos de l'avancée technologique des caméras tendent à rendre ce problème de plus en plus négligeable. Il reste cependant une difficulté à placer les insertions des brides musculaires, une impossibilité de prise d'empreinte en dynamique ainsi que d'enregistrement de la dépressibilité de la muqueuse. Le protocole totalement numérique semble être une solution plus favorable pour le moment pour des édentements de surface restreinte (bien que les dimensions de cette surface tendent à s'élargir avec les avancées technologiques).

3. Recul clinique précision – ajustement, acceptabilité par les patients, études in vivo

Les études tendent à démontrer l'absence de différence quant à la tolérance de PAP faite par CFAO comparée au PAP réalisées de façon conventionnelle. Les essais récents semblent même à montrer un meilleur taux de réussite avec la CFAO.

Lors d'essais, les patients ont tendance à préférer en majorité les prothèses amovibles partielles ayant été réalisées avec un workflow entièrement numérique à celles réalisées de façon conventionnelle ou combinées numérique-analogue. Les analyses montrent aussi une meilleure adaptation ainsi qu'une bascule moindre (94). Certaines études montrent également une satisfaction des patients augmentée avec des prothèses donc l'armature est réalisée par fusion laser (95). Les patients reportent une meilleure satisfaction générale, une meilleure faculté à parler et à mastiquer, une meilleure efficacité masticatoire ainsi qu'une meilleure condition orale et une plus grande facilité de nettoyage.

Une autre étude similaire en 2018 qui analyse par color mapping l'ajustement des armatures, révèle que ce sont les prothèses réalisées par techniques conventionnelles qui ont la meilleure précision bien que celles produites par CFAO présentent une adaptabilité acceptable cliniquement (96).

Le nombre restreint d'étude sur les prothèses amovibles partielles réalisées par CFAO, portant seulement sur un nombre limité de prothèses, avec beaucoup de variations entre les différentes expériences : matériaux utilisés pour l'armature PEEK ou cobalt-chrome, types d'édentements variables ainsi que l'évolution rapide des technologies au cours des années, rendent difficile d'établir une réponse claire sur la supériorité supposée des prothèses amovibles partielles réalisées par CFAO. Il serait nécessaire de réaliser d'autres études, si possible standardisées, pour les différentes classes d'édentement, à plus grande échelle afin de pouvoir déterminer plus précisément l'ajustement et l'acceptabilité de ces prothèses in-vivo. La récence de ce type de prothèses requiert aussi du temps et des études prospectives afin d'évaluer au long terme la durabilité et l'acceptabilité lors d'un usage quotidien sur plusieurs années. Nous ne sommes encore qu'aux prémices d'une technique qui se généralisera peut-être dans quelques années.

Conclusion

Les avancées technologiques nous permettent désormais de pouvoir concevoir et fabriquer de façon entièrement numérique des prothèses amovibles partielles avec des résultats cliniquement acceptables. Les patients semblent recevoir favorablement cette évolution pour la réalisation de leur prothèse et leur niveau de satisfaction lors du port de l'appareil est similaire ou meilleur qu'avec les prothèses conventionnelles. Le workflow numérique présente de nombreux avantages, notamment dans le contexte actuel des soins de santé en France : un gain de temps et notamment de séances au fauteuil ainsi que la possibilité d'archiver les informations numériques permettant de refaire à l'identique l'appareil, en cas de perte ou casse, évitant de placer des rendez-vous. Ces avantages pourraient participer à prendre en charge un plus grand nombre de patients pour un praticien à une époque où le manque de dentistes est devenu monnaie courante dans de nombreuses zones géographiques.

Cependant il reste encore des limites à cette technique. En premier lieu, l'investissement en matériel de CFAO au cabinet dentaire tout comme au laboratoire de prothèse limite son adoption. Le coût à l'achat de ces technologies de pointe ainsi que le faible nombre d'entreprises spécialisées sur ce marché font que la CFAO pour les prothèses amovibles partielles reste une situation de niche restreinte à quelques praticiens et prothésistes. De plus, un logiciel de CFAO regroupant et intégrant la totalité des fonctionnalités requises et de façon ergonomique est encore attendu, pour l'instant les dentistes et prothésistes devant encore jongler entre différents outils, Modjaw puis empreinte optique à partir d'un autre support, et de même pour le prothésiste avec l'absence de logiciel permettant de modéliser l'armature, les selles et les dents prothétiques avant de les faire fabriquer. Les machines de fabrication par CFAO pour la mise en forme de pièces larges de résine et de fusion laser sont encore rares chez les prothésistes car leur taille imposante et leur coût important impose une mise en commun. La réalisation de PAP de façon 100% numérique au fauteuil comme au laboratoire n'en est donc qu'à ses balbutiements aujourd'hui, mais les progrès techniques et informatiques exponentiels permettent d'espérer une amélioration et une démocratisation de cette pratique à l'avenir.

L'avènement de la CFAO en odontologie et sa démocratisation progressive depuis le début du 21^{ème} siècle entraine une révolution profonde dans l'art dentaire tant dans la façon de le concevoir que dans la pratique des métiers qui en dépendent. Le travail de prothésiste se tourne de plus en plus vers une maîtrise nécessaire de la conception 3D ainsi de l'impression tridimensionnelle, tandis que les dentistes devront eux aussi se former et réapprendre à exercer leur métier avec des outils différents qui ont leurs avantages et contraintes propres.

Vu le directeur de thèse

Dr. Delrieu Julien



Vu le Président du jury



Pr. Franck Diemer

Bibliographie

1. Horn JV. George Washington's Dentures: Disability, Deception, and the Republican Body. *Early Am Stud Interdiscip J*. 2016;14(1):2-47.
2. Moriyama N, Hasegawa M. The history of the characteristic Japanese wooden denture. *Bull Hist Dent*. avr 1987;35(1):9-16.
3. Donaldson JA. The use of gold in dentistry. *Gold Bull*. 1 sept 1980;13(3):117-24.
4. BDA (British Dental Association) - A French dentist showing his artificial teeth [Internet]. 2011 [cité 19 oct 2021]. Disponible sur: <https://web.archive.org/web/20111106111842/http://www.bda.org/museum/collections/dental-art/porcelain-teeth.aspx>
5. Schittly J, Schittly-Médard E. Prothèse amovible partielle: clinique et laboratoire. 3e édition. Puteaux: Éditions CdP; 2020. xx+347. (Collection JPIO).
6. Nallaswamy D. Textbook of Prosthodontics. JP Medical Ltd; 2017. 1417 p.
7. Schittly J, Schittly-Médard E. Prothèse amovible partielle: clinique et laboratoire. 2e édition. Rueil-Malmaison: Éditions CdP; 2012. xix+254. (Collection JPIO).
8. Shanahan TEJ. Physiologic vertical dimension and centric relation. *J Prosthet Dent*. 1 nov 1956;6(6):741-7.
9. Saunders JBDecM, Davis C, Miller ER. LXXIX The Mechanism of Deglutition (Second Stage) as Revealed by Cine-Radiography. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1 déc 1951;60(4):897-916.
10. Alhadj MN, Khalifa N, Abduo J, Amran AG, Ismail IA. Determination of occlusal vertical dimension for complete dentures patients: an updated review. *J Oral Rehabil*. 2017;44(11):896-907.
11. Millet C, Leterme A, Jeannin C, Jaudoin P. [Vertical dimension in the treatment of the edentulous patient]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac*. 1 nov 2010;111(5-6):315-30.
12. Ismail YH, George WA. The consistency of the swallowing technique in determining occlusal vertical relation in edentulous patients. *J Prosthet Dent*. 1 mars 1968;19(3):230-6.
13. Čimić: Movements of temporomandibular condyles... - Google Scholar [Internet]. [cité 19 oct 2021]. Disponible sur: https://scholar.google.com/scholar_lookup?hl=en&volume=39&publication_year=2015&pages=159-164&journal=Coll+Antropol&author=S+Cimic&author=SK+Simunkovic&author=RK+Gospic&author=T+Badel&author=N+Dul%C4%8Di%C4%87&author=A+%C4%86ati%C4%87&title=Movements+of+temporomandibular+condyles+during+swallowing

14. Schittly J, Schittly E. Conception et réalisation des châssis en prothèse amovible partielle. Malakoff: Éditions CdP; 2017. x+117. (Mémento).
15. Santoni P. Maîtriser la prothèse amovible partielle. Rueil-Malmaison: Éditions CdP; 2004. xxii+185. (Collection JPIO).
16. Martin C. Les systèmes d'attaches en prothèse partielle amovible coulée [Internet] [exercice]. Université Toulouse III - Paul Sabatier; 2015 [cité 19 oct 2021]. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/800/>
17. Disdier L. Les tracés de châssis : méthode traditionnelle versus méthode numérique [Internet] [exercice]. Université Toulouse III - Paul Sabatier; 2017 [cité 19 oct 2021]. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/1766/>
18. Perelmutter S, Duret F, Lelièvre F. La prothèse céramo-céramique par CFAO: Avant-propos de Simon Perelmutter. Quintessence International; 2009.
19. Nobel Biocare France | Dental implant solutions [Internet]. [cité 4 oct 2021]. Disponible sur: <https://www.nobelbiocare.com/fr-fr>
20. Descamp F, Fages M. La CFAO en odontologie: les bases, les principes et les systèmes. Malakoff: Éditions CdP; 2016. xviii+100. (Guide clinique).
21. Gan N, Xiong Y, Jiao T. Accuracy of Intraoral Digital Impressions for Whole Upper Jaws, Including Full Dentitions and Palatal Soft Tissues. PLOS ONE. 6 juill 2016;11(7):e0158800.
22. Accuracy of full-arch scans using intraoral scanners - Campus UT3 [Internet]. [cité 11 févr 2021]. Disponible sur: <https://archipel-univtoulouse.hosted.exlibrisgroup.com>
23. Ender A, Mehl A. Full arch scans: conventional versus digital impressions--an in-vitro study. Int J Comput Dent. 2011;14(1):11-21.
24. Yajvinder, Gulati V. Implementation of Micro CT in CAD/CAM dentistry for image processing and soft computing: a review. J Phys Conf Ser. janv 2020;1432:012079.
25. 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. 1 juin 2018;119(6):879-86.
26. Virard F, Venet L, Richert R, Pfeffer D, Viguié G, Bienfait A, et al. Manufacturing of an immediate removable partial denture with an intraoral scanner and CAD-CAM technology: a case report. BMC Oral Health. 4 juill 2018;18(1):120.
27. Burzynski JA, Firestone AR, Beck FM, Fields HW, Deguchi T. Comparison of digital intraoral scanners and alginate impressions: Time and patient satisfaction. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1 avr 2018;153(4):534-41.

28. Patzelt SBM, Lamprinos C, Stampf S, Att W. The time efficiency of intraoral scanners: An in vitro comparative study. *J Am Dent Assoc.* 1 juin 2014;145(6):542-51.
29. Kim J, Park J-M, Kim M, Heo S-J, Shin IH, Kim M. Comparison of experience curves between two 3-dimensional intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* 1 août 2016;116(2):221-30.
30. Lepidi L, Galli M, Mastrangelo F, Venezia P, Joda T, Wang H-L, et al. Virtual Articulators and Virtual Mounting Procedures: Where Do We Stand? *J Prosthodont.* 2021;30(1):24-35.
31. Trueness and precision of digital impressions obtained using an intraoral scanner with different head size in the partially edentulous mandible. *J Prosthodont Res.* 1 juill 2018;62(3):347-52.
32. Nedelcu R, Olsson P, Nyström I, Rydén J, Thor A. Accuracy and precision of 3 intraoral scanners and accuracy of conventional impressions: A novel in vivo analysis method. *J Dent.* 1 févr 2018;69:110-8.
33. Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent.* févr 2013;109(2):121-8.
34. Mühlemann S, Benic GI, Fehmer V, Hämmerle CHF, Sailer I. Randomized controlled clinical trial of digital and conventional workflows for the fabrication of zirconia-ceramic posterior fixed partial dentures. Part II: Time efficiency of CAD-CAM versus conventional laboratory procedures. *J Prosthet Dent.* 1 févr 2019;121(2):252-7.
35. Digistell - Le logiciel de CAO pour prothèses adjointes [Internet]. 3D Totem. [cité 18 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.3d-totem.fr/digistell/>
36. Logiciel de design DWOS Chairside [Internet]. Dental Wings. [cité 18 févr 2021]. Disponible sur: <https://dentalwings.com/fr/dwoschairside/>
37. DWOS DWOS La solution complète et ouverte [Internet]. Dental Wings. [cité 18 févr 2021]. Disponible sur: <https://dentalwings.com/fr/dwos/>
38. Exportez des fichiers STL depuis votre solution 3Shape TRIOS [Internet]. 3Shape. [cité 18 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.3shape.com/fr/news/2017/export-stl-files-from-your-3shape-trios>
39. 3Shape – scanners dentaires 3D et systèmes de CFAO [Internet]. [cité 25 mars 2021]. Disponible sur: https://www.3shape.com/fr?gclid=CjwKCAjw6fCCBhBNEiwAem5SO-JAjlAQNUiyTlwZx1SDABiY3ntd32PCcxAwYwwoy3e64eaeQ7zwBoCnW0QAvD_BwE
40. Edher F, Hannam AG, Tobias DL, Wyatt CCL. The accuracy of virtual interocclusal registration during intraoral scanning. *J Prosthet Dent.* 1 déc 2018;120(6):904-12.
41. Solaberrieta E, Garmendia A, Brizuela A, Otegi JR, Pradies G, Szentpétery A. Intraoral Digital Impressions for Virtual Occlusal Records: Section Quantity and Dimensions. *BioMed Res Int.* 2016;2016:1-7.

42. Kihara H, Hatakeyama W, Komine F, Takafuji K, Takahashi T, Yokota J, et al. Accuracy and practicality of intraoral scanner in dentistry: A literature review. *J Prosthodont Res.* 2020;64(2):109-13.
43. Ahlholm P, Sipilä K, Vallittu P, Jakonen M, Kotiranta U. Digital Versus Conventional Impressions in Fixed Prosthodontics: A Review. *J Prosthodont.* 2018;27(1):35-41.
44. Seo J-M, Oh W, Lee J-J. A technique for verifying the accuracy of the virtual mounting of digital scans against the actual occlusal contacts. *J Prosthet Dent.* 1 mai 2019;121(5):729-32.
45. Solaberrieta E, Mínguez R, Barrenetxea L, Etxaniz O. Direct transfer of the position of digitized casts to a virtual articulator. *J Prosthet Dent.* 1 juin 2013;109(6):411-4.
46. Solaberrieta E, Mínguez R, Barrenetxea L, Otegi JR, Szentpétery A. Comparison of the accuracy of a 3-dimensional virtual method and the conventional method for transferring the maxillary cast to a virtual articulator. *J Prosthet Dent.* 1 mars 2015;113(3):191-7.
47. Solaberrieta E, Garmendia A, Minguez R, Brizuela A, Pradies G. Virtual facebow technique. *J Prosthet Dent.* 1 déc 2015;114(6):751-5.
48. Lam WYH, Hsung RTC, Choi WWS, Luk HWK, Pow EHN. A 2-part facebow for CAD-CAM dentistry. *J Prosthet Dent.* 1 déc 2016;116(6):843-7.
49. Petre A, Drafta S, Stefanescu C, Oancea L. Virtual facebow technique using standardized background images. *J Prosthet Dent.* 1 mai 2019;121(5):724-8.
50. Modjaw [Internet]. [cité 18 févr 2021]. Disponible sur: <https://www.modjaw.com/fr/>
51. Enciso R, Memon A, Fidaleo DA, Neumann U, Mah J. The Virtual Craniofacial Patient: 3D Jaw Modeling and Animation. *Med Meets Virtual Real* 11. 2003;65-71.
52. Accessoires 3Shape [Internet]. [cité 25 mars 2021]. Disponible sur: <https://france.bego.com/solutions-cadcam/scanners-et-logiciels/scanners-accessoires/scanners-3shape/accessoires-3shape/>
53. Lee H, Kwon K-R. A CAD-CAM device for preparing guide planes for removable partial dentures: A dental technique. *J Prosthet Dent.* juill 2019;122(1):10-3.
54. Delrieu J. CFAO et prothèse amovible - Thèses d'exercice de Santé [Internet] [thèse d'exercice]. [Toulouse]: Université Toulouse III - Paul Sabatier; 2017 [cité 19 nov 2020]. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/1831/>
55. Chen Z, Li Z, Li J, Liu C, Lao C, Fu Y, et al. 3D printing of ceramics: A review. *J Eur Ceram Soc.* 1 avr 2019;39(4):661-87.
56. Vorndran E, Moseke C, Gbureck U. 3D printing of ceramic implants. *MRS Bull.* févr 2015;40(2):127-36.

57. Froes FH. Titanium in Medical and Dental Applications [Internet]. Elsevier Science; 2018 [cité 20 oct 2021]. Disponible sur: <https://univ-toulouse-scholarvox-com-s.docadis.univ-tlse3.fr/book/88864553>
58. Nakata T, Shimpō H, Ohkubo C. Clasp fabrication using one-process molding by repeated laser sintering and high-speed milling. *J Prosthodont Res*. 1 juill 2017;61(3):276-82.
59. Takaichi A, Suyalatu, Nakamoto T, Joko N, Nomura N, Tsutsumi Y, et al. Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications. *J Mech Behav Biomed Mater*. 1 mai 2013;21:67-76.
60. Trial fitting of a removable partial denture framework made using computer-aided design and rapid prototyping techniques - R J Bibb, D Eggbeer, R J Williams, A Woodward, 2006 [Internet]. [cité 20 oct 2021]. Disponible sur: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544119jeim62?casa_token=V6ridMXbwVsAAAAA:RK5311P26GDLE6XXXQPMJtesQ-9ejgBxykYluZLpVmVFkrfp-Rwlp8BXCpDisKnEKF-2PsC3c0yWEQ
61. Ohkubo C, Sato Y, Nishiyama Y, Suzuki Y. Titanium removable denture based on a one-metal rehabilitation concept. *Dent Mater J*. 26 sept 2017;36(5):517-23.
62. Xie W, Zheng M, Wang J, Li X. The effect of build orientation on the microstructure and properties of selective laser melting Ti-6Al-4V for removable partial denture clasps. *J Prosthet Dent*. 1 janv 2020;123(1):163-72.
63. Actualité - Évolution règlementaire impactant les dispositifs médicaux qui contiennent du cobalt - ANSM [Internet]. [cité 30 nov 2021]. Disponible sur: <https://ansm.sante.fr/actualites/evolution-reglementaire-impactant-les-dispositifs-medicaux-qui-contiennent-du-cobalt>
64. Julien Delrieu. Le PEEK tentative ou alternative ? [Internet]. 2021 [cité 20 oct 2021]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=nELk2pdzngI>
65. Negm EE, Aboutaleb FA, Alam-Eldein AM. Virtual Evaluation of the Accuracy of Fit and Trueness in Maxillary Poly(etheretherketone) Removable Partial Denture Frameworks Fabricated by Direct and Indirect CAD/CAM Techniques. *J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont*. août 2019;28(7):804-10.
66. Chaing BKP. Polymers in the service of prosthetic dentistry. *J Dent*. 1 sept 1984;12(3):203-14.
67. Zafar MS. Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update. *Polymers*. oct 2020;12(10):2299.
68. EBSCOhost | 36895169 | Water Sorption and Dimensional Stability of Three Glass Fiber--Reinforced Composites. [Internet]. [cité 1 déc 2021]. Disponible sur: <https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=cr>

awler&jrnl=08932174&asa=Y&AN=36895169&h=fcAMOOAAmqBf1ZCJpZ4NVDavsPHhRcdwbBnpky%2b08HifgUif8mmdfnGHTErNXoA4%2fl1kn9VQX9Q6IEB7%2bmLd7w%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrINotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d08932174%26asa%3dY%26AN%3d36895169

69. Turner DT. Polymethyl methacrylate plus water: sorption kinetics and volumetric changes. *Polymer*. 1 févr 1982;23(2):197-202.

70. Alp G, Murat S, Yilmaz B. Comparison of Flexural Strength of Different CAD/CAM PMMA-Based Polymers. *J Prosthodont*. 2019;28(2):e491-5.

71. Srinivasan M, Gjengedal H, Cattani-Lorente M, Moussa M, Durual S, Schimmel M, et al. CAD/CAM milled complete removable dental prostheses: An *in vitro* evaluation of biocompatibility, mechanical properties, and surface roughness. *Dent Mater J*. 2018;advpub.

72. Steinmassl P-A, Wiedemair V, Huck C, Klaunzer F, Steinmassl O, Grunert I, et al. Do CAD/CAM dentures really release less monomer than conventional dentures? *Clin Oral Investig*. 1 juin 2017;21(5):1697-705.

73. Murat S, Alp G, Alatalı C, Uzun M. In Vitro Evaluation of Adhesion of *Candida albicans* on CAD/CAM PMMA-Based Polymers. *J Prosthodont*. 2019;28(2):e873-9.

74. Steinmassl O, Dumfahrt H, Grunert I, Steinmassl P-A. CAD/CAM produces dentures with improved fit. *Clin Oral Investig*. nov 2018;22(8):2829-35.

75. Carlsson GE. Masticatory efficiency: the effect of age, the loss of teeth and prosthetic rehabilitation. *Int Dent J*. 1 juin 1984;34(2):93-7.

76. EBSCOhost | 56601790 | Validation of the Eichner Index in Relation to Occlusal Force and Masticatory Performance. [Internet]. [cité 19 oct 2021]. Disponible sur: <https://web.p.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=08932174&AN=56601790&h=I0KBhns5Rzen2m3QRa6HjcSBfNeElfFfxEWVheZSUq9csQrZWfzejzyJJ0fBdDQ9LAgaz768zUvltvOLXU8lg%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrINotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d08932174%26AN%3d56601790>

77. Tueller VM. The relationship between the vertical dimension of occlusion and forces generated by closing muscles of mastication. *J Prosthet Dent*. 1 sept 1969;22(3):284-8.

78. Al-Haj Husain N, Özcan M, Schimmel M, Abou-Ayash S. A digital cast-free clinical workflow for oral rehabilitation with removable partial dentures: A dental technique. *J Prosthet Dent*. mai 2020;123(5):680-5.

79. Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P, et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. *J Healthc Eng*. 5 sept 2017;2017:e8427595.

80. Manufacturing of an immediate removable partial denture with an intraoral scanner and CAD-CAM technology: a case report | BMC Oral Health | Full Text [Internet]. [cité 18 mars 2021]. Disponible sur: <https://bmcoralhealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12903-018-0578-3>
81. Using Intraoral Scanning Technology for Three-Dimensional Printing of Kennedy Class I Removable Partial Denture Metal Framework: A Clinical Report - Hu - 2019 - Journal of Prosthodontics - Wiley Online Library [Internet]. [cité 17 mars 2021]. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jopr.12712>
82. Harb IE, Abdel-Khalek EA, Hegazy SA. CAD/CAM Constructed Poly(etheretherketone) (PEEK) Framework of Kennedy Class I Removable Partial Denture: A Clinical Report. J Prosthodont. 2019;28(2):e595-8.
83. Nishiyama H, Taniguchi A, Tanaka S, Baba K. Novel fully digital workflow for removable partial denture fabrication. J Prosthodont Res. janv 2020;64(1):98-103.
84. Fang J-H, An X, Jeong S-M, Choi B-H. Digital immediate denture: A clinical report. J Prosthet Dent. 1 mai 2018;119(5):698-701.
85. Neumeier TT, Neumeier H. Digital immediate dentures treatment: A clinical report of two patients. J Prosthet Dent. 1 sept 2016;116(3):314-9.
86. Gouveia DNM, Razzoog ME, Alfaro MF. A fully digital approach to fabricating a CAD-CAM ceramic crown to fit an existing removable partial denture. J Prosthet Dent. avr 2019;121(4):571-5.
87. Lee J-H. Completely digital approach to fabricating a crown under an existing partial removable dental prosthesis by using an intraoral digital scanner in a single appointment. J Prosthet Dent. juin 2016;115(6):668-71.
88. Lee J-H. Fabricating a crown under an existing removable partial denture with impression scanning and CAD-CAM technology. J Prosthet Dent. août 2020;124(2):148-52.
89. Güth JF, Almeida E Silva JS, Beuer F F, Edelhoff D. Enhancing the predictability of complex rehabilitation with a removable CAD/CAM-fabricated long-term provisional prosthesis: a clinical report. J Prosthet Dent. janv 2012;107(1):1-6.
90. Bidra AS, Taylor TD, Agar JR. Computer-aided technology for fabricating complete dentures: Systematic review of historical background, current status, and future perspectives. J Prosthet Dent. 1 juin 2013;109(6):361-6.
91. Yoon T-H, Chang W-G. The fabrication of a CAD/CAM ceramic crown to fit an existing partial removable dental prosthesis: a clinical report. J Prosthet Dent. sept 2012;108(3):143-6.

92. Londono J, Abreu A, Baker PS, Furness AR. Fabrication of a definitive obturator from a 3D cast with a chairside digital scanner for a patient with severe gag reflex: A clinical report. *J Prosthet Dent*. 1 nov 2015;114(5):735-8.
93. Wismeijer D, Mans R, van Genuchten M, Reijers HA. Patients' preferences when comparing analogue implant impressions using a polyether impression material versus digital impressions (Intraoral Scan) of dental implants. *Clin Oral Implants Res*. 2014;25(10):1113-8.
94. Tregerman I, Renne W, Kelly A, Wilson D. Evaluation of removable partial denture frameworks fabricated using 3 different techniques. *J Prosthet Dent*. 1 oct 2019;122(4):390-5.
95. Almufleh B, Emami E, Alageel O, de Melo F, Seng F, Caron E, et al. Patient satisfaction with laser-sintered removable partial dentures: A crossover pilot clinical trial. *J Prosthet Dent*. avr 2018;119(4):560-567.e1.
96. Soltanzadeh P, Suprono MS, Kattadiyil MT, Goodacre C, Gregorius W. An In Vitro Investigation of Accuracy and Fit of Conventional and CAD/CAM Removable Partial Denture Frameworks. *J Prosthodont*. 2019;28(5):547-55.

Table des illustrations

Figure 1 : classe A1 des indices d'Eichner	9
Figure 2 : classe A2 des indices d'Eichner	9
Figure 3 : classe A3 des indices d'Eichner	9
Figure 4 : classe B1 des indices d'Eichner	9
Figure 5 : classe B2 des indices d'Eichner	9
Figure 6 : classe B3 des indices d'Eichner	9
Figure 7 : classe C1 des indices d'Eichner	10
Figure 8 : classe C2 des indices d'Eichner	10
Figure 9 : classe C3 des indices d'Eichner	10
Figure 10 : classe I de Kennedy-Applegate.....	11
Figure 11 : classe II de Kennedy-Applegate.....	11
Figure 12 : classe III de Kennedy-Applegate.....	12
Figure 13 : classe IV de Kennedy-Applegate	12
Figure 14 : classe V de Kennedy-Applegate	13
Figure 15 : classe VI de Kennedy-Applegate	13
Figure 16 : crochet d'une prothèse amovible partielle.....	19
Figure 17 : positionnement du bras rétentif.....	19
Figure 18 : crochet d'Ackers.....	21
Figure 19 : crochet de Nally-Martinet.....	21
Figure 20 : crochet en Y.....	22
Figure 21 : crochet en I.....	22
Figure 22 : visualisation des zones de contre-dépouilles sur le modèle numérique (54)	39

**LA CFAO EN PROTHESE AMOVIBLE PARTIELLE : ETAT DE L'ART EN 2021 –
DEVELOPPEMENT D'UN WORKFLOW NUMERIQUE AU CABINET**

RESUME : Depuis les prémices de la dentisterie numérique dans les années 80, son champ d'application a pu s'ouvrir aux différentes disciplines dentaires. La réalisation de prothèses amovibles partielles avec un workflow intégralement numérique est une application récente de la conception et fabrication assistée par ordinateur. Elle permet de réaliser des prothèses cliniquement acceptables plus facilement et rapidement que selon la technique conventionnelle. L'avancée rapide des technologies informatiques ainsi que leurs performances laissent à penser que les PAP réalisées par CFAO pourraient se généraliser dans le futur. Nous avons cherché à connaître l'état de l'art en 2021 pour l'élaboration d'une PAP avec un workflow numérique, quelles étaient les perspectives d'avenir de cette technologie ainsi que ses limites actuelles.

**CAM/CAM AND REMOVABLE PARTIAL DENTURE : STATE OF THE ART IN
2021 – DEVELOPMENT OF A CHAIRSIDE DIGITAL WORKFLOW**

SUMMARY : Since the early age of digital dentistry in the 1980s, its scope has been able to extend to different dental fields. Removable partial dentures realization with a fully digital workflow is a recent application of computer-aided design and manufacture. It makes it possible to produce clinically acceptable dentures more easily and quickly than according to the conventional technique. The rapid advance of computer technologies and their performances suggest that RPDs carried out by CAD/CAM could become widespread in the future. We sought to know the state of the art in 2021 for a RPD created by digital workflow and what are the future prospects of this technology as well as its current limits.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLES : CFAO, prothèse amovible partielle PAP, RPD, CAD/CAM

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR : Université Toulouse III-Paul Sabatier Faculté
de chirurgie dentaire 3 chemin des Maraîchers 31062 Toulouse Cedex

Directeur de thèse : Dr Julien DELRIEU