



**HAL**  
open science

## L'articulateur virtuel : possibilités actuelles

Guillaume Girault

► **To cite this version:**

| Guillaume Girault. L'articulateur virtuel : possibilités actuelles. Chirurgie. 2015. dumas-01252219

**HAL Id: dumas-01252219**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01252219>**

Submitted on 7 Jan 2016

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

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

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

Année 2015

N° 95

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

Présentée et soutenue publiquement

Par GIRAULT Guillaume

Né le 12 Janvier 1990 à Bordeaux

Le 18 Décembre 2015

**L'articulateur virtuel : possibilités actuelles**

Directeur de la thèse

Dr Mathieu CONTREPOIS

Membres du Jury

Président	Mme C. BERTRAND	Professeur des Universités
Directeur	M M. CONTREPOIS	Assistant Hospitalo-Universitaire
Rapporteur	M A. SOENEN	Ancien Assistant Hospitalo-Universitaire
Assesseur	M E. D'INCAU	Maître de Conférences des Universités
Assesseur	M J. SAMOT	Maître de Conférences des Universités

# UNIVERSITE DE BORDEAUX

MAJ 01/11/2015

**Président** M. TUNON DE LARA Manuel  
**Directeur de Collège des Sciences de la Santé** M. PELLEGRIN Jean-Luc

## **COLLEGE DES SCIENCES DE LA SANTE UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE DES SCIENCES ODONTOLOGIQUES**

**Directrice** Mme BERTRAND Caroline 58-02  
**Directrice Adjointe – Chargée de la Formation initiale** Mme ORIEZ-PONS Dominique 58-01  
**Directeur Adjoint – Chargé de la Recherche** M. FRICAIN Jean-Christophe 57-02  
**Directeur Adjoint – Chargé des Relations Internationales** M. LASSERRE Jean-François 58-02

### **ENSEIGNANTS DE L'UFR**

#### **PROFESSEURS DES UNIVERSITES**

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

#### **MAITRES DE CONFERENCE DES UNIVERSITES**

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

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

### **ASSITANTS**

Mme	Audrey	AUSSEL	Sciences biologiques	57-03
M.	Wallid	BOJEMAA AZZI	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	Julien	BROTHIER	Prothèse dentaire	58-02
M.	Mathieu	CONTREPOIS	Prothèse dentaire	58-02
M.	Guillaume	CRESTE	Prothèse dentaire	58-02
Mme	Clarisse	DE OLIVEIRA	Orthopédie dento-faciale	56-02
M.	Cédric	FALLA	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M.	Guillaume	FENOUL	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Elsa	GAROT	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Nicolas	GLOCK	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme	Sandrine	GROS	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Olivia	KEROUREDAN	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Alice	LE NIR	Sciences anatomiques et physiologiques	58-03
Mme	Karine	LEVET	Prévention épidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale	56-03
M.	Alexandre	MARILLAS	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
Mme	Marie	MEDIO	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Darrène	NGUYEN	Sciences biologiques	57-03
M.	Alice	NOUREDDINE	Prothèse dentaire	58-02
Mme	Chloé	PELOURDE	Orthopédie dento-faciale	56-02
Mme	Candice	PEYRAUD	Odontologie pédiatrique	56-01
M.	Jean-Philippe	PIA	Prothèse dentaire	58-02
M.	Mathieu	PITZ	Parodontologie	57-01
Mme	Charlotte	RAGUENEAU	Prothèse dentaire	58-02
M.	Clément	RIVES	Odontologie conservatrice – Endodontie	58-01
M.	François	ROUZE L'ALZIT	Prothèse dentaire	58-02
M.	François	VIGOUROUX	Parodontologie	57-01
			Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02
			Chirurgie buccale – Pathologie et thérapeutique	57-02

A notre Présidente de thèse

Madame le Professeur Caroline Bertrand

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques

Sous-section Prothèse 58-02

*Je vous remercie infiniment de l'honneur que vous me faites en acceptant la présidence de mon jury. Votre enseignement et vos qualités pédagogiques m'ont été précieux tout au long de mes études.*

*Veillez trouver ici, Madame le Professeur, le témoignage de ma profonde gratitude et de mes sentiments les plus respectueux.*

## A notre Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Mathieu Contrepois

Assistant Hospitalo-Universitaire

Sous-section Prothèses – 58-02

*Je vous remercie chaleureusement de la confiance que vous m'avez accordée en acceptant de diriger mon travail. Je vous serais également reconnaissant de m'avoir communiqué votre investissement dans les études et de m'avoir tant appris au cours de ma dernière année clinique.*

*Pour votre totale disponibilité et toutes les connaissances que vous m'avez apportées, veuillez trouver dans cette thèse, l'expression de mes remerciements les plus sincères, mon profond respect et mon amitié.*

*Avec le Dr D'Incau et le Dr Samot, vous resterez comme les premiers mentors de ma construction professionnelle.*

A notre Rapporteur de thèse

Monsieur le Docteur Arnaud Soenen

Ancien Assistant Hospitalo-Universitaire

Sous-section Prothèses 58-02

*Je tiens à vous remercier pour l'aide, le soutien et la patience dont vous avez fait preuve lors de mes premiers travaux pratiques à la faculté. Votre expertise en CFAO accompagnée de votre disponibilité aura été d'une grande aide dans l'élaboration de ce travail. Cette thèse témoigne de la grande reconnaissance que je vous porte.*

*Veillez trouver ici, Monsieur, l'expression de ma profonde gratitude.*

## A notre Assesseur

Monsieur le Docteur Emmanuel D'Incau

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section Prothèses 58-02

*Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury de thèse. Je tiens à vous remercier tout particulièrement pour la gentillesse et la patience dont vous avez fait preuve à mon égard lors de mes deux dernières années cliniques. Votre pédagogie et vos connaissances cliniques m'auront profondément marquées et apportées les bases cliniques nécessaires à notre profession.*

*Avec le Dr Contrepois et Dr Samot vous resterez comme les premiers mentors de ma construction professionnelle.*

*Veillez trouver ici, Monsieur, le témoignage de ma respectueuse reconnaissance.*



## A notre Assesseur

Monsieur le Docteur Johan Samot

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section Sciences Biologiques 57-03

*Je suis très sensible à l'honneur que vous me faites en acceptant de participer à ce jury de thèse. Je tiens à témoigner ici du profond respect et de la sympathie que je vous porte. Je vous remercie pour la qualité de votre encadrement et la gentillesse dont vous avez fait preuve tout au long de mes vacances hospitalières.*

*Avec le Dr Contrepois et Dr D'Incau vous resterez comme les premiers mentors de ma construction professionnelle.*

*A ma mère,*

*A qui je dois tout simplement tout...sans toi je ne serais jamais allé au bout de mes études et particulièrement de ce travail. Merci de ton soutien sans limite et de ton aide à tout point de vue. Je t'aime fort et te remercie de tout mon cœur.*

*A mon père et mon frère,*

*Accompagnés de maman vous êtes les personnes qui comptent le plus pour moi, mes mots ne seront jamais assez forts pour exprimer l'amour que j'ai pour vous. Tous ces weekends passés en votre compagnie pour me distraire et me donner la force de poursuivre ce travail resteront des moments forts de ma vie.*

*A mes grands-parents,*

*Que j'aime profondément, merci de votre affection et de votre soutien. Avec une grosse pensée pour mon Papi Noel qui aurait tant aimé être avec nous et me voir soutenir cette thèse.*

*A mes voisins Bernard et Momo,*

*Vous êtes comme ma deuxième famille, votre soutien sans faille durant mes années d'études me touche énormément.*

*A kiki,*

*Je te remercie mon « nigga » de toutes ces heures que tu m'as consacrées à perfectionner ce travail grâce à tes talents d'informaticien. Sans oublier ces nombreuses soirées passées avec nos amis à trinquer à tout et n'importe quoi.*

*Aux différents membres du cabinet dentaire de Lège,*

*Je tiens à vous remercier de votre accueil chaleureux au sein de votre équipe et surtout de la confiance, de la gentillesse et de la patience dont vous avez fait preuve à mon égard.*

*Au Dr Bordes,*

*Qui m'a donné le goût de la CFAO lors de mon stage de 6<sup>ème</sup> année et sans qui ce sujet ne me serait jamais venu à l'idée.*

*A Mme Gaubert,*

*Merci de votre aide et votre réactivité pour la traduction du résumé.*

*A mes différents binômes,*

*Maca, Mouna, Floflo et bien sûr Thibault avec qui les vendredis à l'hôpital resteront de grands moments. Au passage désolé pour toutes ces raclées que j'ai pu te mettre à Fifa champion.*

*A mon ami Louis,*

*Un biarrot avec un grand cœur à qui je dois encore apprendre à trouver un cèpe et lui à m'expliquer comment taper dans une balle de golf.*

*A mon cousin Yo,*

*Comment t'oublier mon ami/cousin... tant de soirées, de fous rires, de parties de pêche etc partagés ensemble.*

*A mes amis,*

*Gobi, le coach Seb, Lucas dit « papa », Nana et sans oublier kiki... la fine équipe du jeudi soir. Marion, Fred, Marina, Amber, Malou, Alex, Quentin, Thib, Jb, petit Tom, Cacaille, caca, Juju... et à tous ceux que j'ai pu oublier.*

*Merci pour tous les bons moments partagés avec vous, merci pour les fous rires, les soirées mémorables et celles à venir.*

**L'articulateur virtuel :  
Possibilités actuelles**

# Table des matières

INTRODUCTION.....	6
1. CONTEXTE ACTUEL : DE L'ARTICULATEUR MECANIQUE, A L'OCCLUSION NUMERIQUE SANS ARTICULATEUR VIRTUEL.....	7
1.1 Articulateur mécanique : définition .....	7
1.2 Description d'un articulateur type .....	7
1.3 Classification de LEJOYEUX .....	8
1.3.1 Les occluseurs.....	8
1.3.2 Les articulateurs géométriques .....	8
1.3.3 Les articulateurs anatomiques.....	8
1.3.3.1 Articulateurs non adaptables .....	8
1.3.3.2 Articulateurs semi-adaptables.....	9
1.3.3.3 Articulateurs adaptables .....	9
1.4. Possibilités de programmation.....	9
1.4.1 Arc facial.....	9
1.4.2 Axiographe.....	10
1.4.3 Angle de Bennett .....	11
1.4.4 Pente condylienne (pc).....	12
1.5 Choix de la position de référence.....	12
1.5.1 Occlusion d'Intercuspidie Maximale (OIM) .....	12
1.5.2 Relation Centrée (RC) .....	12
1.6 Indications de l'articulateur .....	13
1.6.1 Analyse occlusale et diagnostic .....	13
1.6.2 Prothèses fixées.....	13
1.6.2.1 Provisoires .....	13
1.6.2.2 Prothèses Fixées de faible à moyenne étendue et avec une OIM fonctionnelle.....	13
1.6.2.3 Prothèses Fixées de grande étendue ou OIM non fonctionnelle	14
1.6.2.4 Prothèses Fixées implanto-portées.....	14
1.6.3 Prothèses Amovibles.....	14

1.6.3.1	Prothèses Amovibles Partielles.....	14
1.6.3.2	Prothèses Amovibles Totales.....	15
1.6.4	Orthodontie .....	15
1.6.4.1	Diagnostic .....	15
1.6.4.2	SET UP .....	15
1.6.4.3	Simulation pré-chirurgicale .....	15
1.6.5	Implantologie .....	15
1.6.6	Conception des gouttières .....	16
1.7	Limites de l'articulateur mécanique.....	16
1.7.1	Limites matériels.....	16
1.7.2	Limites de la reproduction anatomique dentaire et mandibulaire ....	16
1.7.3	Limites de la simulation cinématique .....	17
1.7.4	Etude de TAMAKI .....	18
1.8	CFAO et occlusion numérique sans articulateur virtuel.....	18
1.8.1	La CFAO.....	18
1.8.1.1	Définition .....	18
1.8.1.2	Historique .....	19
1.8.2	Numérisation/Obtention de modèles physiques .....	21
1.8.2.1	Numérisation directe .....	21
1.8.2.2	Numérisation indirecte .....	22
1.8.2.3	Modèles physiques à partir de modèles virtuels.....	22
1.8.3	Techniques d'enregistrement d'occlusion et CAO sans articulateur virtuel .....	24
1.8.3.1	Analyse métrique .....	24
1.8.3.2	Le mordus occlusal .....	25
1.8.3.3	Empreinte vestibulaire.....	25
1.8.3.4	Le FGP (Fonctionnaly Generated Path).....	26
1.8.4	Evolution des matériaux .....	27
2.	MATERIELS ET METHODES .....	28
3.	RESULTATS.....	29

3.1 Historique.....	29
3.2 Définition .....	30
3.3 Articulateurs mathématiques .....	30
3.3.1 Principe .....	30
3.3.1.1 Montage sur une table de montage standardisée .....	31
3.3.1.2 Montage sur une table de montage personnalisée .....	32
3.3.1.3 Double montage : Articulateur physique/Articulateur virtuel ...	33
3.3.2 Indications prothétiques.....	36
3.3.2.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée .....	36
3.3.2.2 D'un double montage : .....	
Articulateur physique/Articulateur virtuel.....	36
3.3.3 Avantages.....	37
3.3.3.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée .....	37
3.3.3.2 D'un double montage : .....	
Articulateur physique/Articulateur virtuel.....	38
3.3.4 Inconvénients/Limites.....	38
3.3.4.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée .....	38
3.3.4.2 D'un double montage : .....	
Articulateur physique/Articulateur virtuel.....	39
3.4 Articulateur virtuel adaptable .....	40
3.4.1 Description du système Jaw Motion Analyzer .....	40
3.4.2 Articulateur DENTCAM <sup>®</sup> de Gaertner et Kordass .....	41
3.4.2.1 Principe .....	41
3.4.2.2 Avantages.....	44
3.4.2.3 Inconvénients .....	44
3.4.3 Le logiciel SICAT.....	44
4. DISCUSSION .....	48

4.1 Arc facial numérique.....	48
4.1.1 Arc facial numérique proposé par Solaberrieta .....	48
4.1.2 Arc facial Zirkonzahn <sup>®</sup> /Face Hunter .....	52
4.2 Utilisations de l'articulateur virtuel .....	56
4.2.1 Orthodontie .....	56
4.2.1.1 Planification de traitement orthodontique .....	56
4.2.1.2 Chirurgie orthognatique .....	56
4.2.2 Prothèses .....	58
4.2.2.1 Analyse pré-prothétique .....	58
4.2.2.2 Prothèses fixées.....	59
4.2.2.3 Prothèses Amovibles .....	61
4.2.3 Pathologie .....	63
4.2.3.1 Détection facette d'usure et bruxisme.....	63
4.2.3.2 Conception de gouttières occlusales .....	63
4.2.4 La chirurgie implantaire guidée.....	64
4.3 Articulateur virtuel adaptable et CAO .....	65
4.4 Articulateur virtuel vs Articulateur mécanique .....	66
CONCLUSION .....	69
BIBLIOGRAPHIE .....	70



# INTRODUCTION

La numérisation et la dématérialisation touchent de nombreux domaines d'activité de notre société. En odontologie, l'extraordinaire révolution numérique a été initiée en 1971 par le Dr François Duret dont les travaux ont abouti à la conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO). L'évolution de cette technologie laisse une part croissante à la numérisation et virtualisation dans la conception et fabrication prothétique.

Grâce à la CFAO, des modèles virtuels peuvent être conçus soit directement par numérisation intrabuccale soit par un scannage du moulage issu d'une empreinte surfacique. Pour augmenter le champ d'application de ces techniques, il est nécessaire de simuler virtuellement l'occlusion tant dans ses aspects statiques que cinétiques afin d'assurer la parfaite intégration de nos restaurations prothétiques dans le système manducateur.

Les diverses méthodes de simulation de la cinématique mandibulaire étaient basées jusqu'à aujourd'hui sur l'utilisation d'articulateur mécanique dans un but diagnostique et thérapeutique. Avec l'apparition de nouveaux matériaux, les procédés de CFAO permettent à la fois la réalisation des infrastructures prothétiques et de restaurations monolithiques en assurant une passivité et une adaptation précise. Le design occlusal se fait donc au sein du logiciel de CAO où l'emploi de l'articulateur virtuel y trouve alors tout son intérêt.

Il paraît aujourd'hui intéressant d'identifier les possibilités actuelles de la simulation virtuelle de l'occlusion.

Afin de tenter de répondre à cette interrogation, une revue de la littérature a été réalisée pour identifier les applications pratiques, les possibilités de programmation et les perspectives d'évolution de cette technologie.

# 1. Contexte actuel : De l'articulateur mécanique, à l'occlusion numérique sans articulateur virtuel

## 1.1 Articulateur mécanique : définition

L'articulateur est un instrument mécanique permettant la simulation externe de la cinétique mandibulaire du patient (Fig. 1). Il permet la mise en relation de moulages des arcades antagonistes dans une position mandibulaire de référence qui peut être articulaire (la relation centrée) ou dentaire (occlusion d'intercuspidie maximale : OIM). Le montage sur articulateur de ces moulages est utile à des fins diagnostiques pour l'analyse occlusale et thérapeutique dans la réalisation prothétique faite au laboratoire. La précision de cette simulation cinématique est liée à un certain nombre de paramètres, modifiables ou non selon le type d'appareil et son niveau de programmation. Il existe donc plusieurs articulateurs mécaniques qui se différencient par leur niveau de précision dans la reproduction du mouvement mandibulaire [10, 27].



Figure 1 : Articulateur mécanique Artex®  
[22]

## 1.2 Description d'un articulateur type

L'articulateur est un système de double tripode se déplaçant l'un par rapport à l'autre. Il comprend une branche inférieure avec un point d'appui antérieur qui est la table incisale, cela correspond à la mandibule du patient. La branche supérieure comporte elle les boîtiers plus ou moins réglables et sa partie antérieure contient la tige incisive reposant sur la table incisale. Quand les boules condyliques sont solidaires de la branche inférieure, l'articulateur est dit type Arcon (système proche de la réalité). Il est de type Anti-Arcon quand les boules sont solidaires de la branche supérieure [10, 27].

## **1.3 Classification de LEJOYEUX**

### **1.3.1 Les occluseurs**

Ce sont des simulateurs capables de simples mouvements d'ouvertures et de fermetures fonctionnant comme une simple charnière. Aucune cinétique mandibulaire n'est possible, seule l'occlusion d'intercuspidie maximale (OIM) peut être reproduite [53].

### **1.3.2 Les articulateurs géométriques**

Ce sont des articulateurs non adaptables. Ces dispositifs sont construits sur des valeurs moyennes dont l'articulation entre branches supérieure et inférieure ne représente pas les articulations temporo mandibulaires. L'axe charnière de l'articulateur est situé au niveau du centre instantané de rotation qui est plus bas et plus en arrière que l'axe charnière du patient. Le plan horizontal de référence est le plan de Camper [27].

### **1.3.3 Les articulateurs anatomiques**

Ce sont des articulateurs dont l'articulation entre les branches supérieure et inférieure représentent les articulations temporo mandibulaires et dont le plan horizontal de référence est souvent le plan de Francfort. Il en existe trois types : les articulateurs non adaptables, les semi-adaptables et les adaptables.

#### ***1.3.3.1 Articulateurs non adaptables***

Ces instruments permettent des mouvements horizontaux (latéralité, propulsion) et verticaux (ouverture, fermeture) mais ne permettent pas d'orienter les trajectoires condyliennes qui sont : la pente condylienne et l'angle de Bennett. Les paramètres des boîtiers condyliens sont fixés par le constructeur et aucune programmation n'est possible [27].

### ***1.3.3.2 Articulateurs semi-adaptables***

Avec ce type d'articulateur, on peut orienter nos modèles correctement par rapport à l'axe charnière terminal en utilisant un arc facial. Les mouvements verticaux et horizontaux ainsi que la reproduction moyenne des trajectoires condyliennes sont possibles. Selon leur conception, les pentes condyliennes, les angles de Bennett et le plateau incisal sont réglables [9]. Il existe deux générations d'articulateurs semi-adaptables :

1<sup>ère</sup> génération : Ces articulateurs proposent le réglage de la pente condylienne et de l'angle de Bennett aux valeurs souhaitées. Les déplacements condyliens simulés s'effectuent de façon rectiligne entre les positions limites. La cinématique mandibulaire reste donc approchée.

2<sup>ème</sup> génération : Sur ces articulateurs, les déplacements des boules condyliennes dépendant de l'angle de Bennett sont courbes grâce à l'utilisation d'inserts interchangeables de courbures différentes ; ou fixes à courbures variables. Aucun équivalent mécanique ne le permet sur les modèles non Arcon. Ces articulateurs ne peuvent pas simuler les mouvements fonctionnels de mastication car le mur postérieur des boîtiers condyliens ne peut être réglé. Par conséquent, la rétrusion du condyle mastiquant et donc les guidages dento-dentaires mastiquants ne peuvent être réglés.

### ***1.3.3.3 Articulateurs adaptables***

Tous les mouvements mandibulaires peuvent être reproduits avec les trajectoires condyliennes exactes relevées par axiographie. La distance intercondylienne peut être ajustée et l'orientation correcte des modèles avec un arc facial est possible. La simulation du mouvement de Bennett grâce à la programmation du boîtier condylien du côté travaillant est possible. Cela permet donc l'établissement des contacts dento-dentaires fonctionnels en entrée de cycle masticatoire [27].

## **1.4. Possibilités de programmation**

### **1.4.1 Arc facial**

C'est un dispositif en forme d'arc permettant d'enregistrer la position du maxillaire par rapport à l'axe charnière du patient (Fig. 2). L'arc facial sert à transférer cette position sur l'articulateur. Pour enregistrer cette position du maxillaire, le praticien prend généralement le plan axio-orbitaire comme référence. Ce plan horizontal de référence passe par les points condyliens et le point infra-orbitaire. L'axe charnière est un axe virtuel passant par le centre

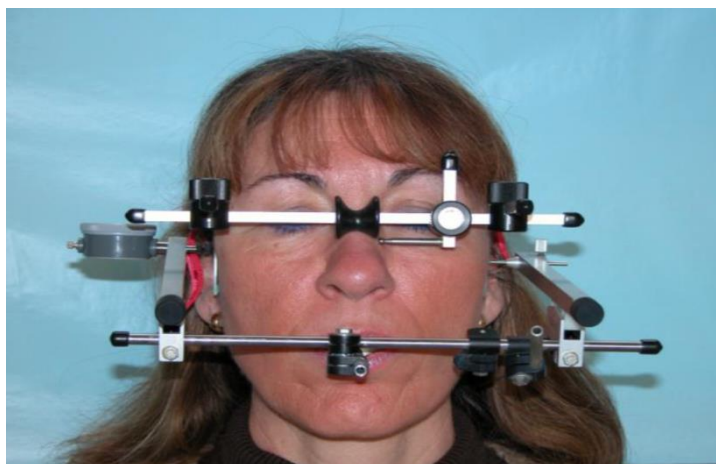
de rotation de chaque condyle, dans les petits mouvements d'ouvertures et de fermetures de la mandibule. L'arc facial permet donc de déterminer la position et l'orientation optimale du modèle maxillaire par rapport aux boîtiers de l'articulateur. Un montage sans cet instrument rend aléatoire la situation du modèle maxillaire et peut entraîner des erreurs dans la reproduction de la cinématique mandibulaire du patient, avec des conséquences sur l'occlusion prothétique [10,21].



***Figure 2 : Arc facial Quick<sup>®</sup> [22]***

#### **1.4.2 Axiographe**

L'axiographe est un appareil qui permet d'analyser le mouvement condylo-discal des articulations temporo mandibulaires dans les trois plans de l'espace (Fig. 3). Il permet de mesurer les déterminants postérieurs condyliens : l'angle de Bennett et la trajectoire de la pente condylienne. En dehors de l'axiographie et des pantographes complexes, les cires de propulsion et de latéralité permettent une détermination acceptable en clinique des pentes condyliennes et angles de Bennett du patient [21].



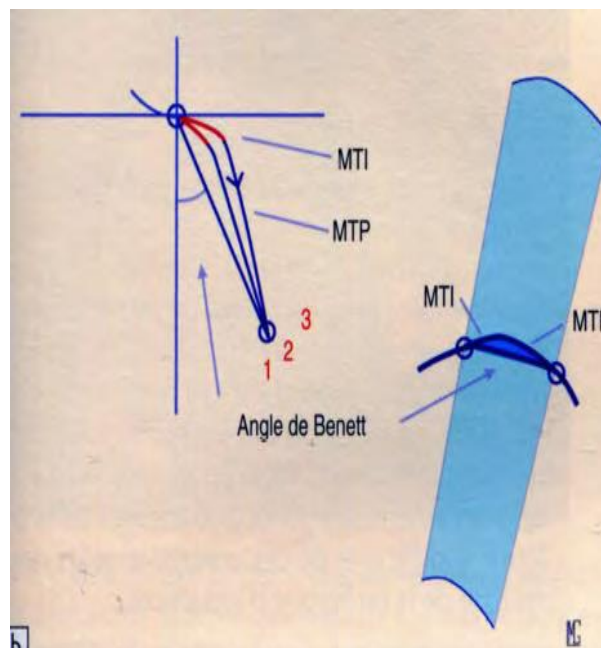
***Figure 3 :Axiographe SAM<sup>®</sup> vu de face [22]***

### 1.4.3 Angle de Bennett

L'angle de Bennett est défini comme étant la projection sur un plan horizontal de l'angle formé par la corde de la trajectoire du condyle orbitant avec un plan sagittal pendant la diduction du côté non travaillant (Fig. 4) [3,21].

Sur cette pente, le condyle poursuit une trajectoire diagonale centripète qui peut être subdivisée en deux phases [40] :

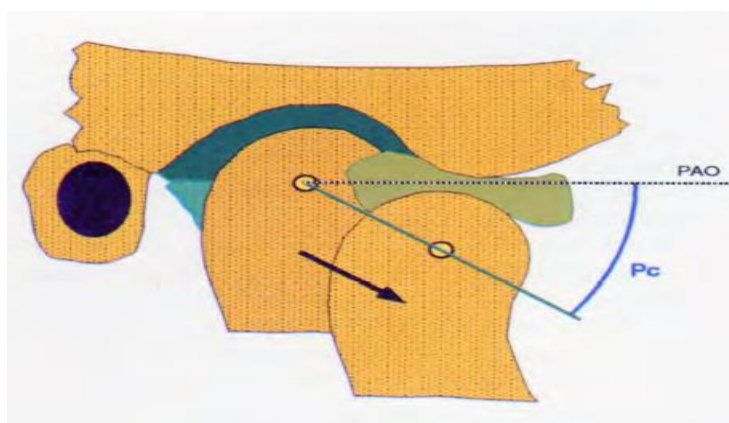
- Un début de sortie de cycle caractérisé par une inflexion initiale à composante principalement transversale appelée mouvement transversal immédiat (MTI).
- Une fin de sortie de cycle plus rectiligne, à composante antérieure dominante et appelée mouvement transversal progressif (MTP).



**Figure 4 : Angle de Bennett [40]**

#### 1.4.4 Pente condylienne (pc)

Fonctionnellement, elle correspond au guidage des unités ménisco-condyliennes dans le plan sagittal le long du versant antérieur des fosses mandibulaires de l'os temporal. Elle est donc définie par l'angle formé entre le plan axio orbitaire (pao) et la droite rejoignant le point de référence du condyle dans la fosse mandibulaire (en OIM ou en relation centrée) au point de mesure (en bout à bout incisif ou position intermédiaire) (Fig. 5) [3, 21, 48].



**Figure 5 : Pente condylienne [48]**

### 1.5 Choix de la position de référence

#### 1.5.1 Occlusion d'Intercuspidie Maximale (OIM)

L'OIM est la position d'occlusion pour laquelle les contacts inter-arcades sont maximaux. Elle est indépendante de la position condylienne, obtenue cliniquement lorsque l'intensité des contractions musculaires isométriques est maximale et qu'un maximum de dents antagonistes sont en contact. Le praticien se doit de renforcer ou restaurer cette position physiologique lorsqu'elle s'avère fonctionnelle, précise, stable et unique. L'OIM est utilisée pour la réalisation des prothèses de faible étendue dans un contexte exempt de pathologie occlusale [3, 21, 37].

#### 1.5.2 Relation Centrée (RC)

La relation centrée correspond à la position la plus haute et la plus antérieure de contact articulaire condylo-disco-temporal favorisant la rotation des condyles suivant un axe charnière, elle est référentielle et reproductible. Le montage en RC est indiqué pour les actes diagnostiques et thérapeutiques qui refaçonnent une nouvelle OIM lorsque celle initialement présente se révèle inexploitable ou impossible à trouver [37].

## **1.6 Indications de l'articulateur**

### **1.6.1 Analyse occlusale et diagnostic**

La mise en articulateur permet de faire une analyse occlusale dans un contexte d'observation plus facile que celui clinique (langue, joue ...). Cette analyse diagnostic se fait avec un montage en relation centrée ou en OIM [8, 10].

Ce montage permet d'évaluer le calage, le centrage pour identifier un éventuel décalage transversal et la dimension verticale d'occlusion. Les guidages peuvent être vérifiés en simulant les mouvements de propulsion et diduction. La hauteur prothétique disponible, les courbes occlusales et les classes dentaires sont aussi contrôlées.

A la suite de cette analyse occlusale, une simulation pré-prothétique à partir de cire diagnostique (wax-up ou montage directeur) peut être présentée au patient.

### **1.6.2 Prothèses fixées**

#### ***1.6.2.1 Provisoires***

L'articulateur peut servir de support à la réalisation de ces provisoires afin d'obtenir une situation articulaire stable et fonctionnelle. Ces provisoires sont réalisées à partir des Wax-up élaborés suite à l'analyse occlusale et au projet prothétique pré-défini [38].

#### ***1.6.2.2 Prothèses Fixées de faible à moyenne étendue et avec une OIM fonctionnelle***

L'OIM est dite fonctionnelle lorsqu'elle permet le centrage, guidage et calage (au moins 3 couples de dents cuspidées encore présents) de la mandibule par rapport au maxillaire [37, 38].

Un simple occluseur est nécessaire si les restaurations concernent des dents cuspidées ne participant pas au guidage (guide canin).

Si ces restaurations postérieures font partie d'une fonction groupe alors le montage sur articulateur semi-adaptable de 2<sup>ème</sup> génération est conseillé [38].

Si la prothèse concerne une à deux dents intercalaires antérieures, une simple clé palatine de la provisoire peut suffire à la conception de la prothèse définitive.



En revanche, si la restauration implique plus de deux dents antérieures, la programmation de la pente incisive de 10° supérieure à la pente condylienne s'impose afin de régler les zones de guidages lors de la simulation des mouvements sagittaux [21]. Un articulateur semi-adaptable équipé d'une table incisive inclinable est nécessaire.

### ***1.6.2.3 Prothèses Fixées de grande étendue ou OIM non fonctionnelle***

La position de référence utilisée sera dans toutes les situations la relation centrée. L'articulateur constitue la seule mécanique capable de simuler la position des modèles en RC. La simulation des mouvements mandibulaires à partir des déterminants postérieurs programmés nécessite au minimum l'utilisation d'un articulateur semi-adaptable [9,38]. Il est primordial d'utiliser un arc facial pour réaliser le montage sur articulateur.

### ***1.6.2.4 Prothèses Fixées implanto-portées***

L'utilisation ou non d'un articulateur et les critères pris en compte dans le choix de notre articulateur sont identiques à ceux de la prothèse fixée dento-portée. Seuls les ajustements occlusaux seront différents compte tenu de la mobilité quasi nulle de l'implant [36].

L'avantage de l'articulateur en PF est de permettre une analyse occlusale afin de choisir la relation intermaxillaire et le schéma occlusal appropriés. Enfin, cela réduit les retouches occlusales en clinique qui pourraient fragiliser la prothèse d'usage [38].

## **1.6.3 Prothèses Amovibles**

### ***1.6.3.1 Prothèses Amovibles Partielles***

Comme en prothèse fixée, l'utilisation de l'articulateur intervient dans la phase diagnostic puis dans les étapes de réalisation des prothèses. Du concept occlusal choisi suivant la situation clinique découle la façon d'utiliser l'articulateur. Dans les cas pour lesquels la dimension verticale d'occlusion doit être modifiée, les modèles sont montés en RC et les paramètres condyliens déterminés. Enfin, si la classe d'édentement nécessite la construction de la prothèse en occlusion balancée, la programmation précise de l'articulateur est recommandée. A défaut, les pentes condyliennes sont programmées à 40° et l'angle de Bennett à 15° [54].

### ***1.6.3.2 Prothèses Amovibles Totales***

En l'absence de toute référence dentaire, le montage sur articulateur des modèles en RC est primordial. Une occlusion balancée bilatéralement équilibrée est recherchée. Il est donc préférable d'utiliser un arc facial pour effectuer la mise en articulateur du modèle maxillaire. L'OIM d'une prothèse amovible totale se fait en relation centrée à la dimension verticale d'occlusion déterminée esthétiquement et phonétiquement. L'articulateur peut être ajusté suivant des valeurs enregistrées par axiographie.

## **1.6.4 Orthodontie**

### ***1.6.4.1 Diagnostic***

L'évaluation des fonctions occlusales lors de l'examen clinique initial s'avère parfois difficile en orthodontie. L'analyse occlusale sur articulateur permet de déterminer le plan de traitement et ce montage sert de référence initiale [43].

### ***1.6.4.2 SET UP***

Les déplacements dentaires sollicités en orthodontie sont simulés grâce au montage des dents en plâtre sur cire (SET UP). La position de chaque dent est alors modifiée au fur et à mesure jusqu'à sa position occlusale finale désirée. L'articulateur permet l'analyse des conséquences occlusales statiques et dynamiques des différentes hypothèses thérapeutiques [43].

### ***1.6.4.3 Simulation pré-chirurgicale***

Dans le cadre de l'élaboration des plans de traitement concernant les chirurgies correctrices des malformations ou dysmorphoses maxillo-mandibulaires ; la visualisation des déplacements du maxillaire sur l'articulateur des moulages moulés en RC, permet aux praticiens de prévoir sur les modèles les conséquences morphologiques et occlusales de la chirurgie orthognatique [43].

## **1.6.5 Implantologie**

Dans ce cadre, l'utilisation de l'articulateur permet une analyse occlusale et donc la création de cire diagnostique préfigurant la future prothèse. Ce Wax-up est utile dans la conception du guide d'imagerie implantaire (et chirurgical) afin de faciliter la mise en place des implants dans un contexte occlusal favorable [8].

### **1.6.6 Conception des gouttières**

Le chirurgien-dentiste est amené à réaliser des orthèses de différentes natures selon le contexte clinique. Ces gouttières sont élaborées le plus souvent en RC. L'efficacité de ces dispositifs inter-occlusaux dépend en partie de la précision des réglages. Leur conception sur articulateur semi-adaptable programmé avec des valeurs moyennes ou des valeurs axiographiques est conseillée. Le montage du modèle maxillaire par arc facial est alors nécessaire.

Dans ces dispositifs inter occlusaux, on retrouve plusieurs types de gouttières : les gouttières de reconditionnement musculaire et les gouttières de repositionnement (de réduction pour les déplacements discaux, de décompression articulaire et de stabilisation).

## **1.7 Limites de l'articulateur mécanique**

### **1.7.1 Limites matériels**

Les nombreuses contraintes subies par les articulateurs (poids des modèles, mouvements répétés ...) sont susceptibles au fil du temps d'entraîner une déformation du système et donc une perte de précision. Il est donc préférable d'utiliser des systèmes mécaniques en métal. Le praticien et prothésiste doivent vérifier l'absence d'usure ou de jeu des pièces entre elles pour s'assurer de la fiabilité de l'articulateur dans la reproduction de la cinématique mandibulaire. De plus, le relevé par arc facial du plan axio orbitaire pour le montage sur articulateur reste approximatif par rapport au nombre d'étapes et de manipulations que cela nécessite.

La simulation du système manducateur avec un articulateur présente l'inconvénient de n'être qu'une approche car il est difficile de reproduire l'anatomie et la cinétique mandibulaire.

### **1.7.2 Limites de la reproduction anatomique dentaire et mandibulaire**

La capacité de reproduction des arcades est limitée par [10, 53] :

- L'imprécision tridimensionnelle du matériau à empreinte.
- L'imprécision tridimensionnelle du plâtre des moulages à cause de l'expansion de prise du matériau.
- La distorsion et déformation de l'arcade mandibulaire lors de la prise d'empreinte.

- La non-reproductibilité des déformations physiologiques assurées par le desmodonte soumis aux pressions occlusales (mobilité de 0,2 mm). Le plâtre étant un matériau rigide ne le permet pas.
- La déformation du matériau d'enregistrement de la position de référence ou thérapeutique pour repositionner les modèles sur articulateur (cire, silicone ...).
- L'orientation du modèle en plâtre maxillaire aléatoire car l'utilisation de l'arc facial entraîne des erreurs de manipulation.
- La non-reproductibilité des rapports esthétiques et phonétiques entre les dents et les tissus mous environnants.
- La non-reproductibilité de la résilience des tissus mous.

### **1.7.3 Limites de la simulation cinématique**

La simulation du système manducateur se heurte à [10, 53] :

- L'absence de déformation du moulage mandibulaire,
- L'absence de simulation de la compressibilité de l'Articulation Temporo Mandibulaire (800  $\mu\text{m}$ ),
- L'absence de contrôle du système neuromusculaire sur les mouvements,
- L'absence de simulation des parafunctions (doivent être détectées préalablement cliniquement).

Les articulateurs ont pour vocation de simuler les mouvements mandibulaires de tous les individus, ceci est rendu possible par la simplification des formes anatomiques avec pour conséquence des erreurs de simulation. En effet, les ATM sont souvent réduites à un plan provoquant une sous-évaluation des mouvements reproduits. L'articulateur tient compte de la corde du mouvement clinique sans en épouser le trajet réel. Le fonctionnement de ces systèmes mécaniques se fait autour d'axes de symétrie absents chez l'être humain.

Ces différents éléments cités entraînent une diminution de la fiabilité et de la précision des contacts occlusaux statiques mais surtout dynamiques.

### **1.7.4 Etude de TAMAKI**

Cette étude de 1997 [64] a comparé les contacts dynamiques retrouvés sur un articulateur mécanique avec ceux retrouvés sur un mordu en cire. Seuls les quatre premiers mm de propulsion et de latéralité droite et gauche ont été examinés. Les modèles maxillaires et mandibulaires de 45 personnes ont été montés sur articulateur en OIM avec l'aide d'un arc facial et d'un axiographe électronique pour relever les pentes condyliennes et angle de Bennett des patients. Le matériau d'empreinte utilisé est un alginate et l'articulateur choisi est un semi-adaptable SAM2<sup>®</sup>.

Les résultats ont montré que 82 % des contacts en propulsion sont reproduits avec 66 % correctement placés. Concernant la diduction droite et gauche, 90 % des contacts sont reproduits avec 81 % de bien placés.

De plus, l'articulateur mécanique créerait de nouveaux contacts occlusaux qui sont absents en bouche.

Ce type d'étude nous montre que malgré les différentes méthodes et dispositifs à notre disposition pour programmer l'articulateur, celui-ci ne reste qu'une approximation dans la reproduction de la dynamique masticatoire du patient.

## **1.8 CFAO et occlusion numérique sans articulateur virtuel**

### **1.8.1 La CFAO**

#### *1.8.1.1 Définition*

La CFAO ou Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur comporte deux notions différentes [66] :

- La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) qui est un ensemble de systèmes informatiques permettant d'accélérer les temps de conception et d'augmenter le niveau de précision.
- La FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qui est le processus de fabrication comme peut l'être la machine-outil en odontologie.

La CFAO dentaire se caractérise par l'association d'un système de numérisation, d'un logiciel de CAO qui traite les données numérisées pour concevoir la pièce prothétique et enfin d'une unité de production (ou machine-outil) qui fabrique la prothèse à partir des données issues du logiciel (Fig. 6).



**Figure 6 : Logiciel de CAO et machine-outil SIRONA<sup>®</sup> [69]**

### ***1.8.1.2 Historique***

La CFAO fut introduite dans la profession dentaire en 1971 par le Dr François Duret qui deux ans plus tard publia le premier ouvrage consacré à la CFAO dentaire et médicale sous la forme d'une thèse intitulée « Empreinte optique » [11,12,13].

En 1983, aux Entretiens de la Garancière, il présenta en public la première démonstration de la CFAO dentaire et de la « couronne en 20 minutes ».

En 1985, au congrès international de l'Association Dentaire Française à Paris, le Dr François Duret présenta le premier système de CFAO de la société HENNSON<sup>®</sup> et réalisa la première couronne usinée (Fig. 7).



**Figure 7 : Dr. DURET François, pionnier de la CFAO**

De 1985 à 1992, plusieurs grandes philosophies de développement se distinguèrent dans cette période de lutte scientifique et technologique. Celle du Dr Moermann soutenue par le groupe SIEMENS<sup>®</sup> dentaire (qui deviendra SIRONA<sup>®</sup>) qui se concentra sur le concept « chair side » se limitant à la conception d'inlays/onlays/facettes directement au fauteuil [67].

L'équipe du Dr Duret soutenue par la société HENNSON<sup>®</sup> s'orientera vers un mélange de CFAO au cabinet et au laboratoire afin de réaliser tout type de prothèses de l'inlay au bridge complet.

Enfin, au début des années 1990, Andersson mit en place une 3<sup>ème</sup> philosophie avec l'apparition du système PROCERA<sup>®</sup> dont la FAO se déroulait dans des centres de production industriels délocalisés.

Le début du 21<sup>ème</sup> siècle marque un tournant dans la recherche et le développement de nouveaux matériaux usinables avec en parallèle un progrès important sur les machines-outils qui gagnent en précision et puissance. Ces différentes évolutions ont permis à la CFAO de s'ouvrir vers les autres domaines de la dentisterie et non plus seulement sur certains cas de prothèses fixées. De plus, comme l'avait prédit Andersson dans les années 1990, il est maintenant possible d'unir la prise d'empreinte optique et les coupes tomographiques tridimensionnelles. Cela ouvre de grandes possibilités en implantologie afin de gagner en précision dans la phase chirurgicale et prothétique. L'analyse pré-implantaire devient alors plus aisée.

De nos jours, la CFAO prend une place de plus en plus importante au sein de notre profession car elle est garante d'une précision et d'une reproductibilité de travail élevée.

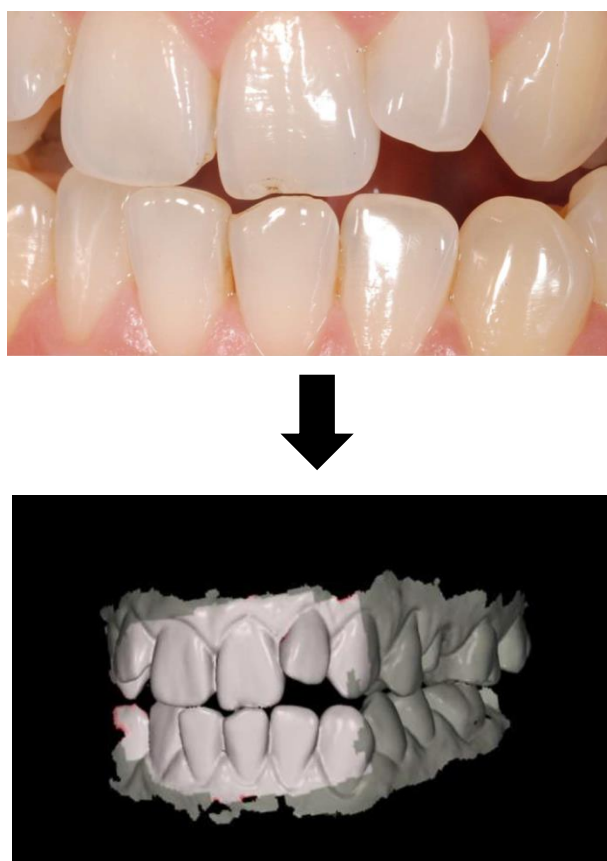
## 1.8.2 Numérisation/Obtention de modèles physiques

La première étape consiste à obtenir un modèle de travail numérique ou physique à partir d'une empreinte optique ou conventionnelle.

### 1.8.2.1 Numérisation directe

Cela consiste en une prise d'empreinte optique directement dans la bouche du patient. Cette acquisition numérique permet au praticien d'avoir un modèle de travail virtuel directement utilisable dans les logiciels de CAO (Fig. 8) [57].

L'empreinte optique peut être réalisée avec poudrage des surfaces dentaires (coating) ou sans suivant le système d'acquisition utilisé.



***Figure 8 : Numérisation directe (photos du Dr Soenen)***

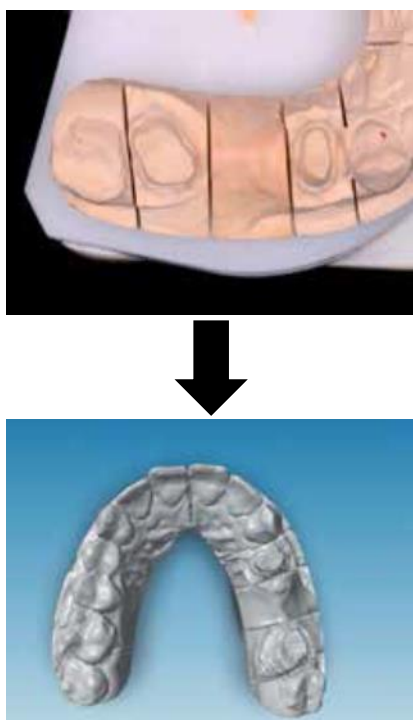


### *1.8.2.2 Numérisation indirecte*

Le praticien effectue une empreinte chimico-manuelle au cabinet dentaire à l'aide d'un porte-empreinte individuel ou d'un porte-empreinte du commerce. Le matériau d'empreinte utilisé diffère selon la situation clinique.

L'empreinte est ensuite coulée avec du plâtre afin d'obtenir un modèle de travail physique qui sera plus ou moins modifié par le prothésiste en fonction du travail prothétique (détourage, pose des pins...) en prothèse fixée ou simple coulée en prothèse amovible.

Jusqu'ici, toutes les étapes sont identiques à une méthode classique. L'étape numérique apparaît lorsque le laboratoire de prothèse procède au scannage du modèle de travail physique pour obtenir un modèle virtuel (Fig. 9) [26].



**Figure 9 : Numérisation indirecte [26]**

### *1.8.2.3 Modèles physiques à partir de modèles virtuels*

Le prothésiste, pour plusieurs raisons, peut être amené à repasser à un modèle de travail physique malgré la numérisation directe ou indirecte réalisée au début.

Le passage à un modèle physique peut avoir plusieurs intérêts. Par exemple, si le prothésiste décide de réaliser seulement l'infrastructure prothétique par FAO.

Il pourra alors réaliser les différentes étapes de stratification de la céramique cosmétique de la pièce prothétique.

Le modèle physique peut permettre aussi au prothésiste de repasser à un montage sur articulateur mécanique avec arc facial.

Il existe plusieurs méthodes pour obtenir ces modèles [30,67] :

- Modèles par fraisage

Cette approche est appelée « méthode soustractive », elle consiste à obtenir le modèle de travail à partir du modèle numérique par fraisage d'un bloc préfabriqué.

- Modèles par stéréolithographie

La stéréolithographie est une « méthode additive » consistant à mettre en forme un objet par ajout de matières en empilant plusieurs couches successives. Cette technique dite de prototypage rapide permet de fabriquer des modèles SLA en résine à partir d'un modèle numérique (Fig. 10).



**Figure 10 : Modèles obtenus par stéréolithographie [69]**

- Modèles par impression 3D

La machine-outil est une imprimante 3D qui élabore, par prototypage rapide, les modèles prothétiques en résine. Les données numériques sont envoyées au système de production qui par un procédé d'impression en modelage par jets de gouttes multiples « imprime » les modèles couche par couche. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume.

### **1.8.3 Techniques d'enregistrement d'occlusion et CAO sans articulateur virtuel**

Le modèle virtuel a été obtenu par numérisation directe ou indirecte. Suivant la situation clinique, le praticien n'est pas nécessairement obligé de passer par un simulateur mécanique ou virtuel de la cinétique mandibulaire. Cependant, certaines informations occlusales doivent être données au logiciel de CAO pour obtenir une prothèse intégrée au système manducateur du patient. Certains modules des logiciels de CAO analysent et intègrent directement ces informations, permettant au praticien (ou prothésiste) de diminuer les manipulations et retouches occlusales. Cette gestion de l'occlusion par CFAO n'est possible que dans certaines situations de restaurations unitaires ou de petites étendues. Il existe actuellement quatre méthodes figurant dans les systèmes de CFAO pour répondre à cette situation clinique [30].

#### ***1.8.3.1 Analyse métrique***

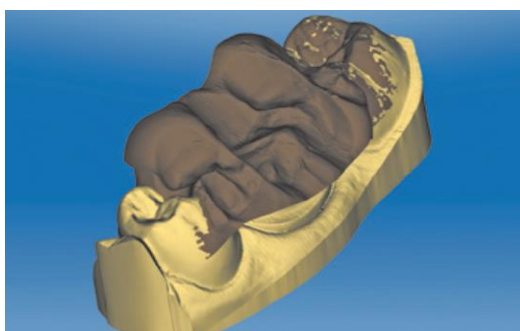
Cette solution nécessite seulement l'empreinte optique de l'arcade concernée par la restauration. Le praticien n'a pas besoin d'effectuer l'empreinte optique de l'occlusion et de l'antagoniste. La construction de la table occlusale de la future prothèse se fait à partir de l'analyse morphologique des dents environnantes réalisée par le logiciel de CFAO [30,33].

En effet, de puissants algorithmes contenus à l'intérieur du logiciel peuvent remonter jusqu'au plan de construction génétique en analysant les parois résiduelles de la dent à restaurer ou des dents voisines (position des cuspides, crêtes marginales, ligne de transition ...). Cette méthode peut s'avérer fiable notamment pour les inlays/onlays où la dent à restaurer est partiellement délabrée [1, 7, 50].

L'analyse géométrique n'est pas utilisable dans le cas où l'anatomie des dents restantes est particulière ou avec des guidages amoindris. Sinon, des interférences occlusales risquent d'apparaître dans le déclenchement des mouvements.

### ***1.8.3.2 Le mordu occlusal***

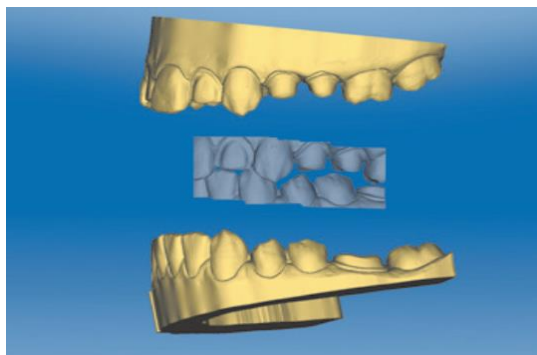
Cette méthode nécessite une empreinte optique de l'arcade concernée par la préparation ainsi que d'une acquisition numérique de l'empreinte laissée par l'antagoniste dans un matériau plastique (Fig. 11). Celui-ci peut être de la cire ou du silicone d'occlusion. L'empreinte numérique de l'arcade antagoniste n'est pas nécessaire car le logiciel va recréer en volume le négatif laissé dans l'empreinte du mordu occlusal réalisé en occlusion statique (OIM). Ce procédé peut être utilisé pour les inlays/onlays, couronnes unitaires ou encore deux couronnes consécutives si la reconstruction prothétique est encastrée [1, 16, 24, 30, 61].



**Figure 11 : Mordu occlusal avec le logiciel CEREC<sup>®</sup> 3.8 [24]**

### ***1.8.3.3 Empreinte vestibulaire***

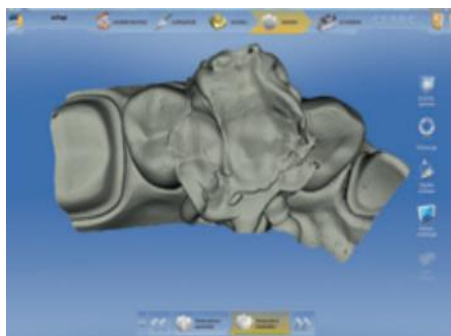
Cette solution demande au praticien d'effectuer trois acquisitions numériques : une de l'arcade concernée, une de l'antagoniste et enfin une empreinte vestibulaire des deux arcades en occlusion statique (OIM) suffisamment large pour que le logiciel puisse confronter les modèles des deux arcades (Fig. 12). Cette méthode est assez longue compte tenu des différentes acquisitions obligatoires mais reste une des plus pratiquées. Les indications cliniques sont identiques à celle du mordu occlusal [16, 24, 30, 61].



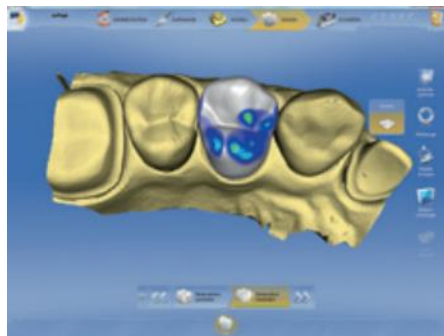
**Figure 12 : Les trois acquisitions numériques avant assemblage avec le logiciel CEREC<sup>®</sup> 3.8 [24]**

### ***1.8.3.4 Le FGP (Functionally Generated Path)***

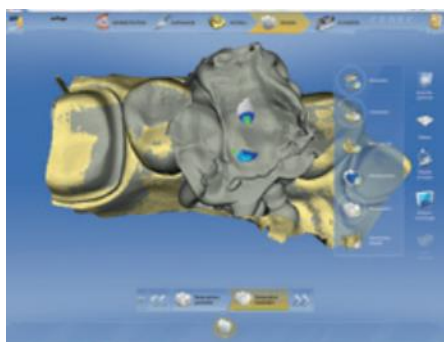
Ce procédé proposé par Meyer puis Dawson a été adapté numériquement par le Dr Raynal. Il présente l'avantage d'optimiser l'anatomie occlusale puisqu'elle est construite en fonction des trajets fonctionnels. Le praticien doit réaliser l'empreinte optique de l'arcade ainsi que l'acquisition numérique de l'empreinte statique en OIM de la dent antagoniste laissée dans un matériau plastique (Fig. 13). Comme pour un mordue occlusal, le logiciel reconstruit alors l'anatomie occlusale de la dent antagoniste à partir du négatif obtenu (Fig. 14). Le même procédé est appliqué avec un second enregistrement mettant en œuvre les trajets de guidage pris en compte par un support modelable lors des mouvements de diduction et propulsion du patient. La clé numérique de cet enregistrement est placée sur la future prothèse conçue en OIM. L'élimination des interférences fonctionnelles est alors possible (Fig. 15). Cette méthode peut venir s'ajouter aux indications vues ci-dessus, avec en plus la possibilité de réaliser des couronnes dans des situations cliniques aux faibles guidages [16, 24, 30, 61].



***Figure 13 : FGP numérisé avec le logiciel CEREC® 3.8 [24]***



***Figure 14 : Proposition biogénérique [24]***



***Figure 15 : Contrôle des interférences occlusales à l'aide du FGP [24]***

Malgré ces quatre méthodes utilisées pour contrôler et recréer l'occlusion, les indications cliniques se limitent à des restaurations prothétiques de faibles étendues. L'utilisation de l'articulateur virtuel développée plus loin accompagnée de l'évolution de la qualité des matériaux ont permis au praticien/prothésiste de profiter de la précision de la CFAO dans le cas des restaurations de grandes étendues.

#### **1.8.4 Evolution des matériaux**

La véritable révolution en CFAO intervient au niveau des matériaux et de leur mise en forme. Toutes les familles de matériaux sont aujourd'hui accessibles par usinage : les alliages métalliques, les différentes céramiques traditionnelles, les composites, les résines ainsi que les nouveaux matériaux hybrides (réseau de céramique infiltré de polymères). Ces matériaux usinables dans des blocs de petite ou grande dimension associés à l'utilisation de l'articulateur virtuel, ont permis de concevoir des reconstructions prothétiques de grandes étendues par CFAO. L'amélioration bio-mécanique et esthétique de certains de ces matériaux ont permis la réalisation de restaurations monoblocs avec un design occlusal dès la conception et fabrication prothétique par CFAO [5, 44]. La chaîne numérique peut être préservée en partie tout en respectant les concepts occlusaux incontournables pour assurer la pérennité des prothèses. Toutes les situations cliniques nécessitant une reconstruction prothétique fixe sur dents naturelles ou sur implants peuvent être traitées par CFAO. La gestion de l'occlusion dans les logiciels de CAO étant possible et précise, la CFAO s'ouvre vers d'autres domaines de la dentisterie tels que la prothèse amovible complète ou encore dans la conception de gouttières occlusales [30].

En parallèle, les machines-outils ne cessent de se perfectionner et les logiciels de CAO de s'améliorer. L'utilisation de l'outil « articulateur virtuel » prend donc tout son sens.

L'objectif de ce travail a donc été, sur la base de la littérature scientifique, d'identifier les différents types d'articulateurs virtuels et leurs principes de fonctionnement ainsi que les différentes possibilités qu'ils offrent aujourd'hui.

## 2. Matériels et méthodes

La base de données électroniques PUBMED a été utilisée pour la recherche d'articles. La combinaison des mots clés utilisée a été « virtual articulator » et « occlusion and CAD/CAM ».

Les bases de données des sites internet des éditeurs français que sont l'Information Dentaire, la SOP (Société Odontologique de Paris) et les éditions CdP (Cahier de Prothèse) ont aussi été consultées en utilisant les mots clés « articulateur virtuel » et « CFAO et occlusion ».

Une recherche manuelle sur le site internet de l'International Journal of Computerized Dentistry des articles publiés de 2002 à 2014 a été réalisée.

Le titre puis le résumé des articles obtenus ont été étudiés et s'ils semblaient pertinents, le texte intégral était lu puis éventuellement identifié comme une publication d'intérêts.

Les références bibliographiques des différents articles sélectionnés ont été passées en revue. Pour celles qui semblaient intéressantes, les publications auxquelles elles correspondaient ont été lues puis éventuellement intégrées avec les autres publications d'intérêts.

Enfin, les firmes dont sont issus les systèmes de CFAO les plus récents ont été contactées et leur site internet visité afin de vérifier l'existence de nouveaux dispositifs qui n'auraient pas encore fait l'objet de publications.

### 3. Résultats

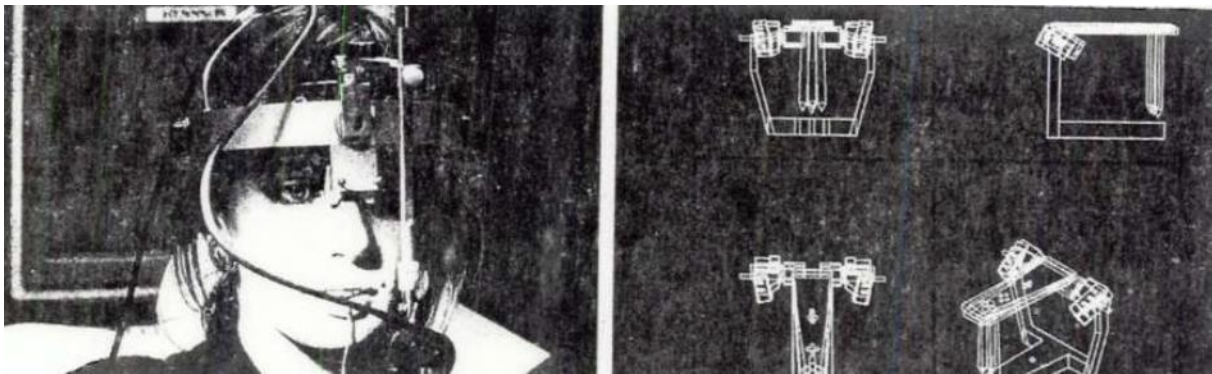
L'étude approfondie des différentes publications d'intérêt a permis de retracer la jeune histoire de l'articulateur virtuel, de lui donner une définition, ainsi que d'identifier les différents dispositifs numériques existants.

#### 3.1 Historique

Il est désormais possible de confronter les arcades virtuelles entre elles grâce à leur positionnement sur un simulateur dont la forme et les fonctionnalités sont les mêmes que celles des simulateurs mécaniques conventionnels. Cette fonction « articulateur virtuel » est intégrée aux logiciels de CAO dentaire par différents distributeurs depuis une dizaine d'années.

Les premières tentatives « d'articulation virtuelle » datent des années 1980 avec notamment l'Access Articulator du Dr Duret (Fig. 16). Ces premières approches, pour répondre à la problématique de l'occlusion dynamique en CAO, ont abouti à un articulateur virtuel dont il était possible de régler les déterminants antérieurs et postérieurs. Une analyse des mouvements mandibulaires était réalisée puis transmise au logiciel de CFAO afin de modifier l'anatomie occlusale de la dent à modéliser. Les premiers axiographes électroniques permettaient des enregistrements opto-électroniques ou électro-magnétiques de la cinématique mandibulaire. A cette époque, les données recueillies ne sont pas assez précises pour être exploitées.

L'espoir d'intégrer ces paramètres au logiciel CAO est né. La programmation individuelle de l'articulateur virtuel est déjà une voie de recherche, afin d'obtenir des surfaces occlusales prothétiques parfaitement adaptées à la morphologie articulaire et neuro musculaire du patient.



***Figure 16 : Premiers enregistrements de la cinématique mandibulaire [65]***



## 3.2 Définition

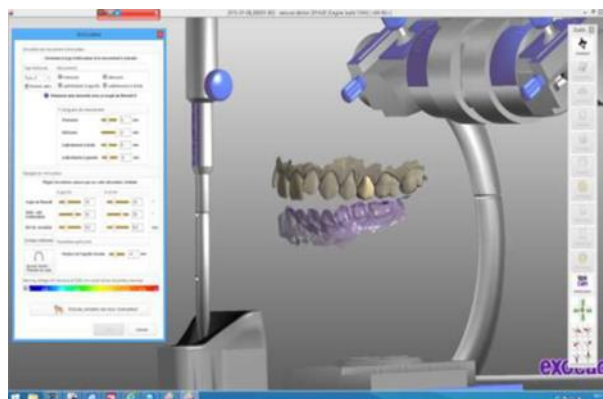
L'articulateur virtuel est un module intégré dans un logiciel permettant la simulation de la cinématique mandibulaire. Il existe à ce jour 2 types d'articulateurs virtuels : les mathématiques se basant sur la simulation mathématique des mouvements mandibulaires et les totalement adaptables où des données réelles de la cinématique mandibulaire sont utilisées [31, 42, 55].

L'utilisation des articulateurs virtuels mathématiques est courante et permet de couvrir les différentes situations cliniques. Les articulateurs virtuels adaptables dont la programmation se fait à partir d'enregistrements électroniques eux ont une utilisation pour l'instant analytique et rarement clinique.

## 3.3 Articulateurs mathématiques

### 3.3.1 Principe

Cet outil virtuel permet de reproduire les mouvements limites mandibulaires de la même façon qu'un articulateur mécanique adaptable ou semi adaptable de 2ème génération. Ses capacités de programmation sont identiques à celle de son homologue mécanique. L'angle/mouvement initial et progressif de Bennett, les pentes condyliennes, la tige incisive sont réglables et les mouvements limites de propulsion/latéralité sont donc également possibles (Fig. 17) [31, 42, 55].



***Figure 17 : Articulateur virtuel EXOCAD  
(image du Dr Soenen)***

Le montage du modèle maxillaire peut être réalisé selon trois procédés, ce qui influe sur la précision de la CAO réalisée par la suite.

### ***3.3.1.1 Montage sur une table de montage standardisée***

Dans ce concept décrit initialement par Szentpétery de la Martin Luther Université de Halle, l'articulateur virtuel 3D est capable de reproduire les mêmes mouvements qu'un articulateur mécanique classique. Cet outil numérique se retrouve désormais dans de nombreux logiciels de CAO et est à disposition des laboratoires de prothèses.

Les arcades numérisées sont placées de façon arbitraire sur l'articulateur virtuel de la même façon qu'un montage arbitraire sur son homologue mécanique. Le positionnement du maxillaire et du plan d'occlusion se fait sur une table de montage virtuelle à partir d'une valeur moyenne. La table de montage a les mêmes caractéristiques que son homologue mécanique avec une orientation de  $10^\circ$  par rapport au plan de Francfort (Fig. 18, 19) [63].



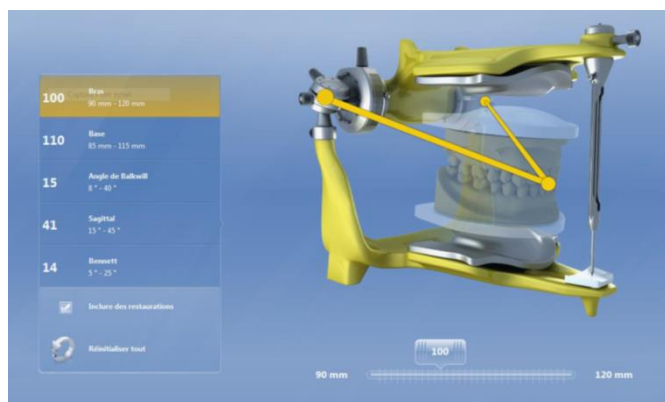
**Figure 18 : Table de montage classique orientée de  $10^\circ$  par rapport au plan de Francfort (image du Dr Soenen)**



**Figure 19 : Articulateur virtuel avec table de montage orientée de  $10^\circ$  par rapport au plan de Francfort (image du Dr Soenen)**

### 3.3.1.2 Montage sur une table de montage personnalisée

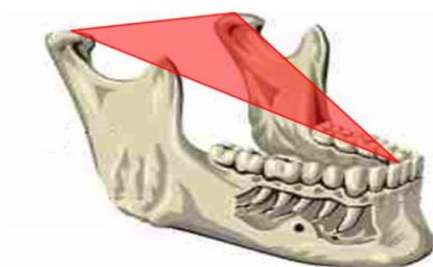
Ce type de montage est retrouvé pour la première fois dans la version 4.2 du logiciel CEREC<sup>®</sup> au niveau de l'articulateur virtuel dont le concepteur est le Pr Mehl (Fig. 20) [45].



**Figure 20 : Articulateur virtuel du logiciel CEREC<sup>®</sup> 4.2 [45]**

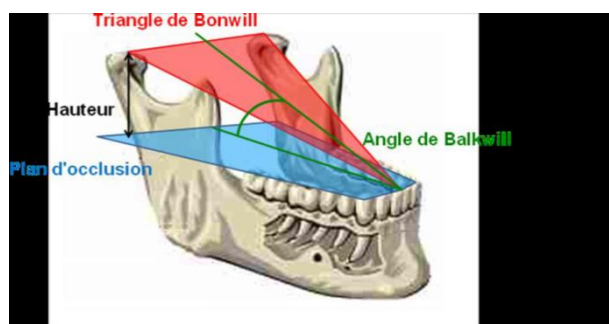
La technique de programmation de cet outil se base sur l'application de formules mathématiques issues d'observations cliniques. Le praticien ou prothésiste ne rentre que le sexe et la distance inter-condylienne du patient. A partir d'une série de calculs de moyennes issues de ces deux paramètres, le logiciel détermine automatiquement la position du dentalé et du plan d'occlusion par rapport aux condyles en calculant l'angle de Balkwill et le triangle de Bonwill. Cela permet une gestion plus personnalisée du montage du modèle maxillaire numérique. Le praticien peut par la suite, s'il le souhaite, moduler le FGP (Function Generated Pathway = chemin généré par la fonction) en modifiant les déterminants postérieurs [29, 45].

Le triangle de Bonwill est un triangle dont la base correspond à la distance inter-condylienne et le sommet au point inter-incisif mandibulaire lorsque les deux arcades sont en OIM (Fig. 21).



**Figure 21: Triangle de Bonwill [22]**

L'angle de Balkwill est lui l'angle formé entre le plan d'occlusion et le triangle de Bonwill. Sa valeur est comprise entre 8° et 40° (Fig. 22).



***Figure 22 : Angle de Bakwill [22]***

Une étude récente a évalué 125 images tomographiques de patients en identifiant dans chaque cas les centres des condyles et les points permettant de déterminer le plan d'occlusion (point inter-incisif et cuspides des deuxièmes molaires). Ces données ont été utilisées pour calculer les côtés du triangle de Bonwill et la hauteur des condyles droite et gauche au-dessus du plan occlusal (ce qui revient à calculer l'angle de Balkwill). Les résultats de cette étude montrent qu'il y a une étroite proximité entre les valeurs moyennes obtenues (côtés : 104,1 mm ; base : 99,8 mm et hauteur : 34,9 mm) et celles indiquées dans la littérature (côtés : 105 mm ; base : 100 mm et hauteur : 35 mm). Les valeurs individuelles varient dans une fourchette étroite autour de la moyenne. Ces variations sont encore plus faibles au sein du même sexe. De plus, il y a corrélation élevée entre les valeurs pour les longueurs gauche et droite supposant des relations symétriques [45].

Cette étude confirme une certaine fiabilité de la gestion automatique du logiciel dans le positionnement et l'orientation des arcades dentaires.

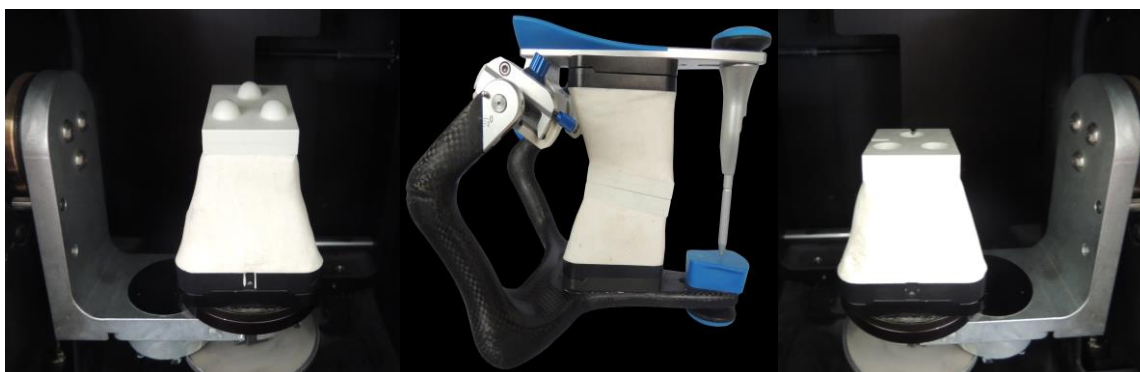
### ***3.3.1.3 Double montage : Articulateur physique/Articulateur virtuel***

Dans les cas complexes où le plan d'occlusion est à reconstruire ou que les guidages sont inexistant, la programmation du simulateur des mouvements mandibulaires s'impose. L'utilisateur doit réaliser un montage des modèles sur un articulateur mécanique avant son transfert sur le logiciel de CAO contenant l'articulateur virtuel mathématique. Ce double montage est indispensable et incontournable actuellement lorsqu'un arc facial est utilisé et une programmation des boîtiers condyliens entreprise.

Le praticien devra situer les arcades dentaires par rapport à l'axe charnière terminal et les transférer sur l'articulateur mécanique. Afin d'améliorer l'anatomie occlusale et l'intégration des futures restaurations, le praticien peut utiliser un axiographe (ou des cires de propulsion/diduction) pour relever les valeurs angulaires utiles à la programmation des boîtiers condyliens de l'articulateur virtuel. Les deux modèles physiques des arcades dentaires peuvent être obtenus soit par méthode conventionnelle classique (empreinte puis coulée du modèle) soit à partir de l'empreinte optique (par stéréolithographie ou fraisage) [29].

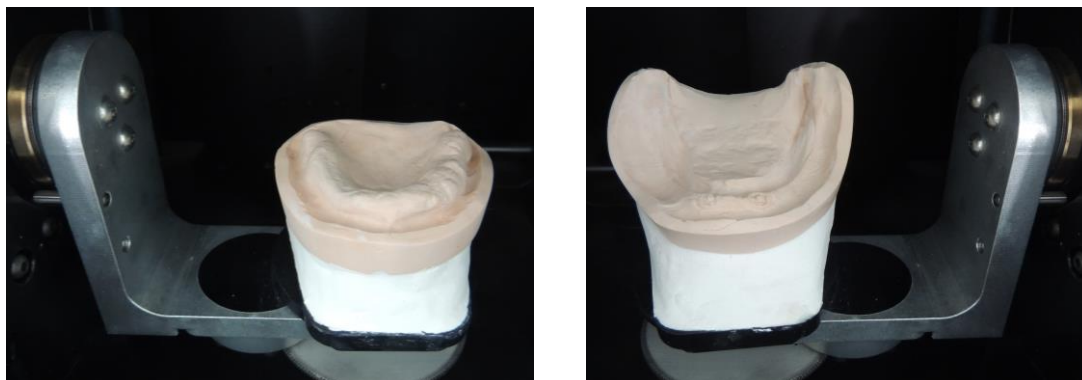
Le montage sur articulateur physique se fera en utilisant un arc facial et en fonction de la position de référence choisie et enregistrée par le praticien (OIM ou RC). La mise en confrontation des arcades dentaires tridimensionnelles l'une par rapport à l'autre se fera par scannage des modèles physiques afin de préserver les informations données par l'arc facial. L'articulateur virtuel contenu dans le logiciel de CAO sera l'avatar numérique de son homologue mécanique. Le prothésiste, en fonction du système avec lequel il travaille, a deux façons d'effectuer ce double montage [29, 30, 35].

- Double montage avec scannage de l'articulateur : ici le logiciel CAO dispose d'une « arthrotèque » (bibliothèque d'articulateur) contenant la majorité des simulateurs du marché dans laquelle il faut choisir le type d'articulateur employé. Dans cette situation, les moulages sont scannés individuellement. Ensuite, l'articulateur avec les moulages est placé entièrement dans le scanner.
- Double montage avec utilisation du dispositif de transfert : un calibrage dans le scanner et le logiciel de l'articulateur mécanique choisi est réalisé afin d'intégrer virtuellement les caractéristiques du système de simulation (Fig. 23).

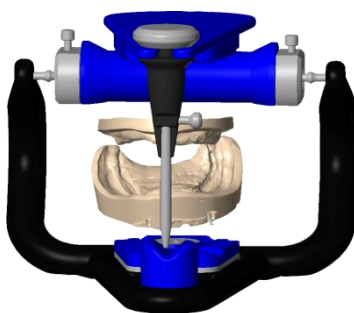


**Figure 23 : Calibrage de l'articulateur mécanique Artex<sup>®</sup> dans le scanner et le logiciel 3SHAPE<sup>®</sup> (photos du Dr Contrepois)**

Chaque modèle est scanné séparément avec son embase fixée sur un dispositif de transfert (Fig. 24), puis le logiciel les replace automatiquement en occlusion permettant une numérisation fiable du montage sur articulateur mécanique (Fig. 25, 26).



**Figure 24 : Scannage des deux modèles séparément avec le scan 3Shape<sup>®</sup>**  
**(photos du Dr Contrepois)**



**Figure 25 : Modèles sur articulateur virtuel**  
**3SHAPE<sup>®</sup> (image du Dr Contrepois)**



**Figure 26 : Double montage avec utilisation d'un**  
**dispositif de transfert AMANN GIRRBACH<sup>®</sup> [29]**

### **3.3.2 Indications prothétiques**

#### ***3.3.2.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée***

Ces deux procédés mathématiques de l'articulation virtuelle sont adaptés aux restaurations de faibles étendues. Leurs utilisations sont limitées à des situations cliniques où le plan d'occlusion et les guidages sont préservés. Le Pr Mehl insiste sur le fait que cette approche est idéale seulement dans les cas de restaurations unitaires ou de bridges de petites étendues. De plus, il indique que ces approximations et moyennes sont recevables s'il s'agit de traitements encastrés ou bénéficiant de structures anatomiques résiduelles conséquentes. Des études ont montré que lorsque ces conditions cliniques sont réunies, l'utilisation des paramètres individuels sur un articulateur semi-adaptable ne fournit pas un avantage significatif sur des paramétrages avec des valeurs moyennes [45].

Par ailleurs, la gestion automatique du positionnement du maxillaire par le logiciel n'affecte pas de manière significative la morphologie occlusale prothétique.

En cas d'absence de guide antérieur, de changement de dimension verticale d'occlusion ou autre, ces deux approches nécessiteront des étapes de validation clinique au préalable et une grande prudence. L'utilisation d'un articulateur virtuel mathématique avec un double montage décrit ultérieurement semble plus indiquée [29, 30].

#### ***3.3.2.2 D'un double montage : Articulateur physique/Articulateur virtuel***

Ce dispositif de double montage permet au praticien de gérer par CFAO toutes les situations cliniques nécessitant une restauration prothétique fixe que ce soit sur dents naturelles ou implants. Ce montage sur articulateur physique est indispensable pour l'instant lorsque les informations apportées par l'emploi de l'arc facial sont essentielles à la sculpture de la restauration. Ceci est le cas notamment lorsque les guidages et plan d'occlusion sont à reconstruire soit [29, 30, 35] :

- Dans la restauration du guidage antérieur où la programmation des boîtiers condyliens est primordiale.
- Lors de changement de position de référence (RC) ou de dimension verticale d'occlusion.
- Pour plusieurs restaurations postérieures en antagonistes ou en extension.

### 3.3.3 Avantages

#### *3.3.3.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée*

Ces deux premières possibilités ont pour avantage principal de permettre la réalisation des éléments prothétiques par CFAO directe au cabinet ou au laboratoire. Ce haut degré d'automatisation est un gain de temps important. Un positionnement plus ou moins proche de la réalité des arcades dentaires par rapport à l'axe charnière est possible sans faire appel à l'arc facial et donc l'articulateur physique. L'occlusion peut donc être gérée en lien direct avec l'empreinte optique sans casser la chaîne numérique garante de précision. Le praticien a la possibilité de moduler à volonté le FGP en jouant sur les valeurs des déterminants postérieurs. Il peut alors programmer le FGP dans la situation la plus défavorable pour garantir l'absence d'interférences occlusales. En complément de cet articulateur virtuel, le logiciel peut calculer une proposition biogénérique à partir de ce FGP paramétré. Cette méthode de reconstitution effectue une analyse métrique personnalisée de la situation dentaire et utilise ces données pour calculer la morphologie occlusale de la dent [33]. Le praticien/prothésiste a la possibilité par la suite d'effectuer des retouches sur la prothèse modélisée. Des outils numériques dans le logiciel de CAO sont à disposition pour des éventuels ajustements occlusaux. Les réglages en bouche seront donc très faibles puisque l'occlusion dynamique est prise en compte. Un dernier avantage de ce type d'articulateur est d'ordre expérimental et non plus clinique. L'impact des paramètres (agissant sur le FGP) sur la morphologie occlusale peut être étudiée très rapidement et de manière précise grâce au logiciel [29, 45].



### ***3.3.3.2 D'un double montage : Articulateur physique/Articulateur virtuel***

L'avantage de ce type d'articulateur virtuel est d'avoir une table de montage virtuelle individualisée. En effet, le montage sur articulateur physique (avec arc facial) scanné par la suite permet un positionnement non aléatoire des arcades dentaires 3D par rapport à l'axe bicondylien. Le paramétrage de l'articulateur virtuel avec les valeurs relevées par axiographie ou cire de propulsion/diduction présente alors un réel intérêt. Le FGP peut être modulé à souhait par l'opérateur tout en travaillant en axe charnière réelle. Ce double montage permet une reproduction plus précise de la cinématique mandibulaire que les deux précédents procédés se basant sur des valeurs moyennes. Cet outil numérique est intéressant car il permet de faire bénéficier les restaurations de grandes étendues de la précision et de l'adaptation des travaux issus de la CFAO. L'ensemble des déterminants de l'occlusion peut maintenant être géré numériquement grâce à ce dispositif de double montage. La morphologie occlusale prothétique peut alors être parfaitement maîtrisée [29, 30, 35].

Si le prothésiste le souhaite, il peut ne concevoir que l'infrastructure prothétique par CFAO. La céramique esthétique sera finie manuellement par le prothésiste en s'aidant des modèles montés sur articulateur physique.

Ce simulateur virtuel permet de répondre à l'ensemble des problématiques posées par la gestion de l'occlusion en CFAO.

### **3.3.4 Inconvénients/Limites**

#### ***3.3.4.1 D'un montage sur une table de montage standardisée ou personnalisée***

La principale limite de ces deux procédés est que le praticien ne travaille que sur des valeurs approchées. La non-utilisation d'arc facial fait que le positionnement du maxillaire est à partir de paramètres moyens. Cette orientation non individualisée des arcades dentaires rend le travail plus aléatoire. C'est pourquoi, les grandes restaurations prothétiques ne devraient être entreprises avec ce type d'articulateur. Seules les situations cliniques où les références dentaires sont présentes peuvent être effectuées. La programmation automatique de l'articulateur nécessite des repères dentaires pour que le logiciel fasse son calcul géométrique.

La possibilité de jouer sur les déterminants postérieurs présente peu d'intérêt même s'ils sont relevés par axiographie, car sans l'utilisation d'arc facial le montage reste aléatoire. Ces deux méthodes restent néanmoins grandement utilisées dans les procédés chairside car elles sont rapides et suffisantes dans les situations cliniques évoquées précédemment [29, 30, 45].

#### ***3.3.4.2 D'un double montage : Articulateur physique/Articulateur virtuel***

Dans certaines situations cliniques, le double montage est donc impératif et nécessite l'utilisation d'un articulateur mécanique avec arc facial. Lors du passage des modèles des préparations numérisés à la fabrication des restaurations prothétiques par des machines-outils, la chaîne numérique est rompue. Cette perte de la chaîne numérique garante de la précision est aujourd'hui le point faible de la gestion de l'occlusion par CFAO. Ce type de procédé n'est donc pas compatible avec de la CFAO directe et le concept « chairside ». Le praticien ici délègue au prothésiste la conception et la fabrication prothétique qui nécessite un temps de manipulation et un travail plus important par rapport aux articulateurs mathématiques [29, 30,35].

L'articulateur virtuel mathématique présente globalement les mêmes avantages et indications cliniques qu'un articulateur physique adaptable ou semi-adaptable de 2ème génération. Au-delà de la précision apportée par le numérique, seul l'aspect ergonomique de l'articulateur virtuel les différencie. En effet, pour l'instant, leurs limites restent identiques par rapport aux mouvements mandibulaires qu'ils reproduisent. Leur paramétrage se fait à partir de valeurs angulaires ne permettant pas une réelle simulation de la dynamique masticatoire du patient. L'anatomie occlusale des prothèses est encore adaptée aux systèmes de simulation type articulateur [29].

Gaertner et Kordass [32] ont décrit dans la littérature un deuxième type d'articulateur virtuel, complètement adaptable permettant de se rapprocher un peu plus d'une réalisation prothétique parfaitement intégrée à la fonction masticatoire. Le terme « adaptable » signifie ici que des données réelles, relevées sur le patient, sont utilisées pour paramétrer l'articulateur virtuel à la différence d'un articulateur mécanique ou le terme « adaptable » veut dire que l'ensemble des programmations est possible.

## 3.4 Articulateur virtuel adaptable

### 3.4.1 Description du système Jaw Motion Analyzer

La Jaw Motion Analyzer (JMA) est un système de mesure ultrasonore conçu pour enregistrer électroniquement les mouvements et trajets exacts de la mandibule (Fig. 27). Ce dispositif de capture de mouvement basé sur la vitesse des ultrasons dans l'espace permet de mesurer la position de la mandibule à un instant  $t$ . La JMA est composée de 2 parties [32] :

- Une partie fixe contenant le réseau de récepteurs ultrasonores. Ces capteurs sont en fait intégrés à un arc facial. Celui-ci est fixé dans sa position de référence c'est-à-dire au niveau du plan axio orbitaire par un système d'attache autour de la tête,
- Une partie mobile contenant les émetteurs ultrasonores. Cette branche est reliée à la surface des dents mandibulaires.



**Figure 27 : Les différents composants de la JMA du SICAT® Function [25]**

Cet appareil détermine les différences des temps d'échos des ondes ultrasoniques et calcule les données mesurées par les capteurs. Au préalable, l'opérateur doit présélectionner à l'aide d'un capteur de numérisation les deux points correspondants au centre des condyles et un point infraorbitaire. Ces 3 points permettent d'établir un plan de référence. Pendant les mouvements mandibulaires réalisés par le patient, 3 points sont enregistrés : les 2 centres condyliens et le centre de la base du pointeur fixé aux dents mandibulaires.

La JMA est reliée à un logiciel permettant d'exploiter les données relevées par les capteurs. Les différents composants de la translation et rotation mandibulaires peuvent être déterminés. Ce dispositif de relevés de données de la cinétique mandibulaire doit être accompagné du scannage des arcades dentaires dans la réalisation de l'articulateur virtuel complètement adaptable.

Ce système d'enregistrement des mouvements mandibulaires n'est pas le seul existant. Des dispositifs optoélectroniques, par exemple, peuvent être choisis où des caméras CCD sont utilisées pour enregistrer des émissions de DEL [15]. Seul le système JMA a été décrit ici car il est le seul intégré à l'articulateur virtuel DENTCAM<sup>®</sup> proposé par Gaertner et Kordass.

### **3.4.2 Articulateur DENTCAM<sup>®</sup> de Gaertner et Kordass**

#### ***3.4.2.1 Principe***

En 2002, Gaertner et Kordass [32] présentent un concept et une stratégie pour remplacer l'articulateur mécanique à l'avenir par un virtuel. Ce dispositif vise à réduire de façon significative les limites d'un articulateur mécanique en simulant la cinématique mandibulaire à partir de données réelles relevées sur les patients.

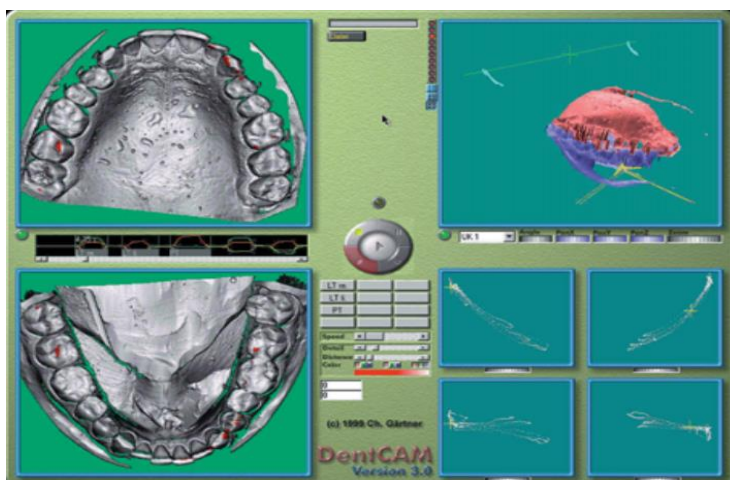
Le principe d'un articulateur virtuel complètement adaptable consiste tout d'abord à obtenir les modèles numériques des arcades maxillaires et mandibulaires par scannage avec le « Scan 3D ». Une numérisation des deux arcades en occlusion statique est aussi effectuée. Le système d'enregistrement des mouvements mandibulaires utilisé est la Jaw Motion Analyzer dont le principe a été décrit précédemment.

Les deux ensembles de données qui proviennent du « Scan 3D » et de la « JMA » ont été mis en correspondance et présentés dans l'articulateur virtuel. Ce dispositif nommé DENTCAM<sup>®</sup> a été développé à l'université de Greifswald. Il se compose de quatre fenêtres principales qui montrent le même mouvement des dents sous différents aspects (Fig. 28).

La première représente les deux arcades en occlusion dynamique jusqu'à la position d'intercuspidation maximale lors des mouvements de mastication. Ces modèles numériques peuvent être déplacés et animés à souhait par l'utilisateur.

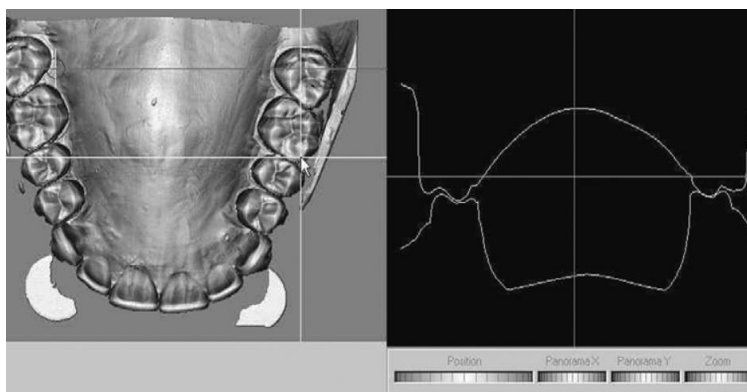
La seconde affiche les contacts occlusaux statiques et dynamiques sur l'arcade maxillaire et mandibulaire pendant la fonction masticatoire. La vitesse du mouvement peut être contrôlée avec un curseur et l'intensité des forces de contact est affichée suivant un code couleur.

Dans une petite fenêtre, les mouvements du centre du condyle droite et gauche sont représentés dans une vue sagittale et transversale. L'analyse et le diagnostic des interdépendances entre les contacts dento-dentaires et les mouvements de l'ATM sont alors possibles.



**Figure 28 : Les quatre fenêtres du DENTCAM® [32]**

Une dernière fenêtre permet de visualiser une coupe frontale des deux arcades en occlusion à un instant  $t$  pendant la mastication (Fig. 29). La localisation de cette coupe sur l'arcade est choisie par l'utilisateur. Cet outil permet d'analyser le degré d'intercuspitation et la surface fonctionnelle des cuspidés à chaque moment du mouvement enregistré.



**Figure 29 : Fenêtre montrant une vue en coupe frontale des deux arcades en occlusion [32]**

En 2003, une étude expérimentale menée par Gaertner et Kordass [19] a montré la fiabilité et la reproductibilité de l'articulateur virtuel DENTCAM®.

Tout d'abord, la première étape consiste à monter de manière classique les modèles en plâtre sur un articulateur mécanique. Les mouvements de latéralité droite et gauche ainsi que la propulsion sont effectués. Les points de contact sont relevés avec du papier articulé.

Ensuite, ces modèles en plâtre sont scannés avec le « Scan 3D » et remontés sur articulateur mécanique. Le système d'enregistrement JMA est disposé sur l'articulateur. Les mêmes mouvements limites sont enregistrés et intégrés dans l'articulateur virtuel. La comparaison des deux situations montre d'excellents résultats en terme de fiabilité et exactitude des points de contacts de l'articulateur virtuel DENTCAM<sup>®</sup>.

Afin de vérifier la reproductivité des résultats du DENTCAM<sup>®</sup>, une étude a été réalisée. Ainsi trois opérateurs ont effectué sur 8 patients les enregistrements de propulsion et diduction droite/gauche. Le dispositif utilisé est le même que celui décrit par Kordass et Gaertner. Les enregistrements des données ont été effectués une deuxième fois un mois plus tard par les mêmes opérateurs sur les mêmes patients. Les résultats ont montré une excellente reproductivité clinique de l'articulateur virtuel DENTCAM<sup>®</sup> dans l'affichage des points de contacts statiques et dynamiques. Ce système semble déjà adapté au diagnostic fonctionnel et occlusal. Les auteurs ont conclu que la précision de l'articulateur DENTCAM<sup>®</sup> dépend de la résolution des ensembles des systèmes de mesures et de la qualité des algorithmes calculatoires.

En 2008 [51], une réplique de l'articulateur virtuel DENTCAM<sup>®</sup> est présentée. Le système JMA est utilisé et c'est le logiciel Winjaw<sup>®</sup> qui permet l'étude des données mesurées. Ce dispositif n'est plus d'ordre expérimental mais bien clinique, il peut être utilisé au cabinet en une séance sur un patient. Le graphisme est amélioré, cet outil présente les mêmes fonctions que le DENTCAM<sup>®</sup>, seule l'analyse du trajet condylien et de la fonction masticatoire peut être faite.

L'enregistrement des mouvements mandibulaires pendant la mastication est important pour la modélisation fonctionnelle des surfaces occlusales prothétiques. L'étude de 2011 [52] sur la mastication montre bien l'apport de l'analyse tridimensionnelle sur la morphologie des dents. En effet, grâce à cet articulateur virtuel adaptable, le praticien/prothésiste peut situer les points de contacts et les espaces d'inocclusion pendant la mastication afin d'éviter les interférences prothétiques.

### **3.4.2.2 Avantages**

L'articulateur virtuel complètement adaptable présente le grand avantage de permettre au praticien de travailler à partir de données réelles du patient. L'articulateur ne doit plus être paramétré avec des valeurs moyennes ou même individualisées. L'articulateur ici conçu se rapproche du concept occlusal de Gall et Lauret [41] basé sur la fonction masticatoire. Aujourd'hui, cet outil ne permet qu'une simple analyse de l'occlusion statique et dynamique du patient pendant la mastication. La visualisation tridimensionnelle à fort grossissement des points de contacts associée à celle du positionnement des condyles permet de mieux comprendre l'impact des déterminants postérieurs [32].

### **3.4.2.3 Inconvénients**

Ce type d'articulateur est à l'heure actuelle onéreux et s'intègre difficilement au cabinet pour le clinicien. En effet, une séance doit être entreprise pour chaque patient pour enregistrer seulement les données de la cinétique mandibulaire. Cela demande beaucoup de temps au praticien, pour une application pour l'instant limitée. De plus, les données relevées ne peuvent être couplées avec un logiciel de CAO permettant la réalisation de restaurations prothétiques même si d'autres modules de l'articulateur DENTCAM<sup>®</sup> sont imaginés pour le futur afin d'élargir son champ d'application [32]

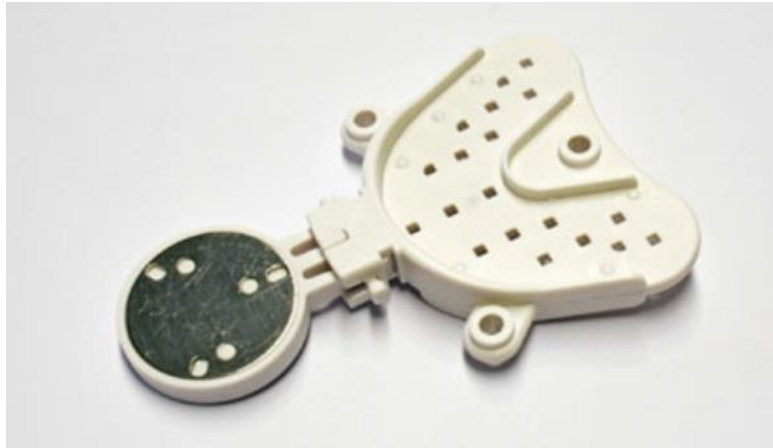
### **3.4.3 Le logiciel SICAT**

Les données électroniques enregistrées par le système JMA ont été utilisées jusqu'à présent pour la programmation spécifique au patient des articulateurs virtuels. Ces derniers, comme vu précédemment avec le DENTCAM<sup>®</sup>, ne servent que pour l'analyse statique et dynamique de l'occlusion.

Le logiciel SICAT<sup>®</sup> Function de chez SIRONA<sup>®</sup> [25, 69] décrit dans la littérature fournit une nouvelle possibilité dans l'exercice de notre pratique, en fusionnant les données électroniques de la JMA avec les images Cone Beam Computed Tomography (CBCT). De plus, les modèles numériques obtenus après l'empreinte optique peuvent être superposés avec les images CBCT.

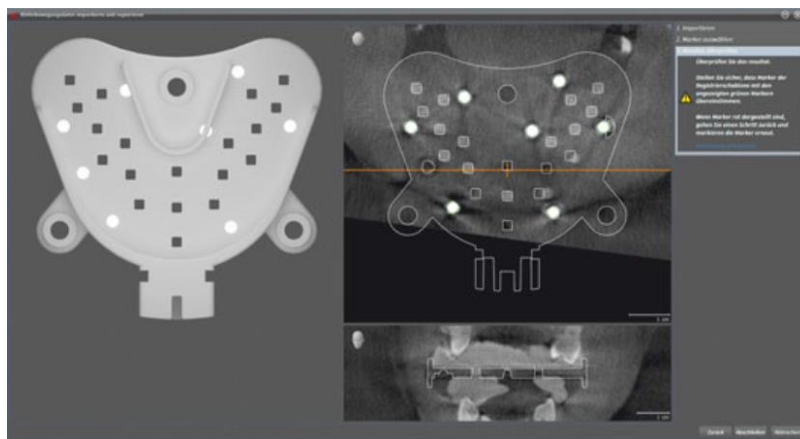
Le principe de fonctionnement du logiciel peut être résumé en quelques étapes [25] :

- Une acquisition numérique des deux arcades à l'aide de la caméra optique.
- Un plateau de référence appelé Fusion Bite assure la fusion précise des données CBCT et JMA avec l'aide du logiciel SICAT<sup>®</sup> Function (Fig. 30). Du silicone est placé de part et d'autre du plateau et le patient sert en OIM assurant ainsi le bon maintien de celui-ci en bouche.



**Figure 30 : Plateau de référence Fusion Bite [25]**

- Le plateau Fusion Bite est placé en bouche tout au long de l'acquisition des images du CBCT (Fig. 31).

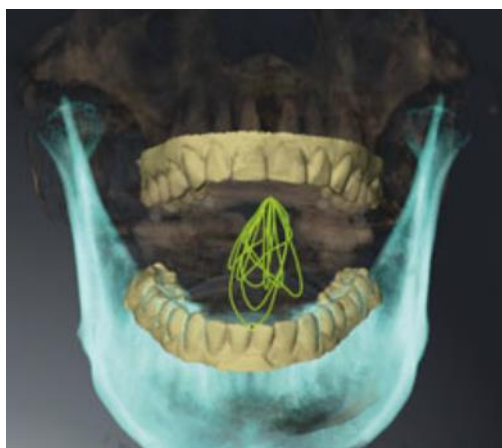


**Figure 31 : Acquisition des images CBCT avec Fusion Bite [25]**

- Le système JMA est ensuite mis en place sur le patient. Les premiers mouvements sont enregistrés avec le plateau de référence. Par la suite, le Fusion Bite est retiré et les émetteurs du JMA sont montés sur un attachement afin de ne pas interférer avec l'occlusion du patient. Le processus réel de l'analyse fonctionnelle peut commencer.



- A la fin de l'enregistrement, le logiciel SICAT<sup>®</sup> Fonction fusionne automatiquement les données JMA et CBCT (Fig. 32).

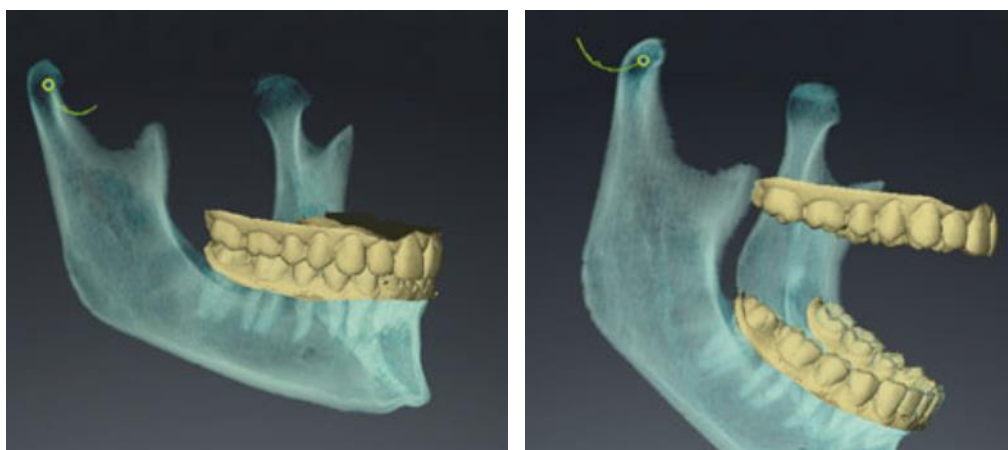


**Figure 32 : Fusion des données de JMA avec les images CBCT où sont placées les modèles numériques par superposition [25]**

- Les impressions optiques prises avec le scanner intraoral peuvent être fusionnées avec les données CBCT pour obtenir des images métriquement correctes. SICAT<sup>®</sup> Fonction charge les données des scans des arcades et superpose les arcades dentaires numériques sur les images CBCT.

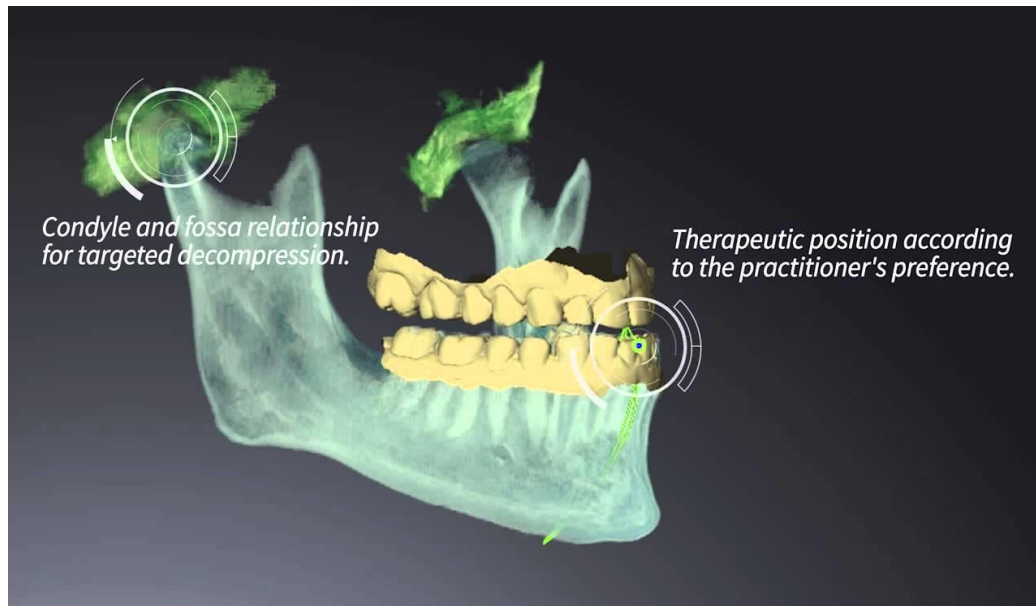
La capacité du système de corréler directement les données de localisation anatomique acquises par l'imagerie CBCT aux données JMA ouvre des perspectives complètement nouvelles dans le diagnostic et la planification du traitement de la dysfonction temporo mandibulaire [25].

Le praticien a la possibilité de sélectionner des repères anatomiques (ex : le condyle) et le logiciel affiche les mouvements de ce repère pendant le cycle masticatoire (Fig. 33).



**Figure 33 : Visualisation du trajet condylien pendant l'ouverture [25]**

SICAT<sup>®</sup> Function permet ainsi de visualiser l'espace entre le condyle et la fosse mandibulaire au cours de chaque position de la mandibule pendant le cycle masticatoire. Grâce aux modèles numériques superposés, le praticien peut visualiser simultanément les mouvements des ATM tout en effectuant l'analyse occlusale dynamique. Une ou plusieurs positions thérapeutiques potentielles peuvent alors être enregistrées (Fig.34). La conception des gouttières occlusales par CFAO dans la position sélectionnée est possible [25].



***Figure 34 : Sélection de la position thérapeutique [25]***

Outre les différentes possibilités graphiques qu'offre ce logiciel dans l'analyse occlusale, il est très important de noter que pour la première fois des modèles numériques ont pu être positionnés en axe charnière réel sans rompre la chaîne numérique. La superposition des arcades numérisées sur les images CBCT permet au praticien de ne plus passer par un arc facial.

## **4. Discussion**

Une description des différentes améliorations ou utilisations impliquant directement ou indirectement l'articulateur virtuel a été réalisée. Certaines d'entre elles ne sont qu'envisagées dans la littérature mais pas encore appliquées en clinique, d'autres au contraire sont déjà utilisées au quotidien mais non identifiées dans la recherche bibliographique. Ainsi, les perspectives d'avenir ont été décrites, puis les avantages de l'articulateur virtuel et mécanique ont été confrontés.

### **4.1 Arc facial numérique**

Une des problématiques rencontrées dans la CFAO est l'incapacité de travailler en axe charnière réel sans rompre la chaîne numérique dans les cas de restaurations de grandes étendues. L'utilisation dans certaines situations de l'arc facial oblige le praticien à repasser à un montage sur articulateur mécanique. La possibilité de fusionner les modèles numériques avec les images CBCT permet de contourner cette problématique. En revanche, le logiciel SICAT<sup>®</sup> Function ne permet pas aujourd'hui la modélisation des surfaces occlusales. Les recherches sur l'arc facial numérique ont donc un grand intérêt afin d'optimiser au maximum l'utilisation de l'articulateur virtuel pour la CAO.

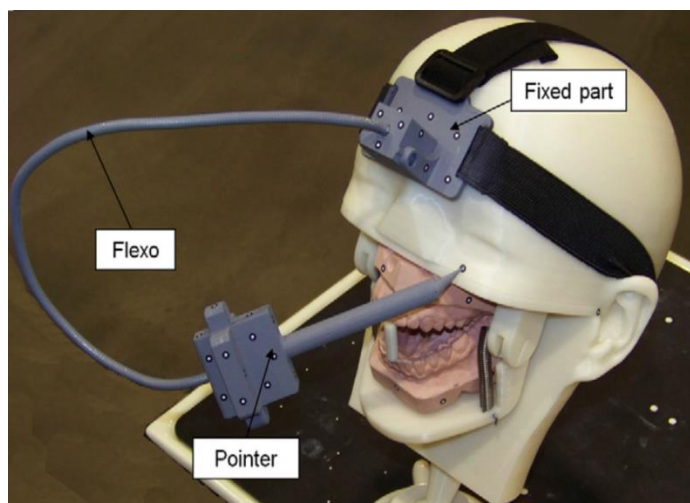
#### **4.1.1 Arc facial numérique proposé par Solaberrieta**

En 2013 [58,59], Solaberrieta présente un dispositif permettant de repositionner le modèle maxillaire numérique sur l'articulateur virtuel sans arc facial physique. Grâce à ce système, le modèle maxillaire est monté sur une table de montage virtuelle non approximative. L'anatomie du patient est respectée puisque le modèle est orienté par rapport au plan axio-orbitaire et non plus sur des valeurs moyennes. Ce dispositif permettrait une diminution du temps de travail car le montage sur articulateur physique avec arc facial ne serait plus nécessaire. La chaîne numérique garante de la précision serait donc non rompue.

Solaberrieta décrit la méthodologie et les outils nécessaires à l'élaboration de l'arc facial numérique.

Tout d'abord, les arcades dentaires doivent être scannées pour obtenir les modèles numériques. Le dispositif imaginé par Solaberrieta découle de l'ingénierie inverse et se compose de différents éléments (Fig. 35) [59] :

- Une partie fixe en forme de parallélépipède contenant des points de référence. Cette pièce est fixée autour de la tête du patient et ne doit pas bouger. Elle servira d'élément de référence commun pour chaque point enregistré.
- Une partie souple reliant la partie fixe au pointeur.
- Un pointeur en 2 pièces : l'apex permettant de déterminer la mesure relevée et une base en forme de parallélépipède.



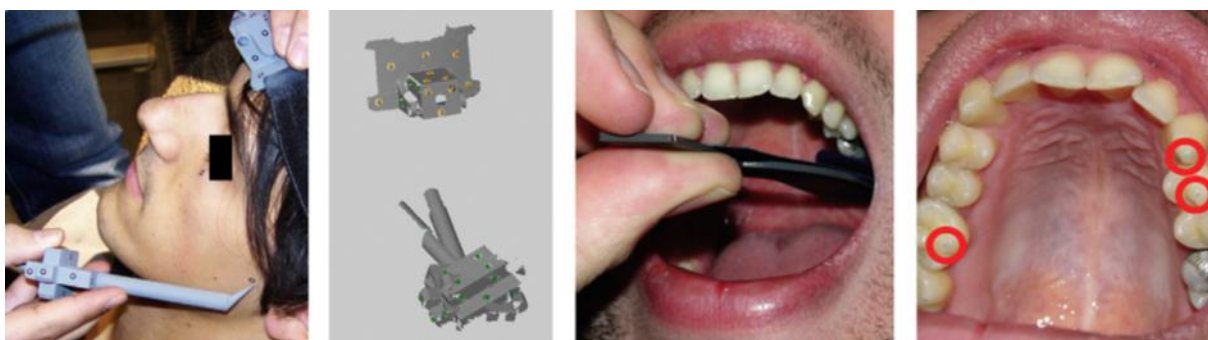
***Figure 35 : Dispositif de l'arc facial numérique [59]***

Cette base contient elle aussi des points de référence. Ces points de référence contenus dans la partie fixe et la base du pointeur permettent de localiser les points enregistrés. Lors de chaque scan (pour enregistrer un point), il est nécessaire de prendre en compte au moins 4 points de référence.

Les 3 premiers points enregistrés permettent de déterminer le plan axio- orbitaire du patient. Les points à scanner sont matérialisés par des autocollants métalliques sur le visage du patient. Cela correspond aux deux centres des condyles et au point sous orbitaire gauche.

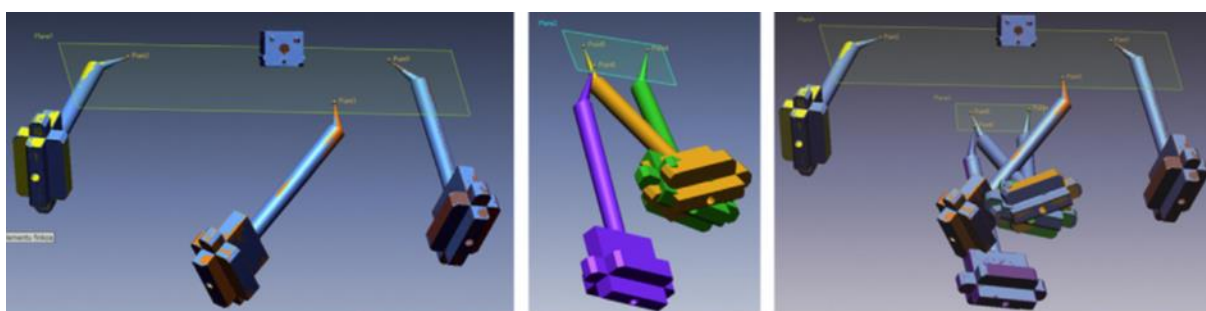
Une fois les 3 scans effectués, les 3 points enregistrés définissent un système de coordonnées correspondant au plan horizontal. Ce système de coordonnées doit être traduit en coïncidence avec celui de l'articulateur virtuel modélisé au préalable. La branche supérieure de l'articulateur virtuel doit alors correspondre au plan axio-orbitaire relevé.

Dans une seconde étape, le praticien fait mordre le patient sur du papier articulé. 3 points correspondants aux cuspides palatines du secteur postérieur maxillaire sont ensuite scannés (Fig. 36). Ces 3 points permettent de générer le plan d'occlusion. Ils sont ensuite identifiés sur le modèle numérique maxillaire afin que ce dernier puisse être repositionné sur le plan d'occlusion.



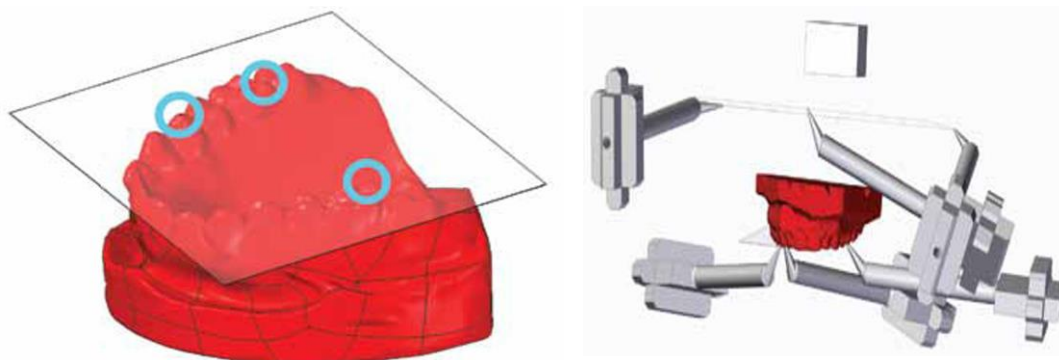
**Figure 36 : Scannage des six points décrits au-dessus [59]**

Les 6 points qui ont été scannés sont sur le même système de coordonnées. De cette façon, le plan horizontal et le plan d'occlusion ont pu être générés (Fig. 37).



**Figure 37 : Les six points numérisés définissant le plan horizontal et le plan d'occlusion [59]**

Etant donné que le système de coordonnées de la tête du patient et celui de l'articulateur virtuel coïncident, le modèle maxillaire numérique a pu être monté sur le simulateur virtuel en respectant l'axe charnière terminal du patient (Fig. 38, 39).



**Figure 38 : Montage du modèle maxillaire numérique sur l'articulateur virtuel [59]**



**Figure 39 : Positionnement du modèle maxillaire numérique suivant le plan d'occlusion et le plan horizontal [59]**

Ce dispositif est long à mettre en œuvre et complexe. Il n'est pour l'instant pas applicable en clinique. Son utilisation permettrait d'éviter le montage en articulateur physique. De plus, un fichier numérique faciliterait l'archivage du positionnement du maxillaire par rapport au plan axio-orbitaire, ce qui est aujourd'hui matériellement impossible avec un arc facial classique.

#### 4.1.2 Arc facial Zirkozahn<sup>®</sup>/Face Hunter

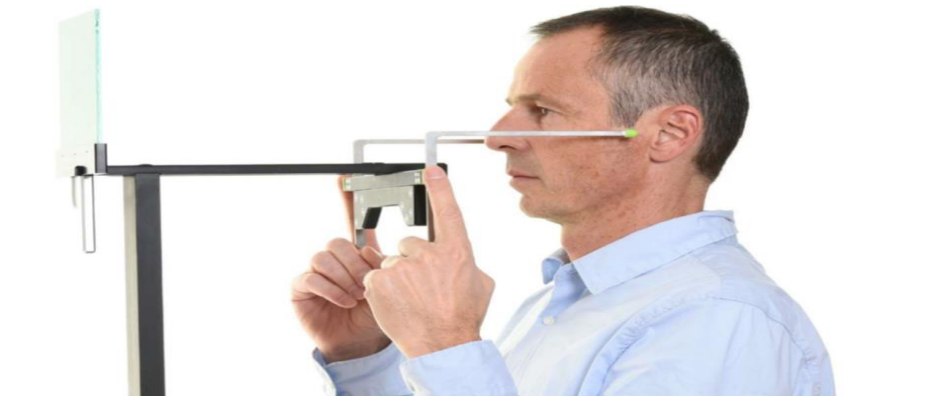
Le progrès technique apporte toujours des innovations qui, idéalement, peuvent être intégrées dans le flux de travail de la fabrication des restaurations dentaires par CFAO.

La société Zirkozahn<sup>®</sup> propose un nouveau scanner 3D appelé « Face Hunter » pour la numérisation 3D photoréaliste des visages des patients (Fig. 40) [28, 62, 70].



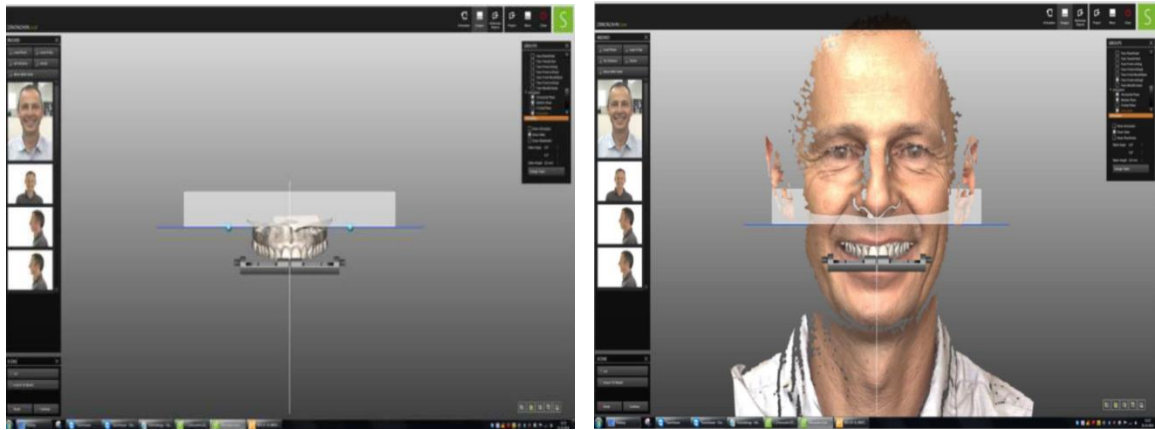
**Figure 40 : Numérisation 3D photoréaliste avec le "Face Hunter" de Zirkozahn<sup>®</sup>**  
**(image Zirkozahn)**

Les scans du visage sont combinés avec le « Plane Finder » (Fig. 41).



**Figure 41 : "Plane Finder" de Zirkozahn<sup>®</sup>** (photo Zirkozahn)

Ce dispositif Zirkonzahn<sup>®</sup> est une alternative à l'arc facial. Il utilise la ligne aile du nez/tragus et la position naturelle de la tête pour déterminer la position du maxillaire. Grâce au « Face Hunter », il est possible de relever les données saisies par le « Plane Finder » en un seul click et de les transférer à l'articulateur virtuel PS1-3D de la société Zirkonzahn (Fig. 42).



**Figure 42 : Modèle maxillaire numérique positionné suivant les données de "Plane Finder" et le scan du "Face Hunter" (image Zirkonzahn)**

Ainsi, en associant les images du Face Hunter avec les données du « Plane Finder », le praticien peut orienter de manière individualisée le modèle maxillaire sur l'articulateur virtuel [70]. A la différence de l'arc facial numérique proposé par Solaberrieta, le modèle maxillaire n'est pas positionné suivant le plan axio-orbitaire mais suivant les traits du visage du patient. Cette alternative permettrait au praticien de ne pas repasser par un articulateur physique. Les données 3D du scan facial offrent de nombreux avantages pour les prothésistes dentaires, les praticiens et les patients. Après modélisation de la restauration prothétique, le praticien obtient un aperçu photoréaliste du résultat final. Cet instrument de communication permet aux patients d'obtenir une visualisation plus concrète de la future prothèse.



Dans le cadre de restaurations du guide antérieur, l'aide à l'intégration du sourire comme par exemple dans le logiciel CEREC<sup>®</sup> 4.3 peut être un outil précieux (Fig. 43) [18]. Le prothésiste pourra modifier la hauteur et la symétrie des bords libres par rapport à la ligne bi-pupillaire aux lèvres, vérifier la position des canines en fonction des ailes du nez ou encore, en vue latérale, ajuster le profil des faces vestibulaires par rapport aux tissus mous [4]



**Figure 43 : "Smile Design" du logiciel CEREC<sup>®</sup> 4.3 [4]**

La société Zirkozahn propose au technicien de laboratoire un système permettant de passer d'un articulatoire virtuel à un articulatoire physique [70]. Ce dispositif a un intérêt dans le cas où la chaîne numérique avait été parfaitement respectée pour le montage sur articulatoire virtuel. En effet, l'orientation du modèle maxillaire par rapport à la « branche supérieure » de l'articulatoire virtuel doit être conservée pour le montage sur l'articulatoire mécanique. Ceci est rendu possible grâce à des cales en résine appelées « Mounting Bloc » fabriquées par CFAO. Ces cales sont placées sur une table de montage horizontale particulière appelée « Plane Positionner » ; ce sont elles qui donnent le positionnement et l'orientation du modèle maxillaire physique obtenu au préalable par usinage ou impressions 3D (Fig. 44).



**Figure 44 : « Mounting Bloc » sur le « Plane Positionner » (photo Zirkozahn)**

Ce dispositif peut avoir un intérêt si le prothésiste souhaite faire une stratification des éléments prothétiques ou des finitions manuelles esthétiques des restaurations prothétiques.

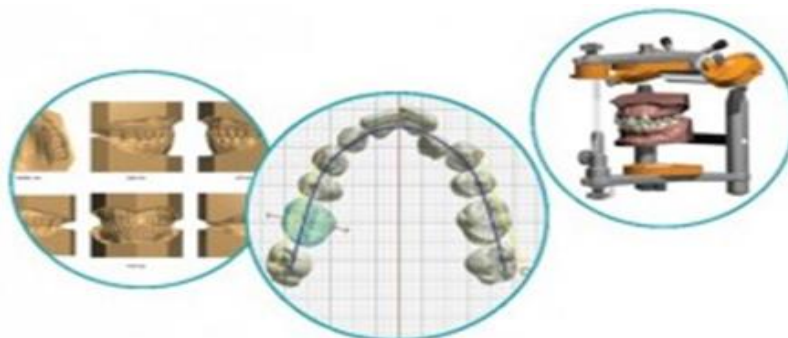
## 4.2 Utilisations de l'articulateur virtuel

La CFAO s'ouvre aux différents domaines de la dentisterie garantissant une rapidité d'exécution et une précision optimale. Le facteur occlusal est primordial dans ces différents domaines c'est pourquoi l'articulateur virtuel y trouve tout son intérêt.

### 4.2.1 Orthodontie

#### 4.2.1.1 Planification de traitement orthodontique

L'orthodontiste accompagne son analyse céphalométrique et photographique initiale, d'une analyse des modèles d'étude sur articulateur. Cette étape peut être faite aujourd'hui sur des modèles numériques à partir d'empreinte optiques ou surfaciques scannées. Des logiciels d'orthodontie permettent une simulation virtuelle de différents plans de traitement (alignement dentaire, expansion transversale, extraction...). Un véritable set up virtuel peut alors être conçu afin de visualiser le résultat esthétique et occlusal final. L'articulateur virtuel mathématique n'est qu'un module intégré à ces logiciels de planification de traitement orthodontique. Cet outil permet au praticien de vérifier l'occlusion statique et dynamique au fur et à mesure de la simulation des étapes du traitement. Les résultats diagnostiques offerts par les logiciels de traitement des moulages numérisés sont plus rapides à obtenir et les manipulations simplifiées car plus ergonomiques (Fig. 45)

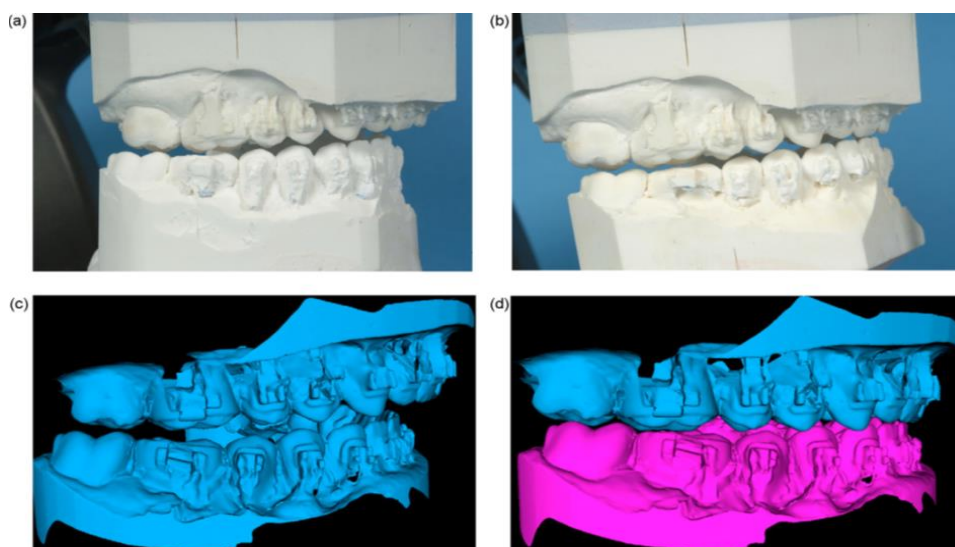


**Figure 45 : Logiciel « Ortho-Analyzer » 3SHAPE® [68]**

#### 4.2.1.2 Chirurgie orthognatique

L'articulateur virtuel peut aussi avoir un intérêt en chirurgie orthognatique dans l'établissement de la position idéale du maxillaire par rapport à la mandibule ; et donc dans la préparation du guide chirurgical.

Song et Baek [60] ont réalisé une étude sur 25 patients préalablement soumis à un traitement orthodontique, et qui ont été programmés pour une Lefort 1 au maxillaire et une ostéotomie sagittale de la mandibule. Les auteurs ont comparé la précision des modèles chirurgicaux obtenus avec une méthode classique et ceux avec un articulatoire virtuel 3D (Fig. 46). Dans la méthode classique, les modèles chirurgicaux sont obtenus après montage sur articulatoire semi- adaptable avec arc facial et en relation centrée des modèles en plâtre. Un repositionnement manuel de la future position des arcades est effectué suivant l'objectif chirurgical recherché. L'attelle chirurgicale est ensuite réalisée à partir du nouveau montage décidé.



***Figure 46 : Comparaison méthode conventionnelle et numérique [60]***

Dans la méthode virtuelle, un système de double montage est réalisé. Les modèles sont d'abord montés sur l'articulatoire mécanique en relation centrée avec arc facial puis l'ensemble est scanné. La simulation de la future position des arcades se fait à l'aide du logiciel de chirurgie (ORAPIX<sup>®</sup>) et de l'articulatoire virtuel intégré (comparable à son homologue mécanique décrit plus haut). La fabrication de l'attèle chirurgicale se fait par stéréolithographie.

Song et Baek en ont conclu que la méthode virtuelle est plus précise que la méthode conventionnelle dans l'aide au repositionnement du modèle maxillaire par rapport à l'objectif chirurgicale fixé. En revanche, toujours dans cette même étude, aucune différence significative n'a été identifiée entre les 2 méthodes dans la précision de fabrication de l'attèle chirurgicale aidant au repositionnement des arcades.

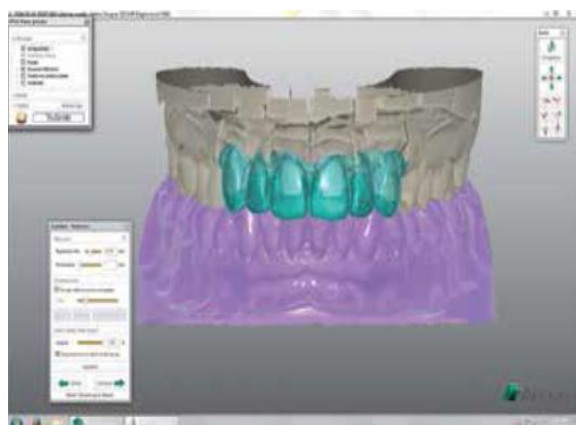
Dans la même lignée, Ghanai et al, dans une étude de 2010 [20], ont comparé l'écart de repositionnement des arcades entre la méthode conventionnelle et virtuelle sur 6 patients. Les résultats ont montré que les attèles temporaires chirurgicales fabriquées avec les deux méthodes étaient proches avec une déviation maximale de 1,8 mm relevées. Ils en concluent que la méthode virtuelle est une alternative crédible à la méthode conventionnelle.

## 4.2.2 Prothèses

Toutes les situations cliniques nécessitant une reconstruction prothétique fixée peuvent aujourd'hui être traitées par CFAO tout en respectant les grands principes occlusaux [23].

### 4.2.2.1 Analyse pré-prothétique

Dans le cas de restaurations complexes, une analyse pré-prothétique s'impose. L'occlusion statique et dynamique initiale est alors étudiée. Aujourd'hui, un montage sur articulateur avec arc facial dans la position de référence choisi est obligatoire. Comme vu précédemment, le montage peut être scanné et l'étude pré-prothétique se fera directement sur l'articulateur virtuel beaucoup plus ergonomique que son homologue mécanique [4]. Si le prothésiste le souhaite, il pourra directement créer ces Wax Up sur le logiciel de CAO (Fig. 47). La nouvelle occlusion souhaitée pourra alors être visualisée et modifiée en temps réel grâce à l'outil articulateur virtuel.

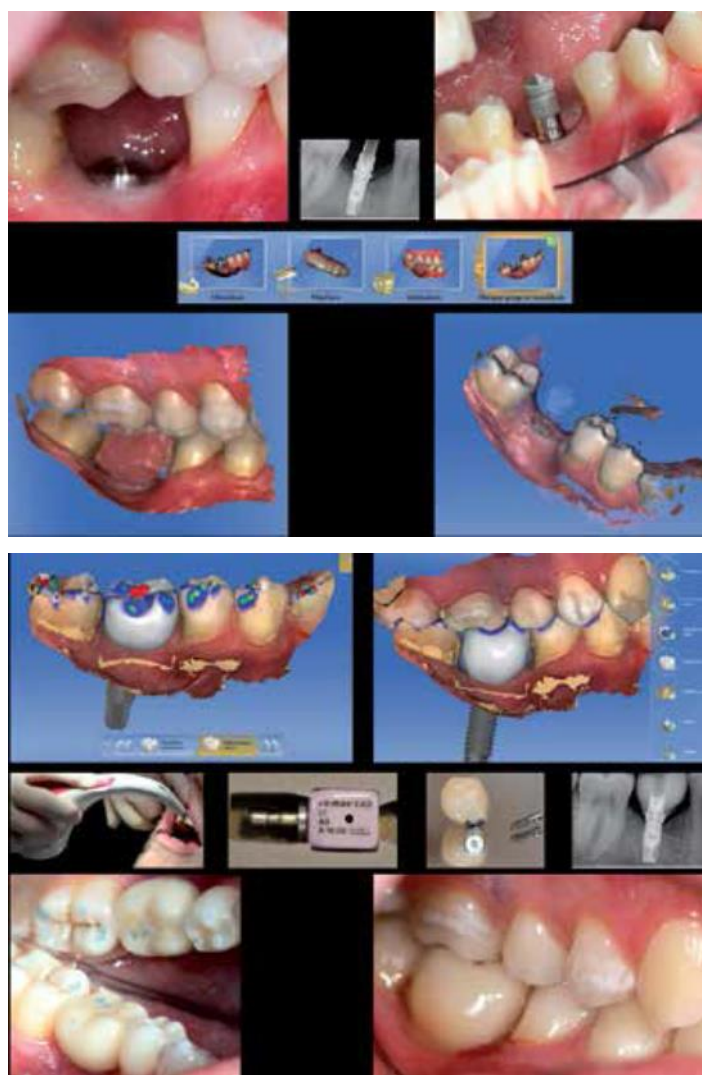


***Figure 47 : Wax up virtuel du logiciel AADVA DESIGNER® [4]***

#### ***4.2.2.2 Prothèses fixées***

Suivant l'étendue de la restauration et le contexte occlusal initial, le praticien pourra alors choisir le système de simulation virtuel adapté à l'indication prothétique comme décrit auparavant. De ce fait, toutes les restaurations prothétiques conjointes, définitives ou provisoires, peuvent être réalisées par CFAO tout en maîtrisant l'occlusion statique et dynamique. Ces restaurations respectent les mêmes exigences occlusales que pour la méthode conventionnelle mais bénéficient entre autre, grâce à l'articulateur virtuel, de la précision et rapidité des procédés CFAO [17]. L'évolution des systèmes d'empreinte optique et des logiciels de CAO permet la réalisation par CFAO de prothèses dento ou implanto portées fixes [18]. Cependant, lors de reconstructions prothétiques implantaires globales, une prise d'empreinte physico chimique reste obligatoire. En effet, les systèmes d'empreinte optique intrabuccale ne sont pour l'instant pas assez précis dans ces situations cliniques.

Dans le cas d'une reconstruction prothétique unitaire transvissée sur implants par CFAO directe (Fig. 48) [4], le praticien visse sur l'implant la partie « connectique » du pilier transvissé appelée TiBase. Un capuchon à usage unique de forme pyramidale appelé Scanbody est ensuite clipsé sur le TiBase. Le Scanbody détecté lors du scannage et reconnu par le logiciel, donne une position précise du col implantaire. Les empreintes optiques de l'arcade antagoniste et des deux arcades en OIM sont ensuite réalisées. La modélisation de la couronne grâce au logiciel de CAO contenant l'articulateur mathématique peut donc se faire. L'usinage se fait ensuite dans des blocs céramiques perforés en vue de recevoir la partie cylindrique du TiBase permettant le passage de la vis de prothèse. Le TiBase est ici collé sur la couronne céramique et le tout est ensuite vissé sur le col implantaire.



***Figure 48 : Réalisation en une séance d'une couronne transvissée sur implant avec le CEREC<sup>®</sup> 4.3 [4]***

#### 4.2.2.3 Prothèses Amovibles

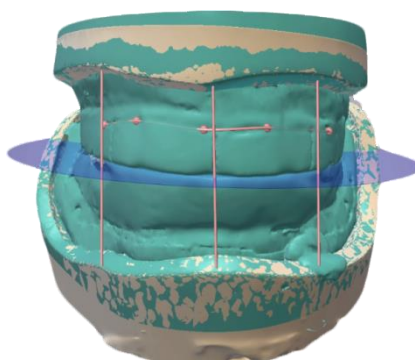
La prothèse amovible est elle aussi concernée par les progrès de la CFAO [2].

La prothèse amovible complète (PAC) peut être conçue intégralement par CFAO. Les empreintes primaires et anatomo fonctionnelle ainsi que la détermination de la relation intermaxillaire se font de manière conventionnelle. Les modèles physiques sont ensuite montés sur un articulateur mécanique en utilisant un arc facial. Les modèles avec leur galette de montage sont scannés séparément. Le logiciel de CAO en fonction de l'articulateur mécanique utilisé repositionne automatiquement les modèles numériques l'un en face de l'autre dans l'articulateur virtuel mathématique (Fig. 49) [56].



**Figure 49: Modèles numériques sur articulateur virtuel 3SHAPE<sup>®</sup> (image Dr Contrepois)**

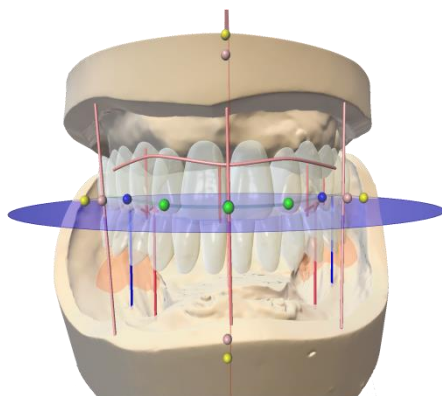
Un scannage des bases d'occlusion contenant les repères esthétiques peut être réalisé. Ces dernières sont ensuite repositionnées sur les modèles numériques permettant au prothésiste d'identifier les repères esthétiques (Fig. 50).



**Figure 50: Bases d'occlusion scannées (image du Dr Contrepois)**



Les dents prothétiques sont placées virtuellement de façon à respecter les concepts occlusaux de PAC (Fig. 51).



**Figure 51 : Montage virtuel des dents avec le logiciel 3SHAPE<sup>®</sup> (image du Dr Contrepois)**

L'emplacement des dents est laissé en négatif au sein de la plaque qui peut être usinée dans un bloc de résine rose. Les dents sont ensuite assemblées par collage dans la loge qui leur est réservée (Fig. 52).



**Figure 52 : Plaque de résine avec l'emplacement des dents en négatif (photo de Christophe Sireix)**

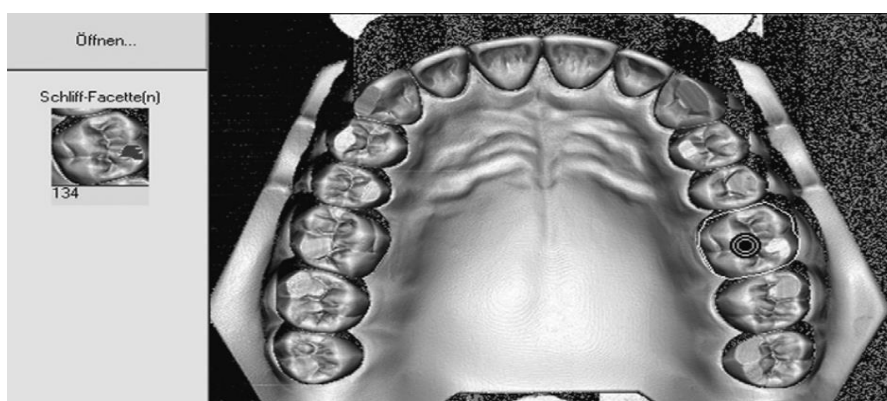
En ce qui concerne la prothèse amovible partielle métallique, seul le châssis peut être conçu et fabriqué par CFAO même si des avancées sont en cours. Le montage des dents se fait encore avec une méthode conventionnelle sur articulateur mécanique classique [39].

L'articulateur virtuel n'a donc pas encore totalement sa place dans la conception des prothèses amovibles. L'articulateur mécanique reste pour l'instant indispensable dans ce domaine de la dentisterie pour obtenir des prothèses intégrées occlusalement.

## 4.2.3 Pathologie

### 4.2.3.1 Détection facette d'usure et bruxisme

Gaertner et Kordass [32] propose dans l'articulateur virtuel un module permettant la détection automatique des facettes d'usure. L'algorithme recherche alors sur les dents des signes d'usure ou d'un bruxisme probable. Le praticien peut avec le curseur venir sélectionner la table occlusale qui l'intéresse et visualiser dans une fenêtre la facette d'usure à fort grossissement. Ce module permet au praticien de mieux analyser les mouvements parasites du patient provoqués par le bruxisme suspecté (Fig. 53).



**Figure 53 : Détection des facettes d'usure avec DENTCAM®**

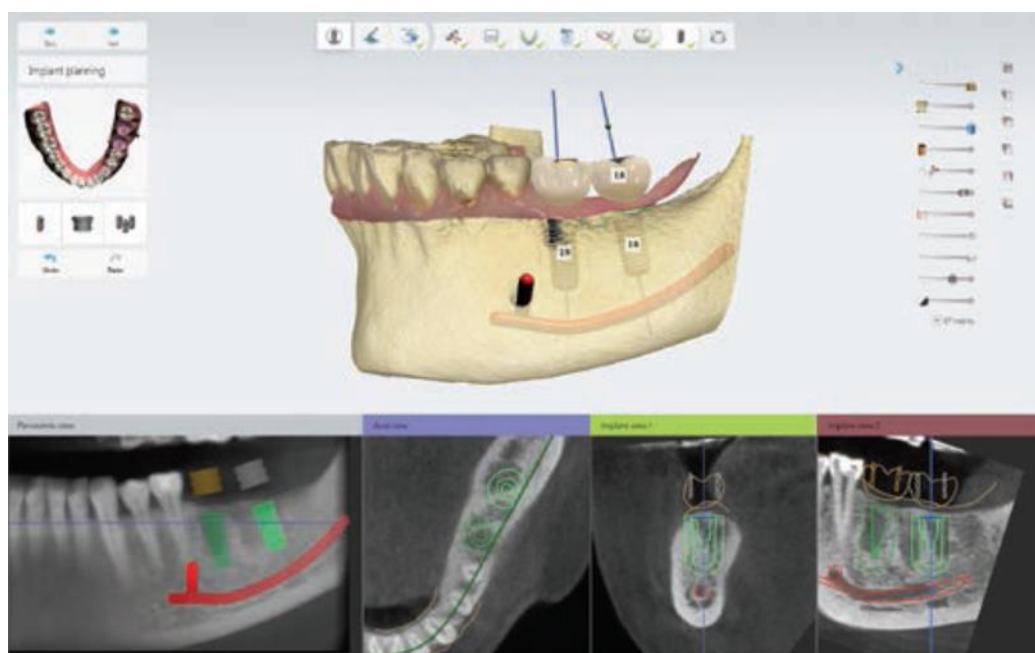
### 4.2.3.2 Conception de gouttières occlusales

Plusieurs types de gouttières occlusales peuvent être fabriqués par usinage, par stéréolithographie ou par impression [29]. Différents matériaux répondant au cahier des charges en termes de biocompatibilité et de dureté sont actuellement sur le marché. Suivant le type de gouttières réalisées, le praticien peut soit passer par un montage sur articulateur mécanique (montage en RC, arc facial...) et le scanner ensuite, soit directement sur le logiciel en faisant une empreinte optique des deux arcades. L'articulateur virtuel mathématique est ensuite une aide précieuse au prothésiste pour répartir les points d'occlusion aux endroits souhaités. Le logiciel permet de contrôler à fort grossissement la localisation et l'intensité des points de contacts en statique et en dynamique si nécessaire. De par la précision de la CFAO, le praticien n'aura que très peu de retouches occlusales à faire en bouche.

A l'avenir, l'articulateur virtuel prendra une place importante dans la conception et fabrication des gouttières occlusales. En effet, comme vu précédemment avec le logiciel SICAT<sup>®</sup> Function [25], le praticien pourra concevoir directement la gouttière occlusale à partir des données anatomiques du patient, associées à la dynamique masticatoire enregistrée. La position thérapeutique sera alors établie suivant les images tomographiques dynamiques obtenues (notamment celle de la position du condyle pendant les mouvements dynamiques).

#### 4.2.4 La chirurgie implantaire guidée

Dans le cadre de la chirurgie implantaire guidée, la position de l'implant est prédéfinie avant la chirurgie. A l'aide d'un logiciel, le praticien choisit la position de l'implant directement sur les images tomographiques numériques. A partir de ces données, un guide chirurgical est conçu par CFAO. Aujourd'hui, il est possible d'intégrer les modèles numériques des arcades sur les coupes numériques du CBCT [34, 47]. A l'aide du logiciel de CAO, le praticien peut au préalable modéliser la future reconstitution prothétique et vérifier l'occlusion statique et dynamique avec l'articulateur virtuel mathématique (Fig. 54). Le modèle numérique contenant la simulation prothétique est ensuite superposé avec les images tomographiques. Le praticien positionne alors l'implant suivant le contexte osseux tout en respectant l'objectif occlusal et esthétique prothétique. Le guide chirurgical est alors conçu pour obtenir un positionnement idéal de l'implant tant sur le plan anatomique que prothétique. De plus, le praticien aura la possibilité suivant la situation clinique, de concevoir préalablement par CFAO une prothèse provisoire adaptée occlusalement pour une mise en situation immédiate.



***Figure 54 : Etape préalable à la chirurgie guidée avec le logiciel "Implant Studio" de chez 3SHAPE<sup>®</sup> [68]***

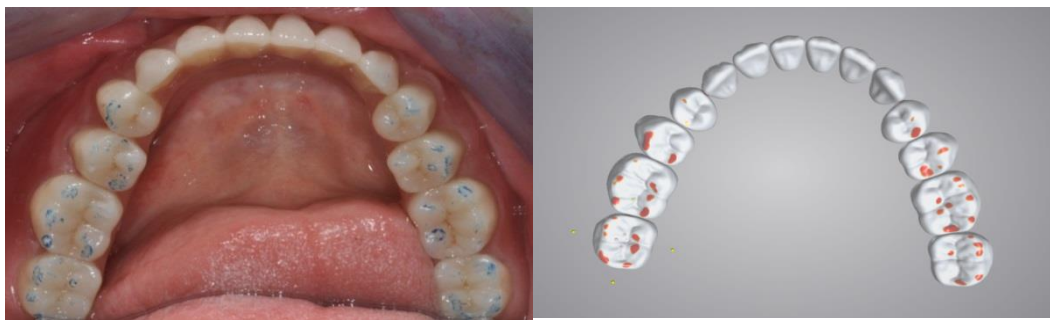
### 4.3 Articulateur virtuel adaptable et CAO

Les simulateurs virtuels et mécaniques utilisés au quotidien tentent de se rapprocher au mieux du fonctionnement de l'appareil manducateur. Ils offrent un bon moyen de reproduction de la cinématique mandibulaire mais restent tout de même limités. Les travaux sur la mastication entrepris par Lundeen et Gibbs ont mis en effet en évidence des mouvements de rétrusion condylienne lors de la mastication et à proximité du début de l'entrée de cycle, au moment de l'apparition des contacts dentaires qui sont impossibles à simuler avec un articulateur mécanique [30]. Il y a d'autres phénomènes délicats à appréhender car presque imperceptibles et qui ne sont pas pris en compte par les simulateurs mécaniques ou virtuels. Par exemple, le mouvement d'ascension vertical du condyle qui peut être dû à la propriété mécanique du disque articulaire qui sous contrainte a des capacités de déformation. Ainsi, actuellement les simulateurs mécaniques ou virtuels disponibles sur le marché en fonction de leur perfectionnement contrôlent plus ou moins bien les différents déterminants de l'occlusion. La reproduction de la cinématique mandibulaire n'est qu'une approche des mouvements réels réduite à une addition de valeurs angulaires schématisant dans l'espace, les trajets des condyles mandibulaires. Les concepts occlusaux étant souvent liés à l'évolution de la technique de simulation reproduisant la cinématique mandibulaire, l'espoir de se rapprocher à l'avenir de l'occlusion fonctionnelle décrite par Lauret et Gall [41] dans la conception des surfaces occlusales de nos prothèses est permis. La situation des arcades dentaires par rapport à l'axe bicondylien est un élément important pour la construction de l'architecture occlusale. Comme vu précédemment avec le logiciel SICAT<sup>®</sup> [25], il est possible d'importer les modèles des arcades numérisées au sein de l'imagerie tomodensitométrique. Le prothésiste peut alors travailler en axe charnière réel sans passer par un arc facial mécanique.

En ce qui concerne la cinématique mandibulaire, elle peut être complètement maîtrisée grâce à l'articulateur virtuel adaptable décrit par Gaertner et Kordass. Le procédé d'enregistrement des mouvements mandibulaires n'est actuellement qu'un outil d'analyse de l'occlusion statique et dynamique. Les données enregistrées n'ont pu jusqu'à maintenant qu'être couplées avec les images tomodensitométriques afin de perfectionner l'analyse occlusale. A l'avenir, il serait intéressant d'utiliser ces données dans la conception prothétique par CFAO. Le praticien enregistrerait au fauteuil les différents mouvements mandibulaires du patient lors de la mastication et transférerait ces données au sein du logiciel de CAO. Le prothésiste pourrait alors utiliser cet articulateur virtuel complètement adapté à la dynamique masticatoire du patient pour concevoir ces prothèses. L'occlusion prothétique se rapprocherait donc fortement de l'occlusion fonctionnelle décrite par Gall et Lauret. Cette possibilité n'a pour l'instant été qu'envisagée dans les différents articles et ne représente qu'une perspective d'avenir.

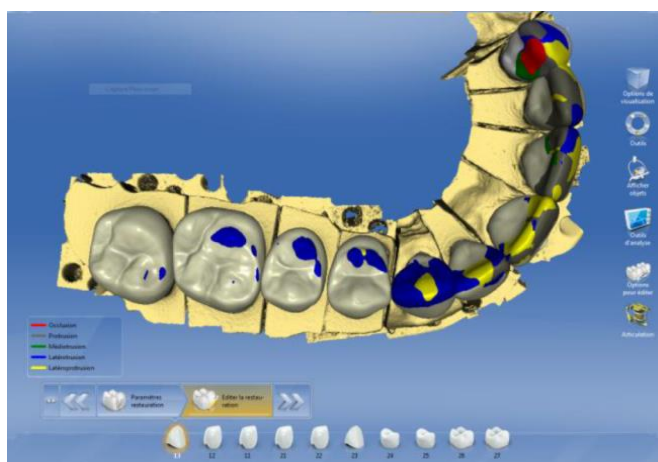
#### 4.4 Articulateur virtuel vs Articulateur mécanique

L'articulateur virtuel mathématique représente actuellement le seul dispositif permettant de mettre en relation statique et dynamique les modèles numériques des arcades dentaires dans un logiciel de CAO. Cet avènement ouvre la possibilité de concevoir et fabriquer des prothèses intégrées occlusalement tout en profitant de la précision CFAO. Différentes études ont en effet montré le même niveau de précision dans l'identification des points de contact statiques et dynamiques entre un articulateur mécanique et un articulateur virtuel [6, 14, 46]. Ce dernier présente le grand avantage dans certaines situations cliniques de préserver la chaîne numérique assurant une conception prothétique de précision (Fig. 55).



**Figure 55 : Points de contact statiques en bouche et sur l'articulateur virtuel (photo du Dr Contrepois)**

L'autre différence significative entre les deux systèmes se situe dans l'aspect pratique et ergonomique du simulateur virtuel où la « réalité augmentée » facilite la visualisation des points de contacts pour le praticien/prothésiste. La surface occlusale des arcades dentaires peut être affichée sur un ordinateur en plein écran grâce à un fort grossissement. Le prothésiste peut, par un jeu de transparence, apprécier les contacts antagonistes tout en maintenant les arcades en occlusion [35]. L'affichage des points de contacts statiques et dynamiques (latéralité gauche/droite, propulsion) se fait selon un code couleur et peut être visionné si on le souhaite simultanément ou non. De plus, autre aspect intéressant, l'intensité des forces de contact est représentée par un code couleur permettant d'identifier rapidement les sur-occlusions, les prématurités ou interférences (Fig. 56).



**Figure 56 : Code couleur des points de contacts statiques et dynamiques sur l'articulateur virtuel du logiciel CEREC® 4.2 [22]**

L'outil articulateur virtuel est une aide précieuse pour le prothésiste dans la modélisation prothétique par CAO. Par rapport à un articulateur mécanique, cette technologie rend les réglages occlusaux plus rapides et faciles. Les possibilités de programmation d'un articulateur virtuel mathématique couplable à un logiciel de CAO sont identiques à celles d'un simulateur mécanique adaptable ou semi-adaptable de deuxième génération.

L'articulateur virtuel présente aussi l'avantage de faciliter la communication entre le praticien et le laboratoire de prothèse. Le partage du fichier numérique favorise le dialogue entre les deux parties pour discuter éventuellement du concept occlusal à choisir suivant l'examen clinique réalisé. Malgré des qualités pratiques évidentes, l'articulateur virtuel ne peut pour l'instant pas supplanter totalement le simulateur mécanique. Comme décrit précédemment, l'utilisation du mécanique reste indispensable en prothèse amovible partielle métallique pour le montage des dents. Dans le cas de restaurations prothétiques fixes de grandes étendues par CFAO, le montage sur articulateur physique avec arc facial reste aussi inéluctable. A l'heure actuelle, bien que les articulateurs virtuels soient plus ergonomiques, le technicien de laboratoire et parfois le praticien sont obligés d'adapter l'anatomie occlusale des prothèses aux simulateurs qu'ils utilisent et non pas à la fonction du patient. L'articulateur mécanique, même s'il continue d'évoluer, ne permettra jamais au praticien de se rapprocher de cette réalité. Le développement de l'articulateur virtuel adaptable présenté initialement par Kordass et Gaertner associé à l'utilisation des images tomodensitométriques pour positionner les modèles numériques peuvent en revanche être des solutions d'avenir dans la conception prothétique.

# CONCLUSION

L'évolution rapide du numérique apporte des innovations et des outils propres à améliorer qualité de travail et ergonomie dans la chaîne prothétique. Les indications cliniques de la technologie CFAO ne cesse d'augmenter grâce à l'évolution des matériaux, au perfectionnement des logiciels de CAO ainsi qu'au développement de la FAO. La simulation numérique de l'occlusion est essentielle car elle est le préalable indispensable pour bénéficier des avantages du numérique et de la CFAO. L'occlusion est un domaine complexe, difficile à maîtriser où les procédés actuels ne permettent pas une mise en œuvre à grande échelle des concepts occlusaux identifiés dans la littérature. L'enregistrement et le transfert des informations occlusales sont très opérateurs-dépendants et soumis à de nombreux aléas. Les procédés informatiques vont être en mesure de rendre plus simple et plus pratique l'analyse de l'occlusion et sa reconstruction, permettant une gestion personnalisée de celle-ci pour chaque patient.

L'association de l'articulateur virtuel adaptable à un logiciel de CAO semble être la prochaine évolution attendue. Il est enfin raisonnable d'affirmer que de futures avancées technologiques permettront de repousser encore les limites et d'atteindre un niveau de simulation difficilement imaginable et concevable aujourd'hui.



# BIBLIOGRAPHIE

1. **Attal JP, Tirlet G.** *La CFAO appliquée à l'odontologie restauratrice et à la prothèse.* Réalité Clinique, 2009. 20(4) p 215-217.
2. **Busch M, Kordass B.** *Concept and Development of a computerized of prosthetic teeth for completes dentures.* International journal of computerized dentistry, 2006. 9: p 113-120.
3. **Collège National D'Occlusodontologie.** *Occlusodontologie, Lexique.* Quintessence Internaional, 2001.
4. **Cordelette M, Jordan-Combarieu F.** *Evolutions majeures de la CFAO directe.* Information dentaire, 2014. 20 : p 38-44.
5. **Coudray L, Tirlet G, Attal JP.** *Les matériaux accessibles par CFAO.* Réalités cliniques, 2009. 20 (4) p 15- 19.
6. **Delong R.** *Comparing maximum intercuspal contacts of virtual dental patients and mounted dental casts.* The Journal Of Prosthetic Dentistry, 2002.88 (6): p 622-630.
7. **Devaux JM.** *L'inlay céramique en CFAO directe.* Dentoscope , 2009.47 :p. 4-9.
8. **Dupas PH.** *L'analyse occlusale : avant, pendant, après.* Guide Clinique, Editions CdP, 2004.
9. **Dupas PH.** *Les articulateurs semi adaptables : Comment ? Pourquoi ? Quand ?.* Paris: CdP, 1996.
10. **Dupas PH, Picart B.** *Comprendre l'articulateur au cabinet dentaire et au laboratoire de prothèse.* Paris, CdP, 2001.
11. **Duret F.** *L'aventure de la CFAO dentaire.* Information Dentaire, 2014. 20 : p 18 -21.
12. **Duret F , Duret B, Pelissier B.** *CFAO : Le temps des démonstrations.* Information Dentaire, 2007. 89 (29) p 1663.
13. **Duret F, Duret B, Pelissier B.** *Le temps des pionniers.* Information Dentaire, 2007. 89(29) p 1659.
14. **Ellerbrock C, Kordass B.** *Comparaison of Computer Generated Occlusal Surfaces with Functionally Waxed-on Surfaces.* International journal of computerized dentistry, 2011. 14: p 23-31.
15. **Fang JJ, Kuo TH.** *Tracked motion-based dental occlusion surface estimation for crown restoration.* Computer Aided-Design, 2009 .41: p 315-323.
16. **Frank S, Frank F.** *Bite registration in CEREC and inLab.* International Journal Of Computerized dentistry, 2012. 15 : p 149-158.
17. **Fritzsche G.** *Cerec Omnicam and the Virtual Articulator- A Case Report.* International journal of computerized dentistry, 2013. 16: p59-67.

18. **Fritzsche G, Schenk O.** *New Cerec Software Version 4.3 for Omnicam and Bluecam.* International journal of computerized dentistry, 2014. 17(3): p 253-258.
19. **Gartner C, Kordass B.** *The Virtual Articulator: Development and Evaluation.* International journal of computerized dentistry, 2003. 6: p11-24.
20. **Ghanai S, Marmulla R, Wiechnik J, Muhling J, Kotrikova B.** *Computer-assisted three dimensional surgical planning: 3D virtual articulator: technical note.* International journal of oral and maxillofacial surgery, 2010 (39): p 75-82.
21. **Giraudeau A, Brocard D.** *Programmation de l'articulateur.* Occlusodontie pratique, Paris, CdP, 2000 : p141-152.
22. **Gueridon S.** *L'articulateur virtuel du Cerec Software 4.2 : véritable outil de diagnostic ou simple aide à la modélisation d'éléments prothétiques ? [Thèse de Doctorat en chirurgie dentaire].* Université Nice-Sophia Antipolis faculté de chirurgie dentaire, 2014.
23. **Gugwad RS, Basavakumar M, Abhijeet K, Arvind M, Sudhindra M, Ramesh C.** *Virtual Articulators in prosthodontics.* International journal of dental clinics, 2011.3(4): p 39-41.
24. **Hans Muller C.** *Registration of occlusion by buccal scan in CEREC software version 3.80.* International Journal Of Computerized dentistry, 2010. 13(3): p 265-273.
25. **Hanssen N, Ruge S, Kordass B.** *SICAT Function: Anatomical Real-Dynamic Articulation by Merging Cone Beam Computed Tomography and Jaw Motion Tracking Data.* International journal of computerized dentistry, 2014. 17(1): p65-74.
26. **Hollender M, Allard Y, Richelme J, Casu JP.** *La CFAO indirecte.* Information Dentaire, 2014. 20 : p 22-29.
27. **Hue O, Berteretche MV.** *Les articulateurs.* Quintessence International, 2003: p 111-122.
28. **Jaisson M.** *CFAO : les différents domaines de l'art dentaire touchés par l'innovation.* Nouvelles technologies, 2013.
29. **Jaisson M, Felenc S.** *Occlusion et CFAO.* Information dentaire, 2014.20 : p 48-56.
30. **Jaisson M, Felenc S, Nocent O.** *La gestion de l'occlusion par les systèmes de CFAO, les critères de choix.* Cahier de Prothèse, 2013. 161 : p 39-51.
31. **Koralakunte PR, Aljanakh M.** *The Role of Virtual Articulator in Prosthetic and Restorative Dentistry.* Journal of Clinical and Diagnostic Research, 2014. 8(7): p 25-28.
32. **Kordass B, Gärtner C, Söhnel A, Bisler A, Voss G, Bockholt U.** *The virtual articulator in dentistry: concept and development.* The Dental Clinics of North America. 2002. 46: p 493–506.

33. **Lalet P.** *Quand le biogénérique envahit le programme...* .Dentoscope , 2010.67 : p12-18.
34. **Landwerlin O.** *Quel équipement choisir?*. Dentoscope, 2015.
35. **Laplanche O, Duminil G.** *L'articulateur virtuel demain.... C'est tout de suite.* Information dentaire, 2011.40/41 : p. 63-72.
36. **Laplanche O, Duminil G, Leforestier E.** *Occlusion en prothèse implantaire.* Information dentaire, 2012. 32 : p50-58.
37. **Laurent D, Laplanche G, Laborde G et coll.** *Critères d'enregistrement clinique de la position occlusale de référence.* Synergie prothétique, 2000. 4(2) : p 247-259.
38. **Laurent D, Laplanche G, Laborde G et coll.** *Pratique de l'articulateur et prothèse fixée.* Synergie prothétique, 2000. 4 (2) : p 173-186.
39. **Laviolle O, Soenen A, Barsby-El Khoder A.** *CFAO et prothèse amovible partielle.* Information Dentaire, 2014. 29 : p 40-46.
40. **Le Gall M, Lauret JF.** *La fonction occlusale : Implications cliniques.* Editions CdP, 2007.
41. **Le Gall M, Lauret JF.** *Occlusion et fonction : une approche clinique rationnelle.* Editions CdP, 2002.
42. **Maestre-Ferrín L, Romero-Millán J, Peñarrocha-Oltra D, Peñarrocha-Diago M.** *Virtual articulator for the analysis of dental occlusion: An update.* Med Oral Patol Oral Cir Bucal, 2012.17 (1): p 160-163.
43. **Maniere- Ezvan A.** *Pratique de l'articulateur en ODF.* Occlusodontie Pratique, Paris, CdP 2000 : p 165-172.
44. **Marniquet S, Attal JP, Laurent T, Chabouis H.** *Les matériaux usinables en dentisterie restauratrice et en prothèse fixée.* Information dentaire, 2014. 20 : p 59-64.
45. **Mehl A.** *A New Concept for the Integration of Dynamic Occlusion in the Digital Construction Process.* International journal of computerized dentistry, 2012.15: p 109-123.
46. **Nemli SK, Wolfart S, Reich S.** *Inlab and CEREC connect: virtual contacts in maximum intercuspitation compared with original contacts- An in vitro study.* International journal of computerized dentistry, 2012. 15: p 23-31.
47. **Reich S, Kern T, Ritter L.** *Options in Virtual 3D, Optical-Impression- based Planning of Dental implants.* International journal of computerized dentistry, 2014. 17(2): p 101-113.
48. **Orthlieb Jd.** *Occlusodontie pratique.* Wolters Kluwer France, 2000 : p 240 .
49. **Reiss B.** *CEREC 4.0: Articulation and more.* International Journal Of Computerized dentistry, 2012. 15: p 137-148.

50. **Richter J, Mehl A.** *Evaluation for the Fully Automatic Inlay Reconstructions by Means of the Biogeneric Tooth Model.* International journal of computerized dentistry, 2006. 9: p 101-111.
51. **Ruge S, Kordass B.** *3D- VAS-Initial Results from Computerized Visualization of Dynamic Occlusion.* International journal of computerized dentistry, 2008. 11: p 9-16.
52. **Ruge S, Quooss A, Kordass B.** *Variability of Closing Movements, Dynamic Occlusion, and Occlusal Contact Patterns During Mastication.* International journal of computerized dentistry, 2011. 14: p 119-127.
53. **Schittly J.** *Occluseurs et articulateurs.* Occlusodontie Pratique, Paris, CdP 2000 : p 107-115.
54. **Schittly J.** *Pratique de l'articulateur en prothèse amovible partielle.* Occlusodontie Pratique, Paris, CdP 2000 : p 187-194.
55. **Shivamurthy S, Nandeeshwar D, Saritha MK.** *Virtual articulators : a future oriented technology.* Asian Journal of Medical and Clinical Sciences, 2012. 1 (2): p 98-101.
56. **Sireix C.** *CFAO la révolution en prothèse complète amovible.* Technologies dentaires, 2014. 326 : p 11-21.
57. **Soenen A.** *La CFAO semi directe.* Information Dentaire, 2014. 20 : p 30-36.
58. **Solaberrieta E, Arias A, Barrenetxea L, Etxaniz O, Minguez R, Muniozguren J.** *A virtual dental prostheses design method using a virtual articulator.* International design conference - design 2010 Dubrovnik – Croatia, 2010.
59. **Solaberrieta E, Mínguez R, Barrenetxea L, Etxaniz O.** *Direct transfer of the position of digitized casts to a virtual articulator.* The Journal of Prosthetic Dentistry, 2013.
60. **Song KG, Baek SH.** *Comparison of the accuracy of the three-dimensional virtual method and the conventional manual method for model surgery and intermediate wafer fabrication.* International journal of oral and maxillofacial surgery, 2009. 107 (1): p 13-21.
61. **Spath C, Kordass B.** *Optimization of the static occlusion by “ occlusal surface settling” in the CEREC 3 D software.* International Journal Of Computerized dentistry, 2006. 9: p 121 -126.
62. **Steger E.** *Face Hunter- Le nouveau scanner facial de Zirkozahn.* CAD/CAM rapport de l'industrie Zirkozahn, 2013. 2.
63. **Szentpetery A.** *Computer aided dynamic correction of digitized occlusal surfaces.* The journal of Gnathology, 1997. 16: p 53-60.
64. **Tamaki K.** *Reproduction of excursive tooth contact in an articulator with computerized axiography data.* The Journal Of Prosthetic Dentistry, 1997. 78: p373-378.

65. **Toubol JP, Duret F.** *De l'articulaire au neuromusculaire, de la mécanique à l'électronique.* Cahier de prothèse, 1989. 143 : p 43-52.
66. **Unger F.** *La CFAO en questions.* Le Fil Dentaire, 2008. 33 : p16-18.
67. **Vincent K.** *Prothèse amovible partielle métallique et CFAO. Illustration pédagogique et clinique [Thèse de Doctorat en chirurgie dentaire].* Bordeaux : Université Bordeaux 2 Victor Segalen Faculté d'Odontologie, 2011 : p 29-34.
68. [www.3Shape.com](http://www.3Shape.com)
69. [www.Sirona.com](http://www.Sirona.com)
70. [www.Zirkonzahn.com](http://www.Zirkonzahn.com)

# AUTORISATION DE REPRODUCTION

Le mail suivant a été envoyé aux différentes éditions dont certains schémas ou photos ont été utilisés pour l'illustration de ce travail :

Objet : demande d'autorisation de reproduction de schémas.

Madame, Monsieur,

Je me nomme Guillaume GIRAULT, et je termine mes études de chirurgie dentaire à Bordeaux.

Je travaille actuellement sur ma thèse d'état portant sur les possibilités actuelles de l'articulateur virtuel.

Au cours de mes recherches bibliographiques, j'ai réuni de nombreux articles et documents dont certains de vos éditions. Je me permets donc de vous demander l'autorisation de reproduction de certains schémas qui me permettraient d'illustrer ce travail.

Ma thèse se restreint à une impression strictement universitaire dans le cadre de l'obtention de mon diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire.

En attendant une réponse favorable de votre part, je vous prie de croire Madame, Monsieur en mes salutations les plus respectueuses.

Ci-joint la liste des ouvrages et la référence des schémas.

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

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

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux,

Date, Signature :

**Guillaume Girault**, Le 18 décembre 2015

Thèse pour l'obtention du DIPLOME d'ETAT de DOCTEUR en CHIRURGIE DENTAIRE 2015 – n°95

**Discipline:** Prothèse

## **L'articulateur virtuel : possibilités actuelles**

**Résumé:**

L'odontologie n'échappe pas à la révolution numérique que connaît notre société depuis plus de 20 ans. La conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) ne cesse de se développer dans le domaine de la dentisterie et notamment la prothèse grâce à l'augmentation du niveau de perfectionnement des machines - outils, à l'apparition de nouveaux matériaux et l'évolution rapide des logiciels de CAO.

L'objet principal de cette thèse est d'identifier les possibilités actuelles dans la prise en charge de l'occlusion dynamique en CFAO. L'emploi de simulateurs de mouvements mandibulaires numériques tels que les articulateurs virtuels sont cliniquement intéressants et offrent de nouvelles perspectives dans l'utilisation de la CFAO en prothèse.

**Mots-clés:**

Articulateur virtuel, Occlusion et CFAO

## **The virtual articulator : current possibilities**

**Summary:**

Odontology is also undergoing the digital revolution that has prevailed in our society for more than 20 years.

Computer-aided technologies have kept developing in dentistry, and particularly in dental prostheses thanks to the cutting-edge technology used in machines, new materials and computer-aided software.

The main purpose of this thesis is to pinpoint what it is possible to do nowadays with computer-aided technologies in dynamic occlusion.

The use of computer -aided mandibular movement simulators such as virtual stimulators are interesting from a clinical point of view and offer new prospects in the use of computer-aided technologies in dental prostheses.

**Key-words:**

Virtual articulator, Occlusion and CAD-CAM

Université de Bordeaux – Collège des Sciences de la Santé

UFR des Sciences Odontologiques

16-20 Cours de la Marne

33082 BORDEAUX CEDEX



