

**UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2**

**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

Année de soutenance : 2016

N° :

THESE POUR LE

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

Présentée et soutenue publiquement le 4 juillet 2016

Par Adrian CRUCES

Né le 27 août 1991 à Villeneuve-d'Ascq (France)

**LES ARTICULATEURS VIRTUELS**

**JURY**

Président : Monsieur le Professeur Pascal BEHIN

Assesseurs : Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE

Monsieur le Docteur François GRAUX

Monsieur le Docteur François-Xavier SANTOLALLA

Président de l'Université	:	Pr. X. VANDENDRIESSCHE
Directeur Général des Services de l'Université	:	P-M. ROBERT
Doyen	:	Pr. E. DEVEAUX
Vice-Doyens	:	Dr. E. BOCQUET, Dr. L. NAWROCKI et Pr. G. PENEL
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	L. LECOCQ

## **PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.**

### PROFESSEURS DES UNIVERSITES :

P. BEHIN	Prothèses
H. BOUTIGNY	Parodontologie
T. COLARD	Sciences ques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
<b>E. DELCOURT-DEBRUYNE</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Parodontologie</b>
E. DEVEAUX	Odontologie Conservatrice - Endodontie <b>Doyen de la Faculté</b>
G. PENEL	Responsable de la Sous-Section des <b>Sciences Biologiques</b>
M.M. ROUSSET	Odontologie Pédiatrique

## MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

<b>T. BECAVIN</b>	Responsable de la Sous-Section d' <b>Odontologie Conservatrice - Endodontie</b>
F. BOSCHIN	Parodontologie
<b>E. BOCQUET</b>	Responsable de la Sous- Section d' <b>Orthopédie Dento-Faciale</b>
<b>C. CATTEAU</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale</b>
A. CLAISSE	Odontologie Conservatrice - Endodontie
M. DANGLETERRE	Sciences Biologiques
A. de BROUCKER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
T. DELCAMBRE	Prothèses
<b>C. DELFOSSE</b>	Responsable de la Sous-Section d' <b>Odontologie Pédiatrique</b>
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Odontologie Conservatrice - Endodontie
<b>J.M. LANGLOIS</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation</b>
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Sciences Biologiques
P. ROCHER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
<b>M. SAVIGNAT</b>	Responsable de la Sous-Section des <b>Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie</b>
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
<b>J. VANDOMME</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Prothèses</b>

### **Réglementation de présentation du mémoire de Thèse**

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

Aux membres du jury...

**Monsieur le Professeur Pascal BEHIN**

**Professeur des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Sous-Section Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Paris DESCARTES (Paris V – mention Odontologique)

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de cette thèse,  
Pour vos remarquables qualités de clinicien,  
Soyez assuré de mes remerciements sincères  
et de mon plus grand respect.

## **Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE**

**Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Sous-Section Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Responsable de Sous-section Prothèses

Responsable des Relations avec l'Ordre et avec les Partenaires Industriels.

Vous me faites l'honneur de siéger dans ce jury de thèse et je vous en remercie. Ce fut un plaisir de recevoir les enseignements que vous dispensez avec rigueur et bonne humeur. Vous partagez avec passion votre vision de la dentisterie moderne. Veuillez recevoir l'expression de toute mon estime.

**Monsieur le Docteur François GRAUX**

**Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Sous-Section Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Pour avoir accepté de participer à ce jury de thèse,  
Pour la qualité de vos enseignements et notamment  
les travaux pratiques de prise d'arc facial  
et de montage sur articulateur,  
Recevez ici le témoignage de ma profonde gratitude.

**Monsieur le Docteur François-Xavier SANTOLALLA**

**Chargé d'Enseignement**

*Sous-Section Prothèses*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Vous avez accepté la direction de cette thèse avec  
enthousiasme et je vous en remercie.  
Pour votre disponibilité, votre aide et tous vos conseils avisés,  
Recevez l'expression de ma profonde gratitude.  
Que ce travail vous témoigne ma respectueuse reconnaissance.





# Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>13</b>
<b>1 Notions fondamentales et rappels .....</b>	<b>15</b>
1.1 Anatomie .....	15
1.1.1 Surfaces articulaires .....	15
1.1.1.1 Mandibulaires .....	15
1.1.1.2 Temporales.....	16
1.1.2 Appareil discal et capsule articulaire.....	17
1.1.2.1 Le disque articulaire.....	17
1.1.2.2 La capsule articulaire .....	18
1.1.3 Ligaments.....	18
1.1.3.1 Ligaments intrinsèques .....	18
1.1.3.2 Ligaments extrinsèques .....	19
1.1.4 Muscles .....	19
1.1.4.1 Muscles élévateurs et diducteurs .....	19
1.1.4.2 Muscles abaisseurs .....	20
1.1.5 Organisation des arcades dentaires .....	21
1.1.5.1 La courbe de Spee.....	21
1.1.5.2 La courbe de Wilson .....	21
1.2 Plans de référence.....	21
1.2.1 Le plan axio-orbitaire .....	22
1.2.2 Le plan d'occlusion .....	22
1.2.3 Le plan de Camper .....	23
1.3 Positions de référence mandibulaires .....	23
1.3.1 Occlusion d'intercuspitation maximale (OIM ou ICM).....	23
1.3.2 Occlusion de relation centrée (RC) .....	23
1.4 Cinématique mandibulaire .....	24
1.4.1 Mouvements élémentaires.....	24
1.4.1.1 La rotation.....	24
1.4.1.2 La translation .....	24
1.4.2 Mouvements fondamentaux.....	25
1.4.2.1 Mouvement d'ouverture/fermeture .....	25
1.4.2.2 Mouvement de propulsion.....	25
1.4.2.3 Mouvement de diduction/latéralité.....	26
1.4.2.4 Enveloppe limite des mouvements.....	26
1.4.3 Mouvements fonctionnels .....	27

1.5	Analogie entre l'ATM et les articulateurs .....	29
<b>2</b>	<b>Les articulateurs virtuels .....</b>	<b>31</b>
2.1	Articulateurs mathématiques .....	33
2.1.1	Table de montage personnalisée.....	33
2.1.1.1	Généralités sur le Cerec® .....	33
2.1.1.2	Etapas pour le montage sur articulateur.....	34
2.1.1.3	Paramètres de l'articulateur virtuel du Cerec® 4.2 .....	36
2.1.1.4	Paramètres de l'articulateur virtuel du Cerec® 4.4 .....	37
2.1.2	Table de montage arbitraire.....	40
2.1.3	Double montage sur articulateur physique et articulateur virtuel .....	41
2.1.3.1	Double montage avec numérisation de l'articulateur .....	42
2.1.3.1.1	Prérequis.....	42
2.1.3.1.2	Résumé du protocole .....	42
2.1.3.1.3	Illustration d'un protocole de double montage.....	43
2.1.3.1.4	Gestion de l'esthétique des reconstitutions dans l'articulateur virtuel .....	48
2.1.3.2	Double montage avec dispositif de transfert.....	48
2.2	Articulateurs virtuels totalement adaptables.....	49
2.2.1	Articulateur DentCAM.....	49
2.2.2	Jaw Motion Analysis .....	50
2.2.2.1	Présentation et fonctionnement.....	50
2.2.2.2	Etude de la précision du JMA.....	52
2.2.3	Sicat Function.....	53
2.3	Avantages.....	54
2.4	Inconvénients .....	55
<b>3</b>	<b>Récents développements et perspectives.....</b>	<b>56</b>
3.1	Précision des contacts occlusaux virtuels .....	56
3.1.1	Etude d'adéquation des contacts occlusaux virtuels et conventionnels en ICM par DeLong .....	56
3.1.2	Etude comparative des enregistrements occlusaux virtuels et conventionnels par Solaberrieta.....	58
3.2	Transfert direct sur articulateur virtuel.....	60
3.2.1	Prototype d'arc facial virtuel de Solaberrieta .....	60
3.2.1.1	Présentation.....	60
3.2.1.2	Protocole .....	60
3.2.2	Arc facial virtuel avec le Face Hunter.....	63
3.2.2.1	Présentation.....	63
3.2.2.2	Protocole en cours de développement .....	63
	<b>Conclusion.....</b>	<b>66</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>67</b>
<b>A</b>	<b>Etude de DeLong [37].....</b>	<b>70</b>

<b>B Etude de Solaberrieta [38]</b> .....	<b>72</b>
B.1 Validation du calcul des contacts occlusaux virtuels .....	72
B.2 Comparaison des logiciels par paire .....	73
<b>Table des figures</b> .....	<b>75</b>

# Introduction

Au début du XXIème siècle, de nouvelles technologies associées au développement croissant de l'informatique offrent de nouvelles perspectives dans les cabinets dentaires et les laboratoires de prothèse. La pratique de la dentisterie numérique s'est démocratisée et concerne un nombre toujours plus important de praticiens et de prothésistes. Cette révolution technologique s'est fait connaître sous le nom de CFAO (conception et fabrication assistée par ordinateur) dentaire.

La CFAO dentaire fait évoluer la chaîne de réalisation des prothèses. Ces améliorations se font à un rythme soutenu calqué sur celui des technologies informatiques. La CFAO permet aujourd'hui de gérer de nombreuses étapes dans la conception et la réalisation prothétique, jusqu'aux réglages et contrôles des contacts dento-dentaires : l'occlusion. La simulation de l'occlusion repose sur l'utilisation de simulateurs appelés articulateurs.

Les articulateurs sont traditionnellement décrits comme des dispositifs mécaniques sur lesquels sont montés les moulages maxillaire et mandibulaire du patient. Ils permettent de simuler l'occlusion et la cinématique mandibulaire propre à chaque patient de manière extemporanée. Les chirurgiens-dentistes et prothésistes s'entendent sur la nécessité d'utiliser les articulateurs pour le diagnostic clinique, la planification et la conception de prothèses dentaires. Paradoxalement, plusieurs études ont démontré qu'en France l'utilisation au cabinet dentaire des articulateurs reste très confidentielle [1]. L'articulateur représente pourtant le seul moyen de reproduire les rapports intermaxillaires et d'analyser les contacts dento-dentaires sans nécessiter la présence du patient. De plus, les connaissances théoriques et pratiques sur la manipulation de ces simulateurs sont dispensées aux étudiants tout au long de leur cursus.

Avec la CFAO, la manipulation des arcades dentaires du patient dans un environnement virtuel implique de simuler l'occlusion. Les articulateurs virtuels sont apparus au sein des logiciels pour répondre à ce besoin. Quels sont les différents articulateurs virtuels existants ? Peuvent-ils remplacer avantageusement les articulateurs mécaniques utilisés traditionnellement ? La précision de la gestion numérique de l'occlusion est-elle fondée sur des preuves ?

Afin de répondre à ces problématiques nous ferons dans un premier chapitre des rappels sur l'anatomie de l'articulation temporo-mandibulaire afin d'en dresser l'analogie avec les articulateurs mécaniques.

Dans un deuxième chapitre, nous détaillerons les différents articulateurs virtuels disponibles et les principes de transfert des modèles qui y sont associés. Nous préciserons les avantages et inconvénients de ces articulateurs.

Enfin nous analyserons la validité des contacts occlusaux calculés virtuellement et nous décrirons les récentes évolutions liées aux articulateurs virtuels.

# — Chapitre 1 —

## Notions fondamentales et rappels

Cette première partie vise à présenter les notions fondamentales d'anatomie puis de cinématique liées à l'articulation temporo-mandibulaire (ATM). Elles sont essentielles à la compréhension de l'analogie entre l'ATM et l'articulateur.

L'articulation temporo-mandibulaire fait partie d'un ensemble biologique appelé appareil manducateur. Celui-ci participe à diverses fonctions à savoir la ventilation, la mastication, la préhension, la succion, la déglutition, et la communication par la phonation et la mimique.

### 1.1 Anatomie

D'un point de vue anatomique, l'ATM est une diarthrose bicondylienne à disque interposé. Elle met en relation la mandibule avec le crâne au niveau de l'os temporal.

#### 1.1.1 Surfaces articulaires

##### 1.1.1.1 Mandibulaires

La mandibule est le seul os mobile de la face. Elle est constituée d'une portion horizontale, le corps de la mandibule, et de deux parties verticales, les rami mandibulaires. Le bord supérieur de chaque branche montante présente deux saillies (figure 1) : le processus coronoïde en antérieur et le processus condyloïde en postérieur qui est supporté par une portion rétrécie appelé col du condyle.

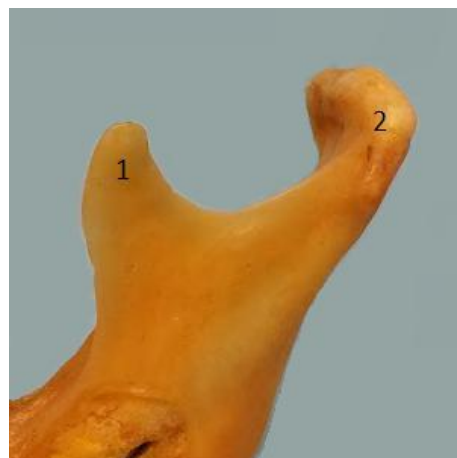


Figure 1 – Vue antéro-latérale de la branche montante de la mandibule.  
1. Processus coronoïde 2. Processus condyloïde  
Crédit : Photographie personnelle.

La surface articulaire mandibulaire est formée par le condyle mandibulaire. Ce processus condyloïde a une forme ovoïde à grand axe oblique vers l'arrière et le dedans. Dans le sens transversal le condyle est uniformément convexe. Il possède deux versants dans le sens antéro-postérieur qui sont séparés par une crête mousse. Le versant antérieur du condyle est arrondi régulièrement et est recouvert d'un tissu fibreux. Ce versant est articulaire, par l'intermédiaire du disque, avec le condyle temporal. Le versant postérieur est pour sa part lisse et non articulaire. Il se continue par le bord postérieur de la branche montante mandibulaire.

Il existe une importante variation de taille et de forme des condyles mandibulaires entre les individus mais également chez un même individu au cours de son existence. Ils mesurent en moyenne 20 millimètres dans le plan frontal et 8,5 millimètres dans le plan sagittal [2].

### 1.1.1.2 Temporales

L'os temporal est un os pair situé sur les faces latérales du crâne. Il est formé de trois parties :

- l'écaïlle ou partie squameuse qui est aplatie. Elle est communément décrite comme un disque dont le quart antéro-inférieur est rabattu horizontalement vers le dedans ;
- le rocher ou partie pétreuse ;
- l'os tympanal ou partie tympanique.

La surface articulaire temporale se compose de deux parties : le tubercule articulaire et la fosse mandibulaire (ou cavité glénoïde) qui le prolonge postérieurement.

Le **tubercule articulaire** est une saillie transversale arrondie située dans le prolongement de l'arcade zygomatique. Il est convexe dans le sens antéro-postérieur et légèrement concave transversalement. Il est recouvert de cartilage articulaire qui rétablit une convexité dans tous les sens.

La **fosse mandibulaire** se situe sur la portion horizontale de l'écaïlle de l'os temporal. C'est une dépression concave profonde dont le grand axe est oblique vers l'avant et le dedans. Ses limites sont en antérieur le tubercule articulaire, en postérieur le méat acoustique externe, médialement l'épine de l'os sphénoïde et latéralement la racine longitudinale de l'arcade zygomatique.

La fosse mandibulaire est divisée en deux portions par la scissure pétro-tympano-squameuse : une antérieure et l'autre postérieure. La partie antérieure est articulaire, elle appartient à l'écaïlle de l'os temporal et est recouverte de tissu fibreux. La partie postérieure, appartient au tympanal et ne participe pas à l'articulation temporo-mandibulaire.



Les surfaces articulaires temporale et condylienne ne sont pas en contact direct. Elles sont mises en relation par l'intermédiaire du disque articulaire qui est solidaire du condyle mandibulaire.

## **1.1.2 Appareil discal et capsule articulaire**

### **1.1.2.1 Le disque articulaire**

Dans le plan sagittal, le disque articulaire a la forme d'une lentille biconcave aplatie verticalement. Il possède donc une zone centrale amincie et un bourrelet périphérique. La zone centrale de faible épaisseur est constituée de fibres de collagènes orientées longitudinalement. Le bourrelet périphérique possède deux parties : un bourrelet postérieur deux fois plus épais que le bourrelet antérieur.

Le disque articulaire permet la concordance des surfaces articulaires temporale et condylienne toutes deux convexes et qui ne peuvent donc pas s'adapter spontanément. Il divise ainsi l'articulation temporo-mandibulaire en deux compartiments :

- Le compartiment supérieur dit disco-temporal. C'est le compartiment de translation de l'ensemble condyle-disque contre la surface articulaire temporale. Condyle et disque forment une entité anatomo-physiologique appelée le complexe condylo-discal.
- Le compartiment inférieur dit disco-condylien. C'est le compartiment de rotation du condyle sous le disque.

Dans le plan horizontal, le disque a une forme ovalaire dont le grand axe est orienté vers l'arrière et le dedans (comme le condyle mandibulaire).

## **Histologie**

L'étude histologique du disque révèle son rôle majeur dans l'articulation et permet de comprendre la difficulté de reproduire ses propriétés viscoélastiques.

Le disque est constitué d'une trame de collagène dont la disposition varie en fonction des zones. Celle-ci contient des protéoglycanes et de l'eau. Le disque est composé majoritairement de collagène de type 1 en contact avec du collagène de type 2 qui est moins représenté [3].

## **Rôle**

Le disque articulaire joue plusieurs rôles au sein de l'ATM ; il est stabilisateur, amortisseur, et protecteur [2]. Le rôle de stabilisateur, joué conjointement avec le liquide synovial, se fait en répartissant les forces de frottements et les pressions lors de l'ouverture buccale.

Le rôle d'amortisseur se manifeste par la capacité qu'a le disque d'opposer une résistance viscoélastique. C'est-à-dire que lorsqu'on soumet le disque à une charge, il y a dissipation de l'énergie appliquée.

Dans la littérature, de nombreuses études se sont intéressées à ces propriétés particulières du disque. Récemment et grâce au perfectionnement de l'informatique, des modélisations numériques « par éléments finis » permettent de simuler en trois dimensions l'ATM et d'approcher le comportement viscoélastique du disque.

### 1.1.2.2 La capsule articulaire

Elle est classiquement décrite comme un manchon fibreux tronconique inséré sur le pourtour des surfaces articulaires de l'os temporal et du condyle. Cependant, la capsule articulaire ne renferme pas la totalité de l'ATM puisque sa partie antérieure en est dépourvue. Ainsi, c'est l'ensemble des structures musculaires et ligamentaires insérées sur l'articulation qui constituent la capsule.

### 1.1.3 Ligaments

On distingue les ligaments intrinsèques (figure 2), qui viennent renforcer les parties médiales et latérales de l'articulation, des ligaments extrinsèques (figure 3) qui sont à distance.

#### 1.1.3.1 Ligaments intrinsèques

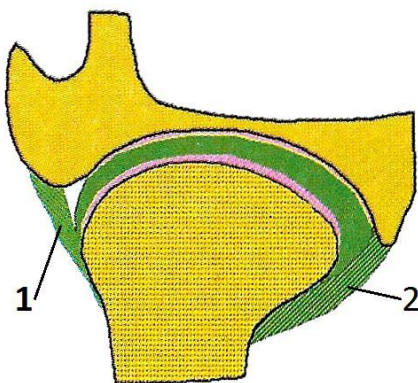


Figure 2 – Ligaments intrinsèques de l'ATM en coupe frontale [2].

1. Ligament latéral externe
2. Ligament latéral interne

#### **Ligament latéral externe**

Ce ligament est tendu depuis l'arcade zygomatique jusqu'au pôle latéral du condyle mandibulaire. Il est court, épais et a la forme d'un éventail vers le haut.

#### **Ligament latéral interne**

Il est tendu du bord interne de la fosse mandibulaire au pôle médial de l'articulation. Il se confond avec les insertions du muscle ptérygoïdien latéral au niveau du col condyloire.

### 1.1.3.2 Ligaments extrinsèques

#### **Ligament stylo-mandibulaire**

Il est tendu du bord antérieur du processus styloïde au bord postérieur de l'angle mandibulaire. Il joue le rôle d'une bande d'arrêt lors du mouvement d'abaissement mandibulaire en propulsion.

#### **Ligament sphéno-mandibulaire**

Il s'insère de l'épine de l'os sphénoïde à la lingula et l'anti-lingula situées sur la face médiale de la mandibule. Ce ligament est un moyen de contention important de l'articulation.

#### **Ligament ptérygo-mandibulaire**

Il s'insère de l'hamulus ptérygoïdien à la crête buccinatrice située latéralement au triangle rétro-molaire. Ce ligament est extrêmement inconstant.

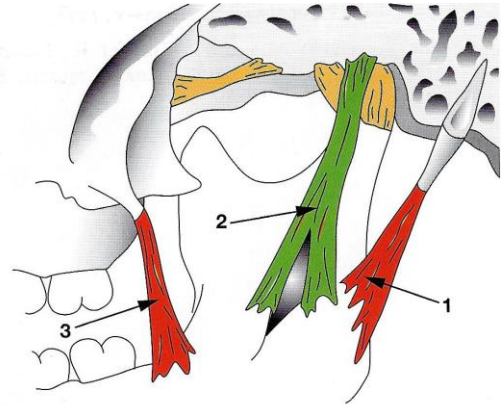


Figure 3 – Ligaments extrinsèques de l'ATM vue médiale [3].

1. ligament stylo-mandibulaire
2. ligament sphéno-mandibulaire
3. ligament ptérygo-mandibulaire

### 1.1.4 Muscles

De nombreux muscles interviennent dans les mouvements mandibulaires. Ces muscles masticateurs sont classés en deux groupes. Il y a d'une part les muscles élévateurs et diducteurs de la mandibule. Ce groupe est constitué des muscles temporal, masséter, ptérygoïdien médial et ptérygoïdien latéral. Tous ces muscles sont innervés par le nerf trijumeau. Il y a d'autre part les muscles abaisseurs de la mandibule qui sont tous abaisseurs indirects en faisant relais sur l'os hyoïde.

#### 1.1.4.1 Muscles élévateurs et diducteurs

Le **muscle temporal** s'insère au niveau de la fosse temporale pour sa portion crânienne et sur le processus coronoïde de la mandibule. Il est aplati transversalement en forme d'éventail. Sa portion antérieure lui permet d'être élévateur de la mandibule tandis que sa portion postérieure permet la rétroimpulsion et un ajustement condylo-discal.

Le **muscle masséter** est appliqué sur la face externe du ramus mandibulaire. Il est court, épais, de forme quadrilatère et possède trois parties distinctes (superficielle, moyenne et profonde). Ses insertions ont pour origine la face interne et le bord inférieur de l'arcade zygomatique et se terminent sur le versant externe de l'angle mandibulaire. Le masséter est élévateur de la mandibule, sa tétanisation pathologique correspond au trismus.

Le **ptérygoïdien médial** est symétrique du muscle masséter par rapport au ramus mandibulaire. Il s'insère depuis le processus ptérygoïde de l'os sphénoïde ainsi que du processus pyramidal de l'os palatin pour se terminer au niveau de la face médiale de l'os mandibulaire. Sa contraction unilatérale entraîne une diduction controlatérale de la mandibule. Sa contraction bilatérale provoque une élévation mandibulaire.

Le **ptérygoïdien latéral** est un muscle de forme complexe dit prismatique triangulaire irrégulier et court. Sa description est l'objet de contradiction dans la littérature. Le Professeur Gaudy déclare d'ailleurs que « ni les études histologiques ni celles de l'innervation ne permettent de confirmer [l'existence] de deux chefs d'égal volume et de fonction distincte » [3]. Au lieu de cela, il décrit le muscle comme possédant un corps musculaire unique mais multipenné. Cela signifie qu'il est composé de 8 couches musculo-aponévrotiques alternées avec des dédoublements terminaux. L'organisation du muscle est envisagée selon deux contingents en fonction de leurs insertions : les couches d'origine disco-articulaire, au nombre de deux et les couches d'origine mandibulaire au nombre de six.

La description du ptérygoïdien latéral la plus classique est celle de Paturet, Rouvière et Delmas [4] avec deux chefs :

- le chef supérieur appelé sphénoïdal ;
- le chef inférieur appelé ptérygoïdien.

Sa contraction bilatérale entraîne la propulsion tandis que sa contraction unilatérale provoque une diduction controlatérale de la mandibule.

#### 1.1.4.2 Muscles abaisseurs

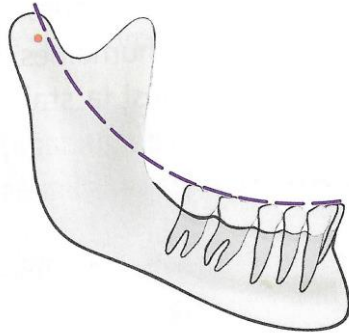
Le **Mylo-hyoïdien** est un muscle mince qui forme avec son homologue controlatéral le plancher buccal. La contraction des fibres postérieures, s'attachant à la mandibule et l'os hyoïde, entraîne l'abaissement mandibulaire.

Le **Digastrique** est formé comme son nom l'indique de deux ventres reliés entre eux par un tendon intermédiaire. Le ventre antérieur s'insère depuis l'os hyoïde et se termine au niveau de la fossette digastrique située sur le bord inférieur du corps de la mandibule en parasymphysaire. Le ventre postérieur a pour origine l'incisure mastoïdienne et se poursuit jusqu'à la petite corne de l'os hyoïde.

Le dernier muscle abaisseur est le **Génio-hyoïdien**. La contraction de ses fibres a pour conséquence l'abaissement de la mandibule et l'élévation de la langue.

## 1.1.5 Organisation des arcades dentaires

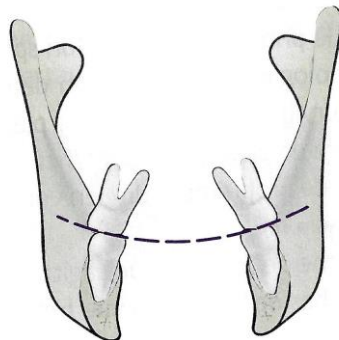
### 1.1.5.1 La courbe de Spee



Elle est définie dans le plan sagittal par la courbe à concavité supérieure issue du sommet de la cuspide de la canine mandibulaire et qui suit la ligne des pointes cuspidiennes vestibulaires des prémolaires et molaires mandibulaires [5] (figure 4).

Figure 4 – Représentation graphique de la courbe de Spee [6].

### 1.1.5.2 La courbe de Wilson



Elle est définie dans le plan frontal par la courbe à concavité supérieure passant par les pointes cuspidiennes vestibulaires et linguales des pluricuspidées (figure 5). Il existe une courbe de Wilson pour chaque couple de dents homologues, on parlera de « courbes » de Wilson au pluriel, qui sont de plus en plus concaves dans la région molaire.

Figure 5 – Schématisation de la courbe de Wilson pour un couple de molaires [6].

## 1.2 Plans de référence

Géométriquement un plan est défini par un minimum de trois points. Le recours à des plans de référence pour situer le positionnement des arcades dentaires trouve son origine dans les traitements des édentés totaux depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Il existe de nombreux plans de référence, nous étudions ici les plans les plus utilisés en odontologie prothétique.

### 1.2.1 Le plan axio-orbitaire

Le plan axio-orbitaire (PAO) est défini par le centre de rotation bicondylien (l'axe charnière) et un des points sous-orbitaires, droit ou gauche. Le PAO donne la situation réciproque entre les condyles (repères postérieurs non crâniens) et les faces occlusales. Cliniquement, les points condyliens correspondent à l'émergence cutanée de l'axe charnière et le point sous-orbitaire est repéré par palpation. Cette concordance entre la clinique, l'anatomie mais aussi l'imagerie fait du PAO le plan de référence pour le montage sur articulateur (figure 6). Le transfert des modèles sur articulateurs se fait à l'aide d'un arc facial de transfert.

L'analogie radiographique du plan axio-orbitaire est le plan de Francfort. Sur une radiographie de profil, il passe par le point le plus élevé des deux conduits auditifs externes et le rebord sous orbitaire.

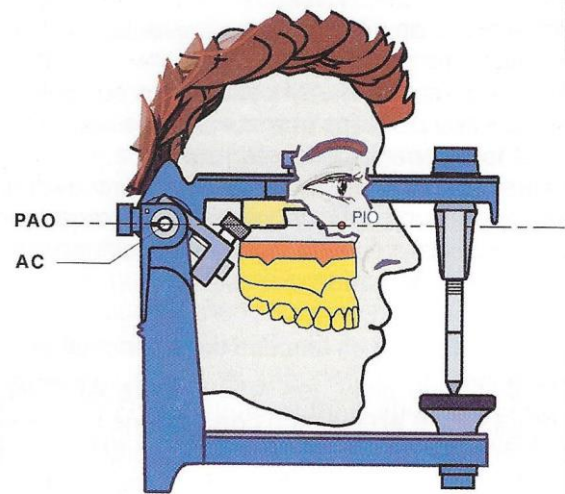


Figure 6 – La superposition du plan de référence chez le patient avec la branche supérieure de l'articulateur permet un positionnement fiable du moulage maxillaire [2].

Légende : PAO= Plan Axio-Orbitaire ; AC= Axe Charnière ; PIO= Point Infra-Orbitaire

### 1.2.2 Le plan d'occlusion

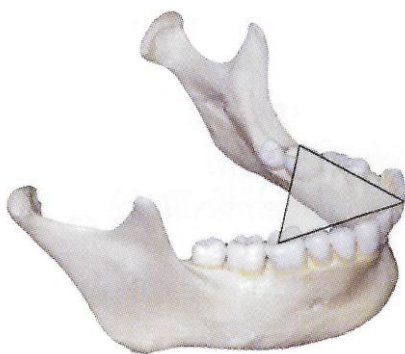


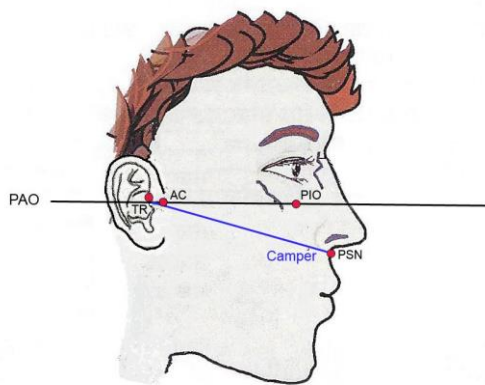
Figure 7 – Plan d'occlusion [7].

Le plan d'occlusion détermine l'organisation des arcades dentaires dans le plan horizontal. Il est défini par le bord libre des incisives mandibulaires et les pointes des cuspides disto-vestibulaires des deuxième molaires mandibulaires (figure 7). L'utilisation de références dentaires rend ce plan pertinent pour des restaurations de faible étendue dans un cadre dento-squelettique harmonieux.

Le plan d'occlusion n'est pas plat mais il représente schématiquement la zone d'affrontement où se réalise l'occlusion. Le plan d'occlusion n'est ainsi qu'une corde de la courbe selon laquelle les arcades dentaires s'organisent.



### 1.2.3 Le plan de Camper



Le plan de Camper est formé par les tragus et par le point sous-nasal (figure 8). Il est utilisé en prothèse amovible complète pour réaliser et régler le bourrelet maxillaire. En dehors de cela il ne constitue pas de référence fiable car dans le plan frontal il y a souvent une asymétrie des méats acoustiques externes et dans le plan sagittal le plan de Camper correspond à une flexion cervicale [7].

Figure 8 – Position du plan de Camper par rapport au PAO. Légende : PAO= Plan Axio-Orbitaire ; AC= Axe Charnière ; PIO= Point Infra-Orbitaire ; TR = Tragus ; PSN = Point Sous-Nasal.

Crédit : J-D Orthlieb [2], retouches personnelles.

## 1.3 Positions de référence mandibulaires

### 1.3.1 Occlusion d'intercuspitation maximale (OIM ou ICM)

L'occlusion d'intercuspitation maximale (ICM) est une position de référence qui est définie comme la position d'occlusion où le rapport d'engrènement dentaire se caractérise par le maximum de contacts inter-arcades. Ce rapport est indépendant de la situation des condyles dans leur fosse respective [5]. L'ICM est la position utilisée en dentisterie lorsque les références dentaires sont fiables et que la reconstruction prothétique est de faible étendue. L'ICM est également appelée « occlusion d'intercuspité maximale (OIM) », « occlusion de convenance » ou « occlusion adaptative » [8].

### 1.3.2 Occlusion de relation centrée (RC)

L'occlusion de relation centrée (RC) est une position mandibulaire indépendante des dents. Elle est donc utilisée lorsque l'ICM n'est pas fiable ou en cas d'édentement total. Cette position a connu autant de définitions, parfois contradictoires, que d'auteurs la décrivant.

Un consensus a finalement été trouvé. La relation centrée est définie comme la situation condylienne physiologique la plus haute et la plus antérieure de contact articulaire condylo-disco-temporale favorisant la rotation pure des condyles selon un axe charnière.

Le Collège national d'occlusodontologie a proposé une définition « exhaustive » pour expliquer le concept actuel : « La relation centrée est la situation condylienne de référence la plus haute, réalisant une coaptation bilatérale condylo-disco-temporale, simultanée et transversalement stabilisée, suggérée et obtenue par contrôle non forcé, répétitive dans un temps donné et pour une posture corporelle donnée et enregistrable à partir d'un mouvement de rotation mandibulaire sans contact dentaire » [5].

## **1.4 Cinématique mandibulaire**

L'ATM est la seule articulation dite suspendue du corps humain. Elle est liée à son homonyme par l'arc mandibulaire, de sorte que tout mouvement d'une des articulations a une influence sur l'autre. La cinématique mandibulaire est le résultat d'une combinaison de mouvements simultanément dans les trois plans de l'espace (frontal, sagittal et horizontal). Une telle complexité demande de décomposer la dynamique mandibulaire en association de mouvements simples dans le but de les rendre reproductibles par les articulateurs.

### **1.4.1 Mouvements élémentaires**

Les mouvements élémentaires sont directement liés aux caractéristiques anatomiques de l'ATM citées précédemment.

#### **1.4.1.1 La rotation**

La rotation se définit comme le mouvement d'un corps autour d'un point ou d'un axe fixe, chaque point de ce corps étant animé d'une même vitesse angulaire. Les ATM effectuent une rotation autour d'un axe horizontal transverse appelé axe bicondylien passant par les pôles médiaux des condyles. Cette rotation a lieu au niveau du compartiment inférieur dit condylo-discal de l'articulation. L'axe bicondylien est appelé axe charnière lorsque les condyles sont en relation centrée et le mouvement est qualifié de mouvement axial terminal [5].

#### **1.4.1.2 La translation**

La translation d'un objet correspond à son déplacement par « glissement » sans déformation et sans changement d'orientation dans l'espace (pas de rotation notamment). Cette translation est caractérisée par un vecteur qui en définit la direction, le sens et la distance. Le mouvement de translation à direction para-sagittale implique des structures ligamentaires qui permettent une sorte de luxation articulaire physiologique. La translation a lieu au niveau du compartiment supérieur appelé disco-temporal de l'articulation.



## 1.4.2 Mouvements fondamentaux

Les mouvements fondamentaux ont pour principal objectif de définir des positions mandibulaires reproductibles par les patients. Pour des raisons didactiques, ces mouvements sont décrits avec l'occlusion d'intercuspidation maximale comme point de départ (et/ou d'arrivée).

### 1.4.2.1 Mouvement d'ouverture/fermeture

Lors de l'ouverture (abaissement de la mandibule) se produit une avancée symétrique des deux condyles qui réalisent une rotation associée à une translation. En vue sagittale le complexe condylo-discal se déplace vers le bas et l'avant en suivant le relief du tubercule du temporal. Le point inter-incisif mandibulaire (dentalé) décrit une courbe à concavité postérieure. La fermeture (élévation de la mandibule) se fait physiologiquement à l'inverse de l'ouverture de manière symétrique.

### 1.4.2.2 Mouvement de propulsion

Le mouvement de propulsion est un déplacement postéro-antérieur de la mandibule depuis l'ICM jusqu'au bout à bout incisif. Lors de la propulsion les condyles mandibulaires avancent de manière symétrique en suivant les reliefs du tubercule temporal. La composante de rotation du condyle sous son disque est moins importante que lors de l'ouverture. Le dentalé se déplace sagittalement de manière rectiligne. Il se produit un désengrènement des dents postérieures sous la double influence de l'abaissement des condyles (la pente condylienne) et du guidage antérieur.

La **pente condylienne** est définie dans le plan sagittal par l'angle formé entre le plan de référence axio-orbitaire et la sécante au trajet condylien lors de la propulsion (Figure 9), depuis son point de départ en ICM jusqu'à son point d'arrivée en bout à bout incisif.

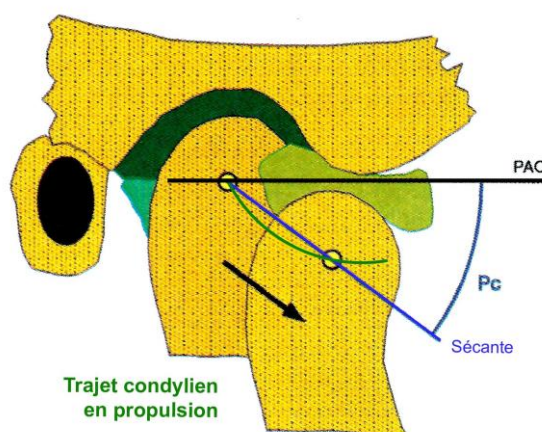


Figure 9 – Vue sagittale illustrant l'angle que forme la pente condylienne [2].  
PAO=Plan Axio-Orbitaire. Pc= Pente Condylienne.

### 1.4.2.3 Mouvement de diduction/latéralité

#### Déplacement condylien

Le mouvement de diduction, appelé communément latéralité, correspond au déplacement latéral, asymétrique et à composante horizontale, de la mandibule vers la droite ou vers la gauche. Le point de départ coïncide avec l'ICM. Le point d'arrivée correspond soit à la situation spatiale du bout à bout canin, appelée fonction canine, soit au bout à bout des cuspides vestibulaires des molaires et prémolaires, appelée fonction de groupe.

Lors de la diduction, les ATM droites et gauches réalisent des mouvements très différents. Le côté vers lequel la mandibule se déplace est appelé travaillant. Le côté opposé au déplacement mandibulaire est appelé non-travaillant. Par extension, les versants des cuspides qui conduisent le mouvement portent le nom de travaillants et les versants opposés sont appelés non-travaillants [9].

Le condyle travaillant ou condyle pivotant effectue globalement une rotation selon un axe vertical. En raison de l'anatomie du condyle et de la fosse mandibulaire propre à chaque individu le condyle ne peut réaliser une rotation stricte autour de son axe. Pour cette raison il effectue une translation centrifuge avant de réaliser sa rotation. Cette translation porte le nom de « mouvement de Bennett » (à ne pas confondre avec « l'angle de Bennett », défini plus loin).

Le condyle non-travaillant ou condyle orbitant se déplace globalement vers le bas, l'avant et le dedans en suivant, par disque interposé, l'inclinaison de l'éminence temporale. Le déplacement non travaillant peut se réaliser de manière progressive ou bien il peut y avoir un déplacement transversal centripète d'emblée suivi par un déplacement progressif du condyle.

Le mouvement progressif du condyle non travaillant permet de définir l'**angle de Bennett**. C'est l'angle qui est formé dans le plan horizontal entre le plan parasagittal (parallèle au plan sagittal médian) et la sécante au trajet du condyle non-travaillant entre son point de départ et son point d'arrivée.

La pente condylienne et l'angle de Bennett sont les deux paramètres essentiels lors de la programmation des articulateurs. L'angle de Bennett, pour sa part, est utile pour programmer et simuler le déplacement du condyle non travaillant sur les articulateurs.

### 1.4.2.4 Enveloppe limite des mouvements

L'enveloppe limite des mouvements est définie à partir de l'amplitude maximale des mouvements fondamentaux que permettent les structures anatomiques articulaires, dentaires et ligamentaires. Elle présente comme intérêt de définir un cadre général à l'intérieur duquel ont lieu les mouvements fonctionnels. De plus, elle permet de définir des positions mandibulaires reproductibles. Cette enveloppe limite de mouvements est schématisée par le diagramme de Posselt (figure 10) qui matérialise le déplacement du point inter incisif mandibulaire.

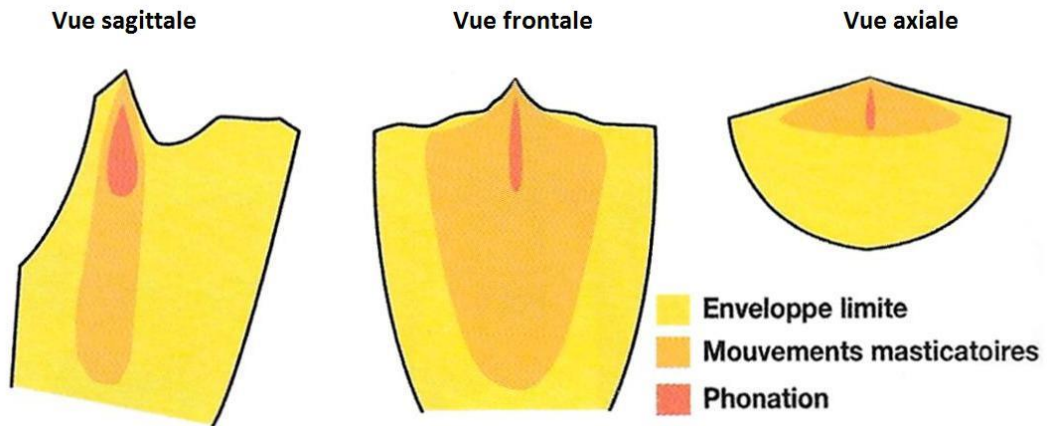


Figure 10 – Différence entre les enveloppes de mouvements limites et physiologiques [10].

### 1.4.3 Mouvements fonctionnels

Les mouvements fonctionnels ou physiologiques correspondent à ceux réalisés naturellement lors des fonctions de l'appareil manducateur c'est-à-dire le bâillement, la déglutition, la mastication et la phonation. Certains mouvements physiologiques se réalisent avec des contacts dento-dentaires comme la déglutition, alors que d'autres se réalisent sans, telle que la phonation.

#### Mastication

La mastication a longtemps été négligée dans l'étude de la cinématique mandibulaire. L'ajustage occlusal des reconstitutions réalisées en odontologie demande habituellement aux patients de réaliser des latéralités volontaires. Ces diductions sont des mouvements centrifuges différents de ceux de la fonction de mastication (figure 11).

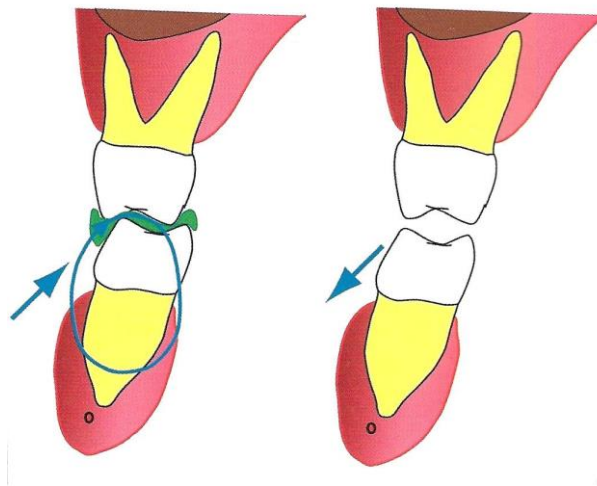


Figure 11 – Comparaison des trajets entre le mouvement de mastication à gauche et le mouvement de latéroclusion à droite [9].

L'analyse d'un cycle masticatoire typique chez un sujet sain repose sur les travaux de Lundeen et Gibbs [11]. Ils ont étudié les déplacements aux niveaux condylien, molaire et incisif à l'aide d'un système informatique dont les données sont ensuite exploitées par un dispositif mécanique appelé Gnathic Replicator.

Marcel Le Gall et Jean-François Lauret décrivent deux phases principales des activités musculaires lors du cycle de mastication [9]. Il est à noter que la phase dento-dentaire et les concepts qui s'y rapportent ne font actuellement pas consensus.

#### 1. Phase préparatoire à distance des dents :

Elle se réfère aux mouvements d'ouverture et de fermeture buccale qui ont lieu pendant la trituration du bol alimentaire.

#### 2. Phase dento-dentaire :

Elle intervient au cours des derniers cycles de mastication qui précèdent la déglutition. Cette phase est subdivisée en entrée dento-dentaire de cycle et en sortie dento-dentaire de cycle (Figure 12).

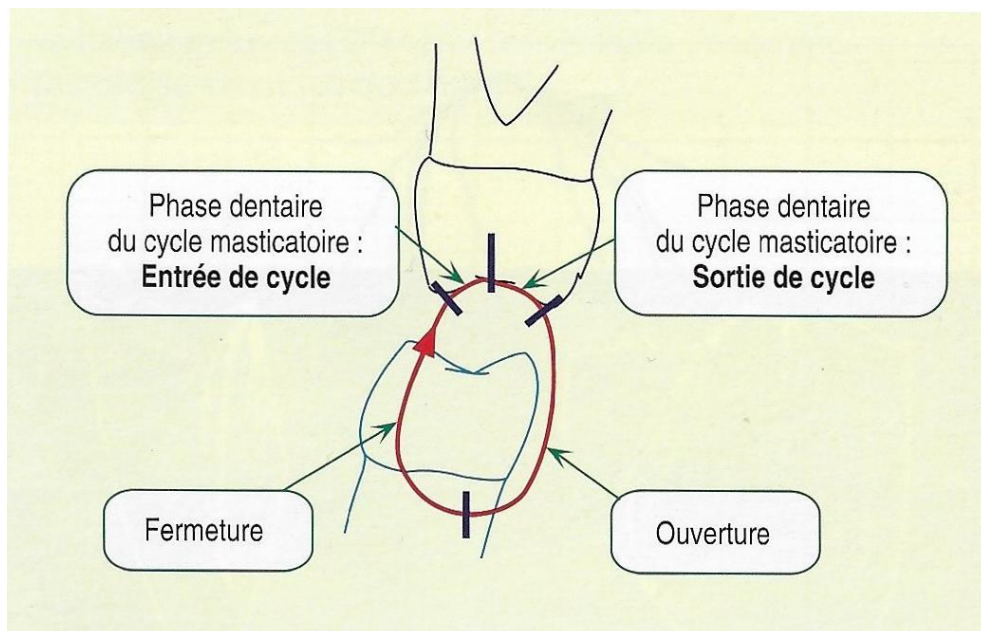


Figure 12 – Schéma explicatif des différentes phases lors de la mastication [9].

D'un point de vue théorique et en se fondant sur les principes occluso-prothétiques actuels, il ne serait pas nécessaire de simuler les mouvements fonctionnels puisque, d'une part, les enveloppes limites de mouvements suffisent à analyser l'occlusion et à réaliser des prothèses sans créer d'interférences (postérieures notamment). D'autre part, la mastication se produit sans contacts dento-dentaires directs mais par aliments interposés. Cette assertion n'est valable que lors des premiers instants qui suivent l'introduction des aliments dans la cavité buccale. Les récentes publications sur l'occlusion et la manducation font état d'appuis dentaires directs, différents des rapports cuspidés-fosses de l'ICM, lors des derniers cycles qui précèdent la déglutition [9].

Les mouvements de diduction habituels demandés aux patients lors de l'ajustage de prothèses (notamment fixes) passent sous silence la réalité de la phase dento-dentaire d'un cycle masticatoire. Selon Le Gall, il existe alors un risque élevé de laisser sur les faces occlusales des incoordinations du guidage soit par excès soit par minoration. Les articulateurs mécaniques sont pour la très grande majorité incapables de simuler les mouvements de mastication.

## 1.5 Analogie entre l'ATM et les articulateurs

Il est trivial de remarquer que les « boules condyliennes » des articulateurs ne sont qu'une approximation de l'anatomie particulière des condyles (figure 13). La conception des articulateurs physiques repose sur une approche mécanique des mouvements mandibulaires.

Les différents articulateurs possèdent des composants en commun :

- une branche inférieure ;
- une branche supérieure supportant les sphères condyliennes et les boîtiers condyliens. La position horizontale de cette branche s'apparente à l'orientation du plan de référence (cf. figure 6, partie 1.2.1). Les boîtiers condyliens (figure 14) des articulateurs semi-adaptables permettent de réaliser des mouvements selon des droites alors que les trajets réels correspondent à des courbes. Par exemple, lors d'un trajet de propulsion, la boule condylienne translate le long du mur supérieur du boîtier condylien de manière rectiligne.
- une tige incisive qui repose sur une table incisive. Cette tige est graduée, sa valeur 0 correspond à une position horizontale des deux branches.

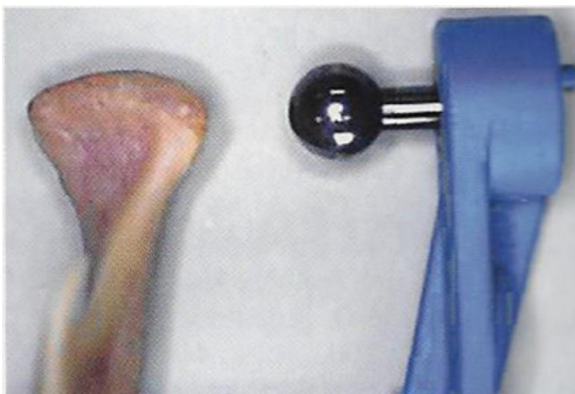


Figure 13 – Vue comparative d'un condyle anatomique et de la boule condylienne [8].



Figure 14 – Comparaison du boîtier condylien du Quick et de son équivalent anatomique [8].

Les concepts occlusaux actuels se concentrent donc davantage sur la reproduction des mouvements plutôt que sur la reproduction de l'anatomie condylienne. Cette logique se retrouve dans l'analyse du Professeur Dupas qui affirme que « ce qui compte du



point de vue mécanique c'est que le sommet de la sphère condylienne soit en contact avec le plafond réglable du boîtier condylien pour s'approcher le mieux possible du schéma dynamique du patient » [8].

Les déterminants de l'occlusion peuvent être définis par les facteurs de l'appareil masticateur qui influencent l'occlusion. On distingue deux types de déterminants : les facteurs fixes et les facteurs modifiables par le repositionnement ou le remodelage des dents.

Les déterminants fixes sont le positionnement antéro-postérieur des arcades par rapport aux déterminants postérieurs articulaires. Parmi les facteurs fixes il y a l'anatomie de l'ATM et la distance intercondylienne. Tous deux déterminent la cinématique mandibulaire ainsi que la relation maxillo-mandibulaire.

Les déterminants postérieurs articulaires sont constitués de :

- l'angle de la pente condylienne ;
- l'angle de Bennett ;
- et la distance du déplacement latéral immédiat.

Ces déterminants sont nécessaires pour la programmation des articulateurs.

Les facteurs modifiables sont la position et la forme des dents (hauteur et angles cuspidiens, profondeur des fosses et fossettes), la dimension verticale et les courbes occlusales.

Actuellement les articulateurs mécaniques (semi-adaptables) simulent convenablement les mouvements fondamentaux réalisés chez les patients. La reproduction de la cinématique mandibulaire réelle est réduite à une addition de valeurs angulaires schématisant, dans les plans de l'espace, les trajets des condyles mandibulaires.

## — Chapitre 2 —

# Les articulateurs virtuels

L'évolution constante de la CFAO dentaire élargit son domaine d'application dans la conception et la fabrication prothétique. La restauration des fonctions manducatrices nécessite impérativement une gestion de l'occlusion. Afin de faciliter l'intégration des prothèses au patient, il est nécessaire de simuler virtuellement l'occlusion.

Il existe trois types de CFAO qui sont fonction du type d'empreinte réalisée et de l'opérateur réalisant la conception et la fabrication assistée par ordinateur.

La **CFAO directe** correspond à la conception et la fabrication d'éléments prothétiques en une seule séance par le praticien, sans passer par le laboratoire de prothèse. L'empreinte optique des arcades se fait à l'aide d'un scanner intra-oral.

En **CFAO semi-directe**, l'empreinte optique réalisée par le praticien est envoyée via internet au laboratoire de prothèse. La conception assistée par ordinateur (CAO) et la fabrication (FAO) de la pièce prothétique s'effectuent au laboratoire.

En **CFAO indirecte**, le praticien réalise une empreinte physico-chimique classique et la transmet au laboratoire de prothèse. Cette empreinte sera soit numérisée directement, soit coulée en plâtre pour ensuite être numérisée. La CAO et la FAO sont effectuées par le prothésiste.

Dès 1983, l'équipe du Professeur François Duret s'est intéressée à la simulation des déplacements des arcades dentaires dans un environnement informatique avec l'*access articulator* [12]. Les articulateurs virtuels simulent numériquement via une interface utilisateur graphique la forme ainsi que les mouvements reproduits par les articulateurs mécaniques. Le développement des articulateurs virtuels vise à éliminer les imprécisions des articulateurs conventionnels. Kordaß et Gärtner soulignent qu'actuellement il y a plusieurs problèmes dans la reproduction de la dynamique biologique individuelle. Les principales limitations résident dans l'incapacité de reproduire :

- la complexité des mouvements condyliens lors de la fonction et la viscoélasticité du disque articulaire puisque les mouvements réalisés sur l'articulateur mécanique suivent les rebords des boîtiers condyliens ;

- la résilience desmodontale, impossible à simuler sur des modèles en plâtre montés sur articulateur ;
- les déformations et distorsions que subit la mandibule notamment lors de l'ouverture maximale.

De plus, les travaux de Tamaki et al. [13] ont démontré qu'un articulateur programmé à l'aide d'un axiographe numérique ne reproduit pas la totalité des contacts en propulsion et en latéralité. Les articulateurs mécaniques créent également de nouveaux contacts occlusaux [14].

Le tableau 1 présente les principales firmes proposant des articulateurs virtuels aux chirurgiens-dentistes et prothésistes dentaires.

Firmes	Logiciels de CAO intégrant l'articulateur virtuel	Types de CFAO	Types de scanner
Sirona	Cerec <sup>®</sup> Software 4.4	Directe	Scanner intra-oral : Bluecam / Omnicam
3Shape	Dental System <sup>™</sup>	Semi-directe et indirecte	Scanner intra-oral exemple : TRIOS <sup>®</sup> Color Scanner de laboratoire exemple : D850
Dental Wings	Dental Wings Open System	Semi-directe et indirecte	Scanner intra-oral : Dental Wings Scanner de laboratoire exemple : 7Series
Zirkonzahn	Zirkonzahn.Modellier	Indirecte	Scanner de laboratoire Exemple : S600 ARTI
Amann Girrbach	Ceramill <sup>®</sup> Artex	Indirecte	Scanner de laboratoire exemple : MP400
Dental Direkt	Dental Direkt Designer	Indirecte	Scanner de laboratoire exemple : Argus M2 HD

Tableau 1 – Récapitulatif des différents logiciels intégrant un articulateur virtuel.

Plusieurs méthodes de transfert des modèles sur articulateur virtuel sont possibles. Comme lors de l'utilisation d'articulateurs conventionnels, le transfert des modèles répond à certaines situations précises pour ne rechercher une grande précision que lorsque cela est nécessaire. Nous décrivons les articulateurs virtuels selon deux catégories, d'après Shivamurth [15] :

- les articulateurs mathématiques ;
- les articulateurs virtuels totalement adaptables.



## 2.1 Articulateurs mathématiques

La reproduction des mouvements des articulateurs physiques dans un environnement informatique a donné naissance aux articulateurs mathématiques [16, 17]. C'est-à-dire que la mécanique des articulateurs est simulée par des fonctions mathématiques dont la résultante est visible dans une interface graphique. Il existe actuellement trois méthodes pour le transfert du modèle maxillaire sur articulateur mathématique présentées dans les sections à suivre :

- utilisation d'une table de montage personnalisée ;
- utilisation d'une table de montage arbitraire ;
- double montage sur articulateur physique et articulateur virtuel.

### 2.1.1 Table de montage personnalisée

Ce type de transfert se retrouve dans les cas de CFAO directe.

#### 2.1.1.1 Généralités sur le Cerec<sup>®</sup>

Le Cerec<sup>®</sup> est un système de CFAO directe qui intègre tous les outils nécessaires à la conception de prothèses dentaires fixées (figure 15) : une unité d'acquisition qui héberge une caméra intra-buccale, un logiciel de CAO et un logiciel de commande numérique pour piloter une machine-outil.



Figure 15 – Vue d'ensemble du système

Cerec<sup>®</sup>. 1 : l'Omnacam.

2 : l'unité centrale d'acquisition intégrant le logiciel de CAO et de FAO. 3 : la machine-outil à commande numérique.

Crédit : Sirona.

L’empreinte optique est réalisée par l’Omniscan. Présenté en 2012, ce scanner intra-oral apporte un certain nombre d’évolutions. En effet, l’Omniscan permet la capture d’image en flux continu qui s’apparente à un effet vidéo. De plus, elle permet la prise d’empreinte numérique sans poudrage préalable des surfaces à numériser. Enfin, elle apporte pour la première fois en CFAO dentaire, la couleur aux empreintes numériques dentaires [18].

Le transfert du modèle maxillaire à l’aide d’une table de montage personnalisée a pour objectif d’intégrer au mieux la restauration dans le schéma occlusal du patient en évitant les interférences. Cette table est indiquée pour des édentements encastrés et/ou concernant une canine [19].

### 2.1.1.2 Etapes pour le montage sur articulateur

Le praticien réalise la numérisation intra-buccale de chaque arcade séparément. Puis il prend l’empreinte optique en vue vestibulaire des arcades placées en ICM. Dans un deuxième temps, l’Omniscan permet d’enregistrer les reliefs palatins des incisives maxillaires lors du scannage des rapports inter-arcades en ICM. On obtient une mise en occlusion statique des modèles en 3D.

Le positionnement et l’orientation des arcades par rapport au PAO se fait directement par le logiciel après renseignement du genre du patient et de sa distance intercondylienne (figure 16).

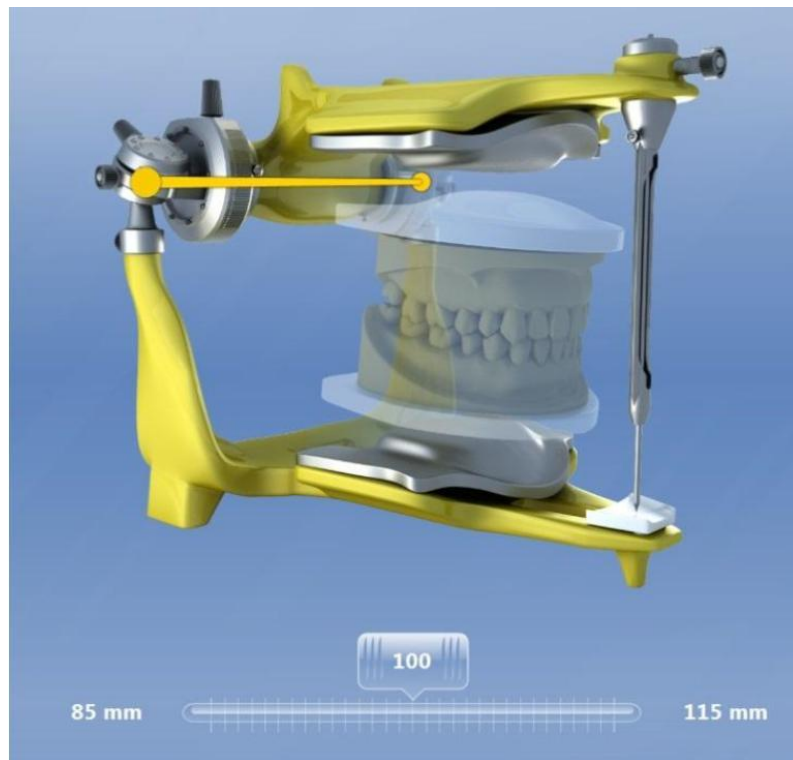


Figure 16 – Réglage de la distance intercondylienne dans le logiciel Cerec<sup>®</sup>. Crédit : Sirona.

Pour déterminer la distance intercondylienne il faut avoir recours :

- soit à l'arc facial, la valeur étant très approximative puisqu'elle est en rapport avec l'écartement des embouts auriculaires ;
- soit à l'axiographie, la valeur obtenue étant plutôt la distance inter-plage qu'une distance intercondylienne.

Il est important à partir de la barre d'outils de « Définir l'axe du modèle » (figure 17). Cette étape permet de définir le plan d'occlusion des arcades avant leur transfert sur l'articulateur virtuel. Elle a également une incidence sur le calcul et l'axe d'insertion de la reconstitution prothétique par le logiciel.

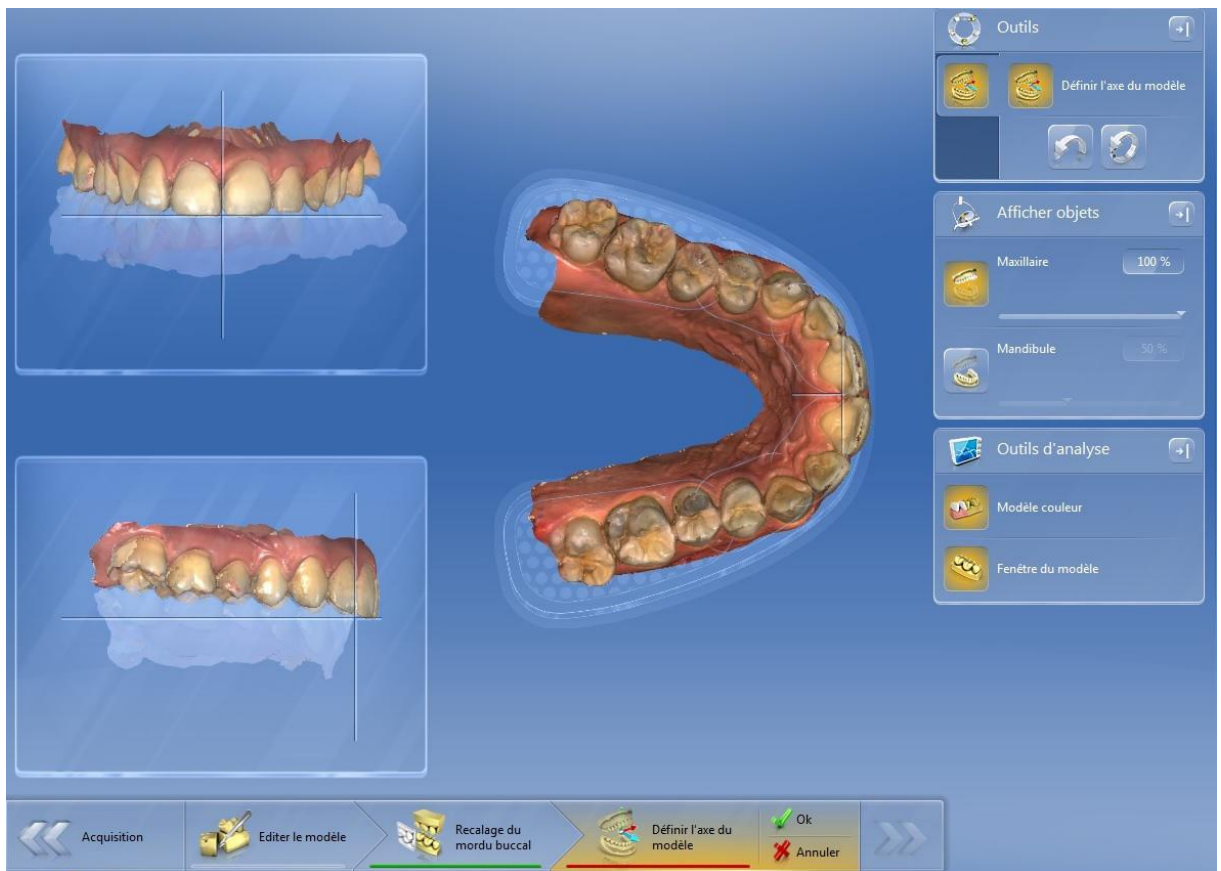


Figure 17 – Fenêtre permettant d'orienter les modèles virtuels.  
Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du Docteur Cordelette.

L'enveloppe limite des mouvements est définie à partir d'une série de calculs issus de moyennes faisant également intervenir le sexe et la distance intercondylienne du patient. Le logiciel établit ainsi un Chemin Généré par la Fonction (CGF) ou FGP en anglais pour *Functionally Generated Path*. Enfin, il est possible de « régler » les déterminants postérieurs, pour obtenir des CGF différents, en modulant différents paramètres que sont la hauteur du triangle de Bonwill et l'angle de Balkwill (définis dans la section suivante).

### 2.1.1.3 Paramètres de l'articulateur virtuel du Cerec® 4.2

L'articulateur virtuel du Cerec® 4.2 se programme à l'aide de 5 paramètres : le bras, la base, l'angle de Balkwill, la valeur Sagittal, et l'angle de Bennett. Ils sont regroupés dans la section « Paramètres d'articulation » (figure 18).



Figure 18 – Fenêtre "Paramètres d'articulation" du logiciel Cerec® 4.2.  
La modification des différents paramètres permet de programmer l'articulateur virtuel.  
Crédit : Sirona.

Les trois premiers paramètres font référence au triangle de Bonwill (figure 19). C'est un triangle virtuel ayant pour sommet les deux condyles mandibulaires (pôles latéraux) et le point inter-incisif mandibulaire [5]. Les côtés de ce triangle équilatéral mesurent 4 pouces soit 101,6 millimètres selon Bonwill.

Le « **bras** » correspond aux côtés du triangle de Bonwill. C'est la distance entre le condyle (son pôle latéral) et le point inter-incisif mandibulaire. Elle permet un positionnement antéropostérieur des arcades par rapport à la référence articulaire.

La « **base** » (du triangle de Bonwill) correspond à la distance intercondylienne.

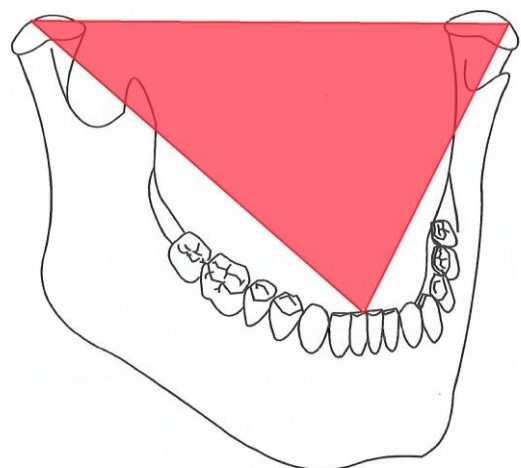


Figure 19 – Schéma représentant le triangle de Bonwill. Crédit : image personnelle.

Le paramètre appelé « **sagittal** » définit l'angle de la pente condylienne.

L'**angle de Balkwill** (figure 20) est l'angle formé entre le plan d'occlusion et le triangle de Bonwill. Il autorise le positionnement des modèles par rapport aux déterminants postérieurs articulaires.

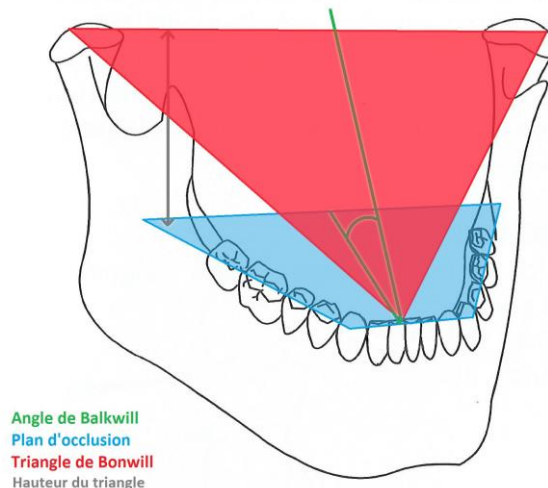


Figure 20 – Schéma explicatif de l'angle de Balkwill. Crédit : image personnelle.

Enfin la dernière valeur réglable est l'**angle de Bennett**.

L'angle de Balkwill, le bras et la distance intercondylienne se mesurent à l'aide de l'arc facial après report sur l'articulateur semi-adaptable.

Pour leur part, la pente condylienne et l'angle de Bennett sont déterminés à partir de l'axiographie.

Une fois l'articulateur virtuel programmé, le logiciel est capable de simuler la cinématique mandibulaire selon les mouvements de bordure. Les différents contacts dento-dentaires qui en résultent sont alors visibles à l'aide de l'outil « compas occlusal » selon un code couleur (figure 22).

Ce code couleur permet de régler les contacts occlusaux lors des différentes excursions mandibulaires pour la confection de prothèses fixées. L'articulateur virtuel peut être programmé arbitrairement, il représente alors une moyenne de l'enveloppe limite des mouvements.

#### 2.1.1.4 Paramètres de l'articulateur virtuel du Cerec<sup>®</sup> 4.4

Depuis la mise à jour 4.3.1 du Cerec<sup>®</sup> Software, Sirona a étoffé la configuration de l'articulateur virtuel [20]. Nous décrivons la version 4.4 du Cerec<sup>®</sup>, dernière version en date. Il est dorénavant possible de renseigner un ensemble de 6 paramètres dont le lexique est plus explicite (figure 21) : le bras, la base, l'angle de Balkwill, l'angle sagittal à droite et à gauche, l'angle de Bennett droit et gauche et le « Bennett » (déplacement latéral immédiat) à droite et à gauche.





Figure 21 – Paramètres d'articulation du Cerec<sup>®</sup> 4.4.  
Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du Docteur Cordelette.

Avec la mise à jour 4.4, le « compas occlusal » bénéficie d'une terminologie beaucoup plus claire et actuelle (figure 22).

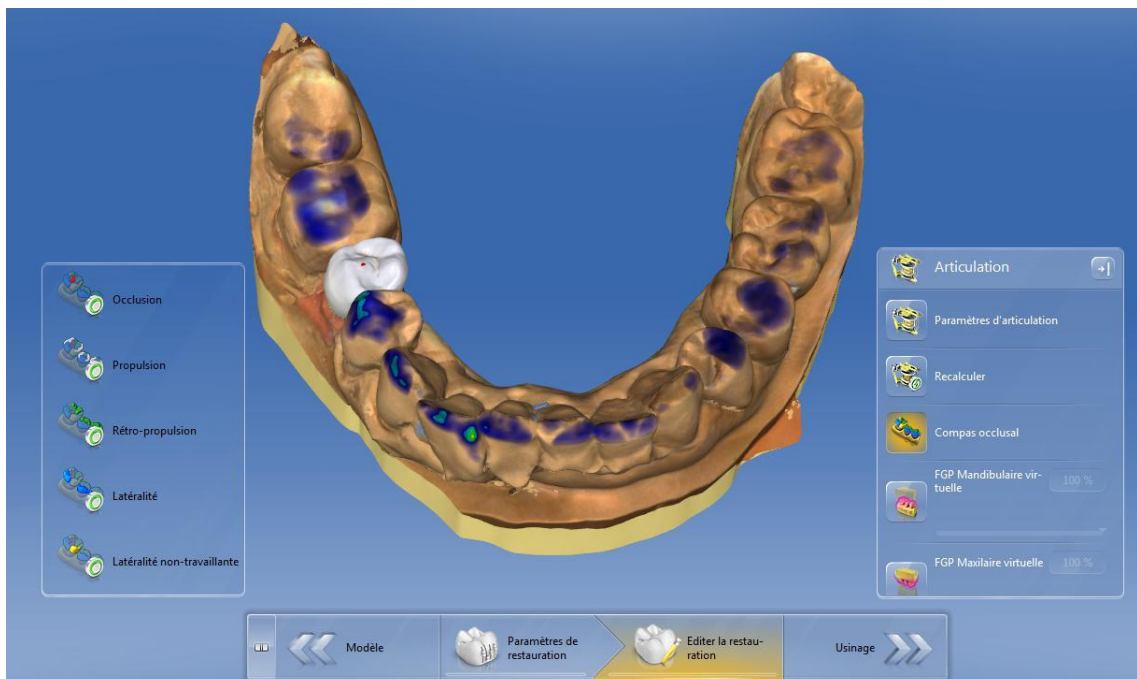


Figure 22 – Fenêtre du compas occlusal du logiciel Cerec<sup>®</sup> 4.4.  
Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du Docteur Cordelette.

En rouge sont visualisés les contacts dentaires en occlusion statique ou ICM.

En marron : les contacts en propulsion.

En vert : les contacts dentaires en rétropulsion.

En bleu : les contacts lors des mouvements mandibulaires centrifuges du côté travaillant.

En jaune : les contacts lors d'une latéralité non-travaillante.

Les contacts peuvent désormais être visualisés soit en manipulant manuellement les modèles virtuels soit en lançant une « animation de l'articulation » (figure 23).

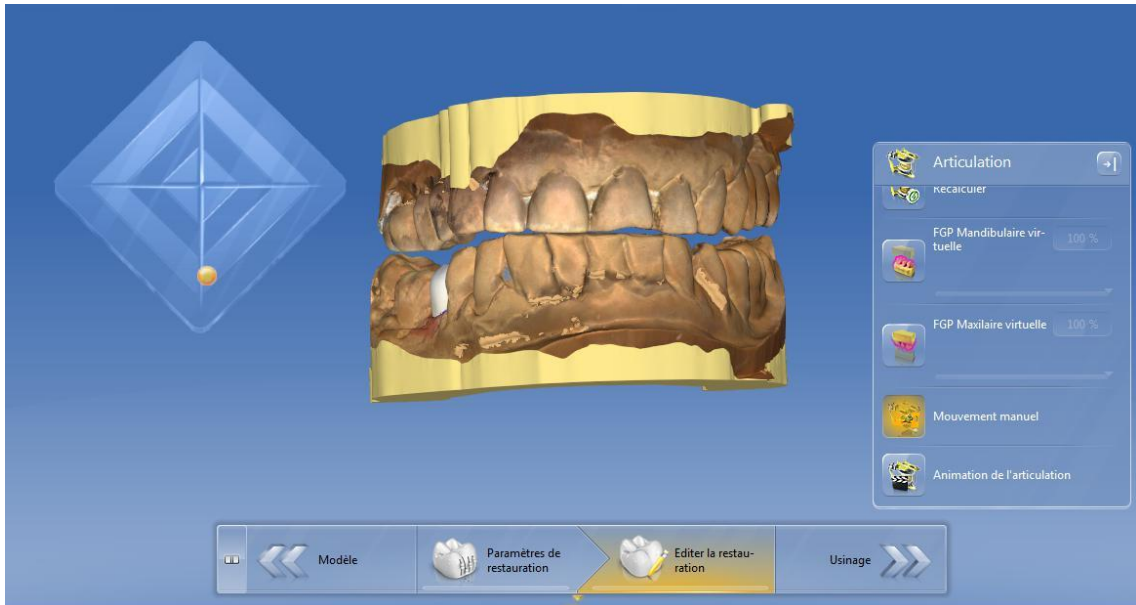


Figure 23 – Fenêtre d'animation de l'articulation du Cerec® 4.4. Ici, les modèles sont en proclusion. Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du Docteur Cordelette.

Le positionnement et l'orientation des arcades dentaires par rapport à l'axe charnière est géré automatiquement par le logiciel à partir de l'angle de Balkwill et de la hauteur du triangle de Bonwill. Il n'est pas nécessaire d'avoir recours à l'arc facial et l'articulateur mécanique pour positionner les arcades dentaires si les guidages dentaires sont suffisants et le plan d'occlusion présent.

Par contre, si le praticien désire programmer l'ensemble des paramètres de l'articulateur virtuel du Cerec®, il est obligatoire d'utiliser l'arc facial et l'axiographe. Le praticien perd alors le gain de temps apporté par l'automatisation de la table de montage personnalisée.

Les différents réglages autorisés sur l'articulateur virtuel du Cerec® 4.4 semblent le positionner au même niveau que les articulateurs semi-adaptables de seconde génération. Cependant il faut suffisamment de références dentaires sur l'arcade (du patient et numérisée) pour le calcul géométrique nécessaire à la programmation. Le Professeur Mehl [21], un des concepteurs du Cerec®, insiste sur le fait que ce dispositif n'est pas adapté aux restaurations de grandes étendues. En cas d'absence de guidage antérieur ou de changement de dimension verticale d'occlusion, il faudra procéder à des étapes de validation clinique.

### 2.1.2 Table de montage arbitraire

L'utilisation d'une table de montage arbitraire est indiquée lorsque le plan d'occlusion est présent et que les guidages dentaires sont efficaces. Ce type de transfert est réalisable en CFAO semi-directe ou indirecte.

Dans le logiciel de CAO, l'articulateur virtuel apparaît comme un avatar, c'est-à-dire une réplique numérique, de l'articulateur mécanique. C'est par exemple le cas dans le logiciel Dental System™ de 3Shape.

Dans le cadre de la CFAO indirecte, la numérisation des modèles en plâtre dans les scanners de laboratoire est réalisée dans un ordre précis [22] :

- 1- Numérisation du modèle supportant la dent ou les dents préparées ;
- 2- Numérisation de l'antagoniste ;
- 3- Numérisation des modèles en occlusion. Il peut s'agir des modèles en ICM maintenus par un élastique ou de modèles mis en charnière (arcades partielles ou arcades complètes également maintenues par un élastique) ;
- 4- À l'étape suivante, le logiciel demande d'aligner les modèles numérisés en occlusion à leur équivalent numérisé individuellement afin d'obtenir les données surfaciques des modèles. L'alignement consiste à sélectionner trois points sur les modèles en occlusion et leurs équivalents sur les modèles issus des étapes 1 et 2. Le logiciel positionne alors les modèles virtuels en occlusion ;
- 5- Numérisation des modèles positifs unitaires (« dies ») les uns après les autres pour une plus grande précision dans la détermination de la limite cervicale de préparation.

Une fois toutes les données acquises par numérisation, les modèles sont montés arbitrairement sur l'articulateur virtuel (figure 24).

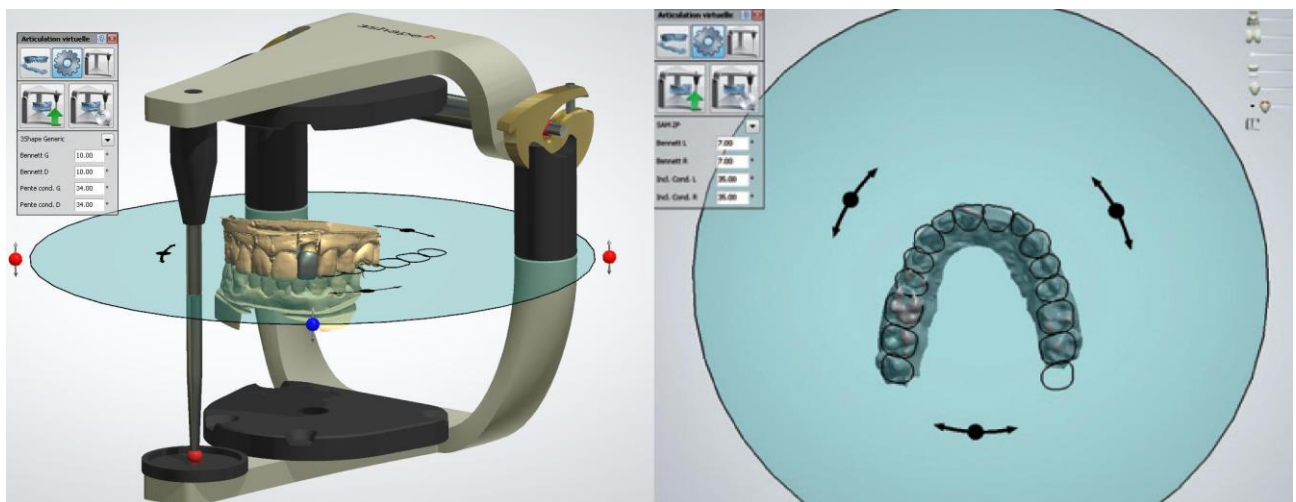


Figure 24 – Articulateur virtuel du Dental System™ avec sa table de montage (en bleu). Le positionnement du modèle maxillaire se fait sur le repère de la table. Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du laboratoire Maillard.



Ainsi, le positionnement du modèle maxillaire et du plan d'occlusion se fait à partir d'une valeur moyenne (10 degrés par rapport au plan de Francfort) ce qui en fait un équivalent virtuel de la table de montage de certains articulateurs mécaniques.

Les boîtiers condyliens virtuels sont réglables mais il est inutile de rentrer les informations du déterminant postérieur si aucun transfert avec arc facial n'a été entrepris.

L'essor de la CFAO a poussé de nombreux fabricants à proposer leur flux de travail. Globalement, le principe de numérisation des modèles en plâtre, de mise en occlusion virtuelle et de montage arbitraire est le même que celui de Dental System™ de 3Shape. Les principales différences se situent au niveau des scanners de laboratoire (figure 25) (nombre de caméras d'acquisition, présence d'un berceau rotatif pour les modèles etc.) et des logiciels de CAO/FAO propres à chaque marque.

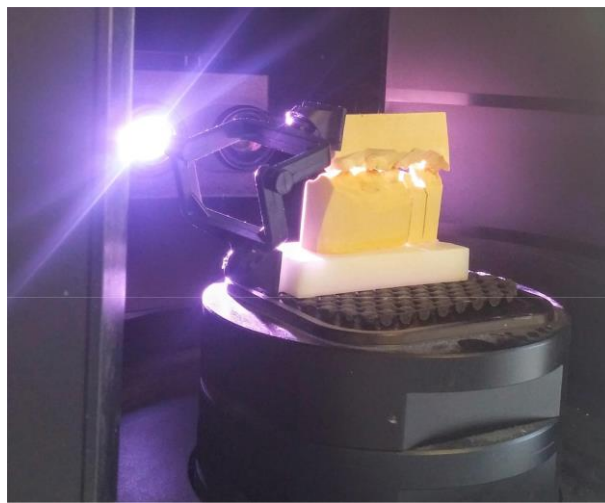


Figure 25 – Numérisation des modèles montés en occlusion dans le scanner Argus M2 HD de Dental Direkt. Crédit : Photographie personnelle.

### 2.1.3 Double montage sur articulateur physique et articulateur virtuel

Le transfert d'un montage réel sur articulateur en un montage virtuel est indiqué lorsque le plan d'occlusion est à reconstruire et que les guidages dentaires sont absents. Il est alors nécessaire de faire appel aux techniques classiques de transfert des moulages en plâtre sur articulateur mécanique avant son transfert sur le logiciel de CAO contenant l'articulateur virtuel. La logique du double montage impose la CFAO indirecte.

Il existe deux méthodes pour le double montage en fonction du scanner et du logiciel de CAO employés :

- double montage avec numérisation de l'articulateur ;
- double montage avec utilisation d'un dispositif de transfert.

### 2.1.3.1 Double montage avec numérisation de l'articulateur

#### 2.1.3.1.1 Prérequis

Les logiciels de CAO disposent d'une bibliothèque d'articulateurs ou « arthrothèque » dans laquelle il faut choisir le type d'articulateur à utiliser (figure 26).

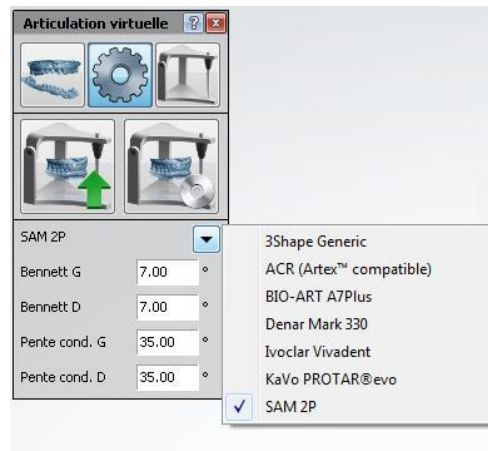


Figure 26 – Fenêtre « Articulation virtuelle » détaillant la bibliothèque d'articulateurs disponibles (Dental System™).

Crédit : capture d'écran réalisée avec l'amabilité du laboratoire Maillard.

Pour ajouter un nouvel articulateur physique dans l'arthrothèque chaque logiciel possède un protocole particulier de calibration qui consiste à placer l'articulateur avec des plaquettes d'étalonnage dans un scanner optique de laboratoire [23] (figure 27).



Figure 27 – L'articulateur SAM® et son avatar virtuel obtenu après numérisation dans le scanner optique D850. Crédit : 3Shape.

#### 2.1.3.1.2 Résumé du protocole

Le praticien prend des empreintes conventionnelles des arcades qui sont ensuite coulées afin d'obtenir des moulages. Ces moulages sont scannés séparément puis en occlusion. Le praticien peut interposer des cires ou des bases d'occlusion utilisée pour enregistrer un rapport intermaxillaire stable. Enfin, l'ensemble formé de l'articulateur physique et des moulages montés sur celui-ci, est numérisé (figure 28).



Figure 28 – A gauche : vue d'ensemble du scanner optique S600 ARTI de la firme Zirkonzahn. A droite : l'articulateur SAM<sup>®</sup> placé dans le scanner. Crédit : Zirkonzahn.

### 2.1.3.1.3 Illustration d'un protocole de double montage

La firme Zirkonzahn propose un protocole de double montage pour de la CFAO indirecte dont nous détaillons les différentes étapes. Pour cela, elle a développé en collaboration avec le prothésiste Udo Plaster le PlaneSystem<sup>®</sup>, un système de transfert des modèles sur articulateur (figure 29).



Figure 29 – Vue d'ensemble du flux de travail du Planesystem<sup>®</sup>.  
A gauche le PlaneFinder<sup>®</sup> avec un modèle maxillaire positionné.  
Au centre l'articulateur physique PS1.  
A droite l'articulateur virtuel.  
La ligne verte horizontale correspond au plan de référence du PlaneFinder<sup>®</sup>. Crédit : Zirkonzahn.

Le PlaneSystem<sup>®</sup> se compose :

- du PlaneFinder<sup>®</sup>, c'est un équivalent d'arc facial qui utilise comme référence le plan de Camper appelé par le fabricant « ailes du nez-tragus ». Le positionnement du patient pour l'enregistrement de l'inclinaison de l'arcade maxillaire repose sur la reproduction de la position naturelle de la tête (*Natural Head Position, NHP*) (figure 30) ;



Figure 30 – Patient positionné grâce au PlaneFinder<sup>®</sup>. La ligne verte supérieure matérialise la ligne ailes du nez-tragus. La ligne inférieure matérialise la position du plan d'occlusion maxillaire. Crédit : Zirkozahn.

- du PlanePositioner<sup>®</sup>, une table de montage permettant le montage du modèle en plâtre maxillaire selon l'angle identifié à l'aide du PlaneFinder<sup>®</sup> (figure 31) ;



- de l'articulateur PS1 physique et virtuel. Après montage des modèles en plâtre sur l'articulateur PS1 physique le tout est scanné et transmis à l'articulateur virtuel du logiciel ;

Figure 31 – A gauche la table de montage PlanePositioner<sup>®</sup>. A droite l'articulateur PS1 physique avec la table de montage. Crédit : Zirkozahn.

- du logiciel PlaneSystem<sup>®</sup> Software-Tool, pour le positionnement virtuel et tridimensionnel du modèle de la mâchoire supérieure dans le logiciel de modélisation Zirkozahn.Modellier.

Le PlaneFinder<sup>®</sup> permet de positionner le patient selon la position naturelle de la tête (NHP). Dans son étude longitudinale de 5 ans, Cooke [24] a démontré que la position naturelle de la tête d'un patient ne varie que de 1 à 2 degrés, lorsqu'en position orthostatique, face à un miroir, il se regarde dans les yeux. Les 15 années d'études de Peng et Cooke [25] confirment la reproductibilité de l'obtention de la position naturelle de la tête. Celle-ci est liée à un cadre de référence indépendant du patient permettant de reproduire les variations d'orientation spécifiques des structures anatomiques crânio-faciales.

Il y a deux situations possibles pour le transfert du modèle maxillaire sur l'articulateur :

– Soit le maxillaire du patient est denté, dans ce cas à l'aide d'une plaque d'enregistrement (Bite Tray) fixée au PlaneFinder<sup>®</sup>, on positionne les incisives sur la plaque et la situation est enregistrée avec un matériau d'empreinte. Le modèle en plâtre maxillaire est monté en articulateur, sa position est définie par le matériau d'occlusion reposant sur le PlanePositioner<sup>®</sup> (réglé sur 0°).

– Soit le maxillaire est édenté et deux cas de figure peuvent se présenter :

Si le patient possède déjà une prothèse complète la position du maxillaire est enregistrée selon la même procédure que pour le patient denté, et ce, que le plan d'occlusion de la prothèse corresponde ou non au plan naturel.

Si le patient n'a pas de prothèse, il faut alors procéder aux mesures de certains paramètres pour correctement enregistrer l'orientation du plan d'occlusion. Dans un premier temps, il faut positionner la ligne interlabiale à l'aide d'un papillomètre. Celui-ci est glissé derrière la lèvre supérieure au repos, jusqu'à ce que le rebord horizontal du papillomètre appuie sur la crête édentée et repose sur la papille rétro-incisive (figure 32).

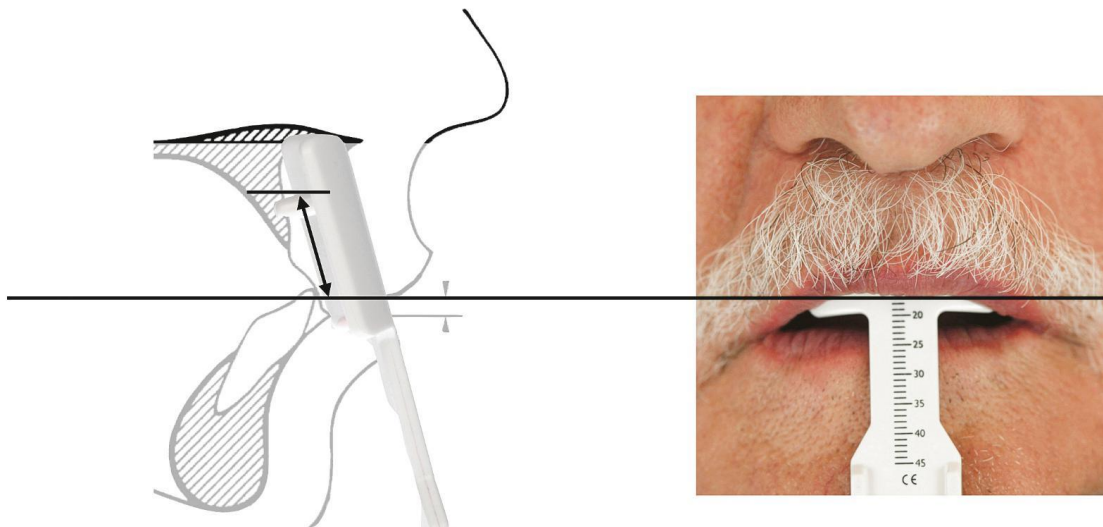


Figure 32 – Illustration schématique et clinique du positionnement du papillomètre.  
Crédit : Zirkonzahn.

On note alors la valeur millimétrée du papillomètre. Cette valeur va servir à confectionner une fourchette d'enregistrement de l'occlusion personnalisée à partir de Bite Trays et de cales de différentes hauteurs. Une fois que la hauteur réalisée avec les cales correspond à la mesure réalisée avec le papillomètre le dispositif complet est monté dans le PlaneFinder<sup>®</sup> à hauteur du patient.

Le patient peut alors se positionner au niveau du PlaneFinder<sup>®</sup> en faisant reposer la crête édentée sur la cale. La position du maxillaire est enregistrée à l'aide d'un maté-



riau d'enregistrement de l'occlusion (tel qu'un silicone de grade A). Une fois le matériau durci, la fourchette est mise de côté pour terminer les étapes du transfert de l'arcade maxillaire sur articulateur.

Il faut désormais déterminer l'angle entre le plan d'occlusion du maxillaire et le plan de référence appelé « plan neutre ». Le patient se positionne une nouvelle fois face au PlaneFinder<sup>®</sup>, des repères sont marqués en regard du bord inférieur de l'aile du nez et au niveau du tragus, des deux côtés du visage. Deux plans d'orientation réglables sont montés sur le PlaneFinder<sup>®</sup> et alignés en fonction des repères marqués sur le visage (figure 33). Ainsi, l'angle entre la ligne aile du nez-tragus (supposée parallèle au plan d'occlusion) et le plan neutre est mesuré à droite comme à gauche. Les mesures à enregistrer sur le patient sont terminées.



Figure 33 – Illustration schématique et clinique du positionnement du papillomètre.  
Crédit : Zirkonzahn.

Grâce à l'enregistrement du plan d'occlusion et aux mesures angulaires réalisées avec le PlaneFinder<sup>®</sup> le modèle maxillaire en plâtre peut être transféré sur l'articulateur PS1 selon les plans transversal et sagittal.

Pour le positionnement dans le plan vertical chez le sujet édenté il est nécessaire de définir l'axe médian du squelette et le centre de mastication.

L'axe médian du squelette est repéré grâce à la suture palatine qui est alors tracée sur le modèle en plâtre. Le repérage du centre de mastication sur le maxillaire édenté repose sur une distance empirique de 24 millimètres définie à partir de plus d'un millier de mesures réalisées sur des maxillaires.

Le centre de mastication est donc tracé à 24 millimètres de la tubérosité le long de l'axe médian du squelette. Cette distance est également reportée sur le bord du modèle maxillaire afin de rester visible lors de l'étape suivante. Le modèle en plâtre est placé dans la clé d'enregistrement de l'occlusion puis posé sur la plaque transparente du PlanePositioner<sup>®</sup> en faisant coïncider le système d'axe avec les deux repères tracés précédemment (figures 34 et 35). L'ensemble est alors positionné dans l'articulateur pour y monter le modèle maxillaire.

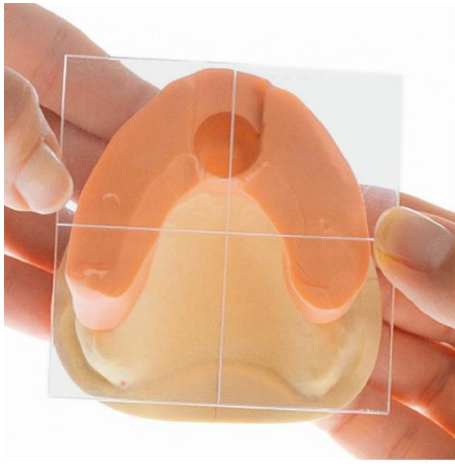


Figure 34 – Positionnement du modèle maxillaire selon l'axe médian du squelette et le centre de mastication. Crédit : Zirkozahn.

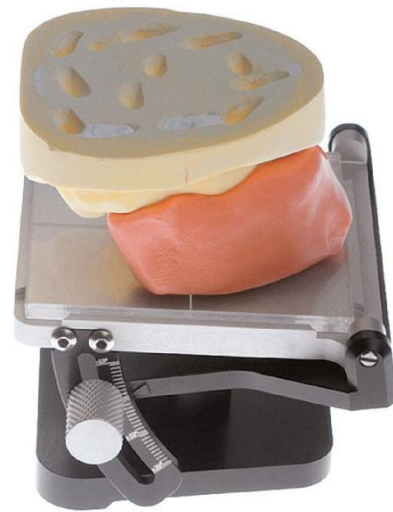


Figure 35 – Modèle maxillaire en place sur le PlanePositioner<sup>®</sup>. Crédit : Zirkozahn.

Une fois le modèle maxillaire fixé avec du plâtre à la branche supérieure de l'articulateur, on reporte grâce à un pied à coulisse la mesure obtenue à l'aide du papillomètre. On définit la distance entre la papille rétro-incisive et le PlanePositioner<sup>®</sup> (le plan d'occlusion qui servira au montage des dents). On reporte ensuite des deux côtés du PlanePositioner<sup>®</sup> les angles précédemment enregistrés grâce au PlaneFinder<sup>®</sup> (Figure 36).

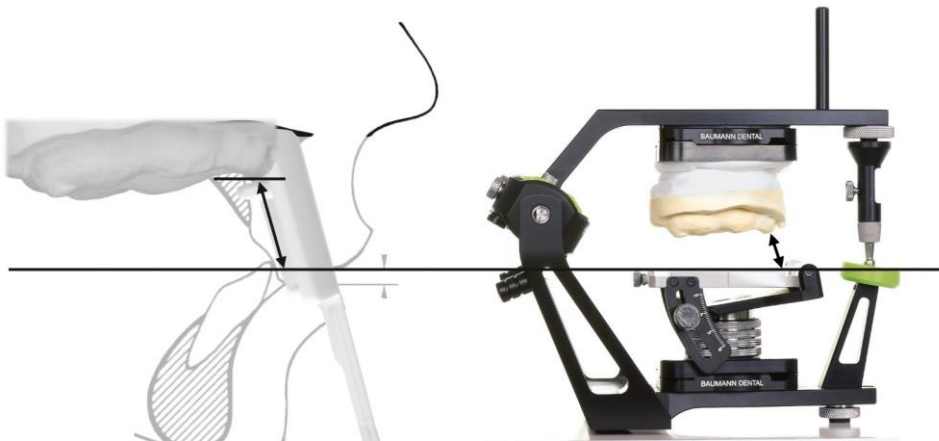


Figure 36 – Schématisation du report de la distance entre la crête osseuse et la ligne interlabiale sur l'articulateur PS1. Crédit : Zirkozahn.

L'ensemble articulateur, modèle maxillaire et PlanePositioner<sup>®</sup> est placé dans le scanner S600 ARTI pour que toutes les informations soient transmises à l'articulateur virtuel de l'outil de CFAO PlaneTool PS1-3D. Le montage numérique des dents de la future prothèse maxillaire peut commencer selon le plan d'occlusion enregistré cliniquement et transféré grâce au PlanePositioner<sup>®</sup>.

#### 2.1.3.1.4 Gestion de l'esthétique des reconstitutions dans l'articulateur virtuel

Zirkonzahn propose un scanner 3D pour la numérisation photoréaliste du visage des patients appelé Face Hunter [26]. Selon le fabricant, 0,3 secondes suffisent à numériser le visage. Cette représentation virtuelle peut donc être superposée à l'articulateur virtuel lors de la conception assistée par ordinateur de prothèse (figure 37). Les données de la physionomie du patient permettent d'ajuster le positionnement des modèles en articulateur mais aussi de transmettre des données essentielles au prothésiste afin de gérer l'esthétique de restaurations antérieures. Le Face Hunter est également un outil de communication avec le patient pour lui donner une idée plus concrète du résultat esthétique des reconstitutions finales.

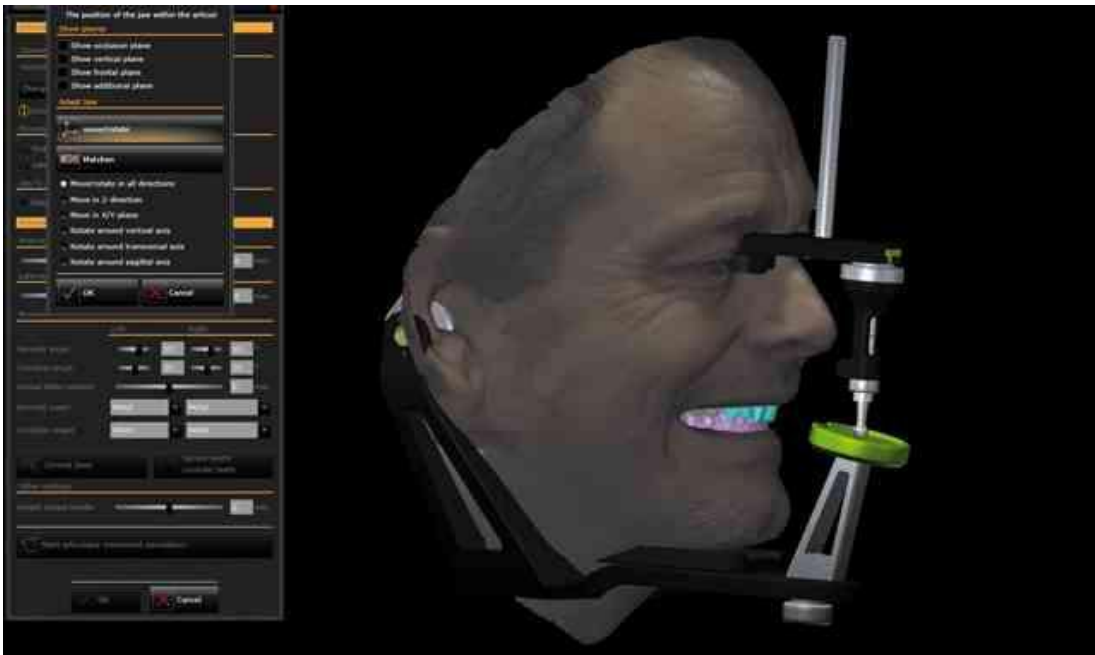


Figure 37 – Superposition du visage du patient, scanné à l'aide du Face Hunter, et de l'articulateur virtuel PS1. Crédit : Zirkonzahn.

#### 2.1.3.2 Double montage avec dispositif de transfert

La firme Amann Girrbach a développé un kit de transfert calibré pour la numérisation du montage sur articulateur.

Le praticien réalise des empreintes conventionnelles des arcades du patient afin d'obtenir des modèles en plâtre. Ceux-ci sont montés sur articulateur mécanique à l'aide d'un arc facial. Au laboratoire de prothèse, chaque modèle est scanné individuellement puis les deux moulages ensemble avec leurs socles fixés sur un dispositif de transfert calibré propre à l'articulateur virtuel utilisé (figure 38).

Le réglage des boîtiers condyliens virtuels est possible. Comme pour les méthodes précédentes de montage, la programmation de l'articulateur virtuel avec les valeurs du déterminant postérieur implique le recours à l'axiographie. Toutefois, il est tout de même envisageable de réaliser une programmation arbitraire telle que celle expliquée par le Professeur Dupas pour les articulateurs mécaniques [8].



Le double montage avec dispositif de transfert a pour avantage d'éviter au praticien de devoir envoyer l'ensemble de l'articulateur au laboratoire de prothèse.



Figure 38 – Vue d'ensemble de la chaîne de numérisation des modèles en plâtre grâce à un dispositif de transfert. Crédit : Amann Girrbach.

## 2.2 Articulateurs virtuels totalement adaptables

Les articulateurs virtuels totalement adaptables supposent un enregistrement et une reproduction des mouvements « réels » de la mandibule du patient. On retrouve dès 1984 ce concept d'enregistrement direct des mouvements de la bouche à l'aide d'un capteur opto-électronique [27]. Dans cette optique sont apparus de nombreux systèmes électroniques permettant l'enregistrement des mouvements et des trajets exacts de la mandibule. C'est notamment le cas du Jaw Motion Analysis (JMA, présenté dans la section 2.2.2). L'animation des arcades virtuelles selon les mouvements réels de la mandibule du patient aboutissent au concept d'articulateur totalement adaptable. C'est ainsi qu'est né l'articulateur virtuel DentCAM. Le logiciel Sicat Function™ améliore ce concept en associant les données électroniques du JMA aux données anatomiques issues d'un cone beam.

### 2.2.1 Articulateur DentCAM

Des empreintes conventionnelles des arcades maxillaire et mandibulaire sont prises puis coulées en plâtre. Ces modèles sont ensuite numérisés à l'aide d'un scanner laser tridimensionnel tel que le Laser Scan 3D de Willytec. Ce scanner projette sur la surface des modèles un faisceau laser dont le faisceau réfléchi est reçu par le capteur CCD d'une caméra numérique. Le signal électrique analogique en sortie de capteur est envoyé à un processeur et les données d'image ainsi traitées sont stockées sous forme d'une matrice de valeurs de luminosité. À la fin de la numérisation, les modèles des arcades dentaires sont dès lors visualisables sur le logiciel de scannage et peuvent être manipulées par informatique.

La programmation des mouvements réalisables sur l'articulateur virtuel DentCAM peut se faire de deux façons :

- soit en enregistrant de manière personnalisée les excursions mandibulaires. Ceci est rendu possible avec l'utilisation d'un dispositif d'analyse des mouvements mandibulaires tels que le Jaw Motion Analysis (JMA) de Zebris.
- soit en rentrant les déterminants de l'occlusion directement dans le logiciel. Il autorise la programmation de la pente condylienne, de l'angle de Bennett, de la distance d'ouverture buccale maximale et du déplacement latéral immédiat.

Le logiciel de l'articulateur virtuel DentCAM propose trois fenêtres principales montrant le même schéma de mouvement sous différents aspects :

La **fenêtre d'interprétation** : elle permet la visualisation de l'occlusion dynamique durant la fonction sous différents points de vue. Le numérique permet des angles de vue impossible mécaniquement telle qu'une vue occlusale des contacts dento-dentaires lors de la mastication.

La **fenêtre d'occlusion** : elle met en évidence les points de contacts inter-arcades en fonction de la chronologie des mouvements mandibulaires.

La **fenêtre de coupes** : elle offre plusieurs coupes frontales des arcades dentaires. Il est possible d'étudier l'intensité, la hauteur cuspidienne et les angles cuspidiens.

La dernière version du logiciel intègre un module d'orthodontie afin de réaliser des planifications (setups) virtuelles. Cette version ajoute aussi la représentation des trajectoires condyliennes dans le plan sagittal et horizontal.

## 2.2.2 Jaw Motion Analysis

L'axiographie est une analyse instrumentale de la cinématique condylienne. C'est une technique diagnostique non invasive et simple permettant également la programmation des articulateurs. Les systèmes mécaniques Quick-Axis, SAM<sup>®</sup> et SAM<sup>®</sup> 2 profitent d'un recul clinique et servent de référence pour l'examen fonctionnel de l'ATM. Ils existent en versions informatiques dites assistées par ordinateur permettant de visualiser les tracés condyliens sur interface graphique mais sont incapables d'enregistrer les mouvements fonctionnels de l'appareil manducateur.

### 2.2.2.1 Présentation et fonctionnement

Le système Jaw Motion Analysis (JMA) est un appareil de capture des mouvements mandibulaires [28] par ultrasons qui permet de réaliser les mêmes tracés qu'un axiographie et propose en plus d'enregistrer l'enveloppe limite des mouvements.

Il se compose (figure 39) :

- de trois émetteurs d’ultrasons situés au niveau labial sur un arc inférieur. Cet arc est relié par contacts magnétiques à une fourchette propriétaire agrégée à l’arcade dentaire mandibulaire ;
- et d’un système de quatre récepteurs sous forme d’arc facial fixé au niveau du visage du patient à l’aide d’un appui nasal et d’une lanière à appui pariétal.



Figure 39 – Le Jaw Motion Analysis positionné sur un patient. Crédit : Zebris.

Le JMA se fonde sur la mesure de la durée de parcours d’ultrasons entre émetteurs et récepteurs. L’émission « pulsée » des ultrasons est contrôlée à partir d’un ordinateur. Les coordonnées spatiales des deux points condyliens et d’un point infra-orbitaire sont définis à l’aide d’un palpeur ou stylet pour définir le plan de référence axio-orbitaire. La durée de parcours des ondes entre les émetteurs et chacun des récepteurs est alors déterminée. Enfin, ces durées sont converties en valeurs de distances définissant la position relative de l’arc inférieur par rapport à l’arc facial. Le JMA suit la position dans l’espace de trois points formant un plan triangulaire (figure 40).

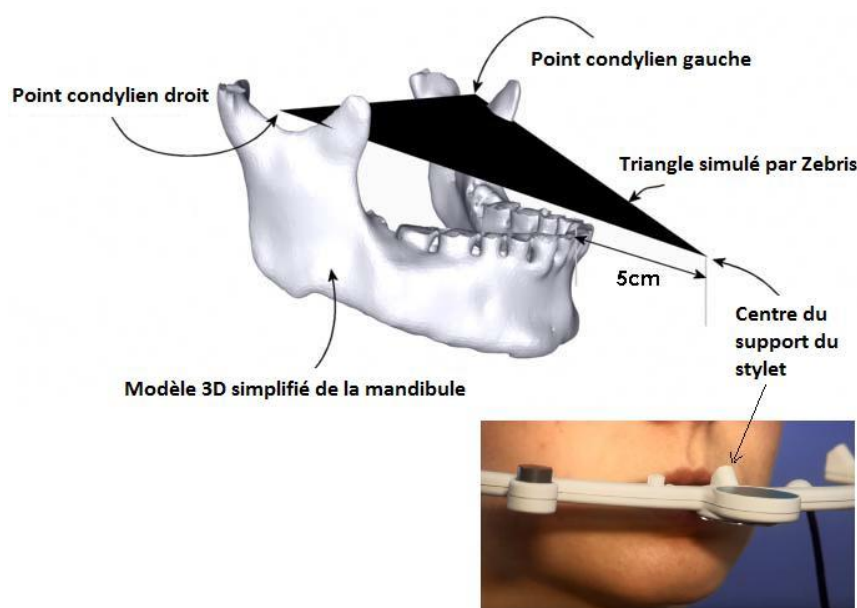


Figure 40 – Alignement du modèle tridimensionnel de la mandibule avec les données du JMA [28].

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

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

### 2.2.2.2 Etude de la précision du JMA

Une équipe de chercheurs allemands a analysé la précision de ce dispositif et du logiciel associé WinJaw (version 1.23). L'utilisation d'ondes ultrasonores introduit des imprécisions de mesure liées au bruit généré par l'air : toute perturbation du milieu a des répercussions sur les ondes qui s'y propagent. Ainsi, la respiration du patient a une influence sur la précision du dispositif. Ce bruit a donc été mesuré avant de procéder aux séries de mesure [29].

L'arc inférieur du JMA a été monté sur une table micromètre. Dans le plan transversal, sagittal et vertical, sont réalisés successivement, millimètre par millimètre, des mouvements de translation sur la table micromètre. L'amplitude des mouvements varie respectivement de -10 à +10 mm, de -5 à +15 mm et de -5 à +15 mm. Les distances parcourues grâce à la table sont comparées aux mesures rapportées par le logiciel WinJaw corrigées du bruit. L'écart maximal observé est très faible (0,166 mm) Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant (figure 41).

translative movements in ..	range	Differences of length (mean deviations)
.. transversal direction	-10 to +10 mm	104 $\mu\text{m}$ $\pm$ 14 $\mu\text{m}$
.. sagittal direction	-5 to +15 mm	129 $\mu\text{m}$ $\pm$ 9 $\mu\text{m}$
.. vertical direction	-5 to +15 mm	166 $\mu\text{m}$ $\pm$ 13 $\mu\text{m}$

Figure 41 – Différences de mesure constatées entre la table micromètre et le logiciel WinJaw pour des translations dans les trois plans de l'espace [29].

L'étude conclut que le JMA est un système dont la précision est adaptée à l'enregistrement de mouvements amples tels que l'enveloppe limite des mouvements [29]. En effet l'erreur moyenne constatée semble indépendante de l'amplitude des mouvements réalisés. Un algorithme de compensation logicielle du niveau de bruit mesuré ainsi qu'une prise en compte des conditions de l'environnement d'enregistrement (température de la pièce et conditions de ventilation) permettraient d'obtenir une très grande précision lors de l'enregistrement de mouvements mandibulaires de faible amplitude.

En 2015, un consortium d'auteurs allemands a établi un protocole standardisé d'analyse d'enregistrements informatiques des mouvements condyliens [30]. Conformément à ce protocole, des systèmes informatiques tels que le JMA, l'ARCUSdigma, l'Axioquick Recorder ou encore le Gamma Cadiax sont jugés appropriés pour l'analyse des trajets condyliens.

### 2.2.3 Sicat Function

Les articulateurs virtuels présentés jusqu'ici dans cette thèse ne sont utilisés que comme aide à la conception de prothèses ; il existe néanmoins un ensemble logiciel qui se destine à être un outil de diagnostic. Avec l'avènement du CBCT (*Cone Beam Computed Tomography*) la marque Sicat, filiale de Sirona, propose une solution pour enregistrer de manière précise et individualisée la trajectoire condylienne.

Avec le Sicat Function™ les données de la cinématique condylienne sont enregistrées avec un système d'ultrasons appelé JMT+ (Jaw Motion Tracker), similaire au JMA de Zebris. L'analyse des mouvements mandibulaires se veut plus individuelle car elle aboutit à l'élaboration d'un modèle 3D des structures osseuses de la mandibule et de l'ATM du patient. De plus, le logiciel permet de superposer les empreintes numériques des arcades dentaires à la reconstruction 3D issue du cone beam. Ce système permet de répondre au problème de localisation du centre de rotation condylien, élément opératoire dépendant lors d'une analyse axiographique. La localisation de l'axe charnière est ici « réel » car défini par la tomodynamométrie (figure 42).

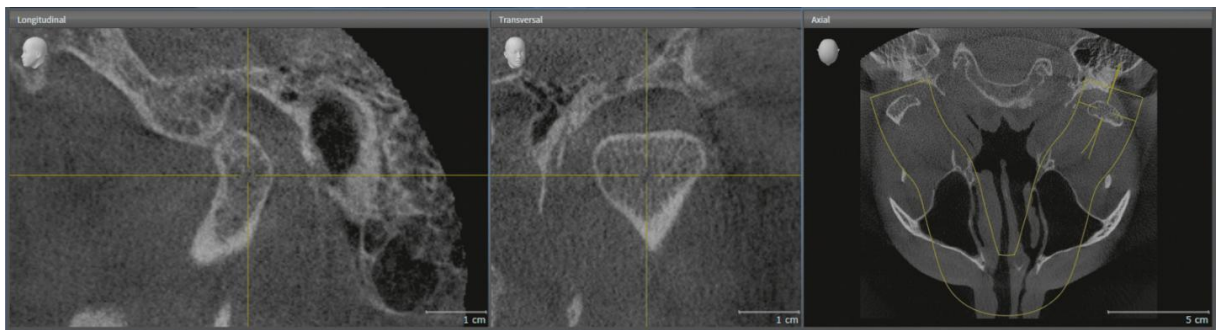


Figure 42 – Fenêtre du logiciel Sicat Function™ permettant de sélectionner le centre condylien dans les trois plans de l'espace [31].

Le logiciel est alors capable de tracer la trajectoire exacte du centre du condyle. De plus, il est possible d'étudier la cinématique de points définis arbitrairement sur le condyle. Cette dernière possibilité permet d'illustrer combien les tracés des « trajets condyliens » changent lorsque d'autres points mobiles sont pris en référence plutôt que les centres des condyles (figure 43).

Les indications de Sicat Function™ sont encadrées par les réglementations et directives liées à l'utilisation du Cone Beam. Comme d'autres techniques d'imagerie, le CBCT complète l'examen clinique ce qui explique que le Sicat Function™ n'est indiqué qu'en seconde intention pour le diagnostic et le traitement des dysfonctions de l'appareil manducateur [31].



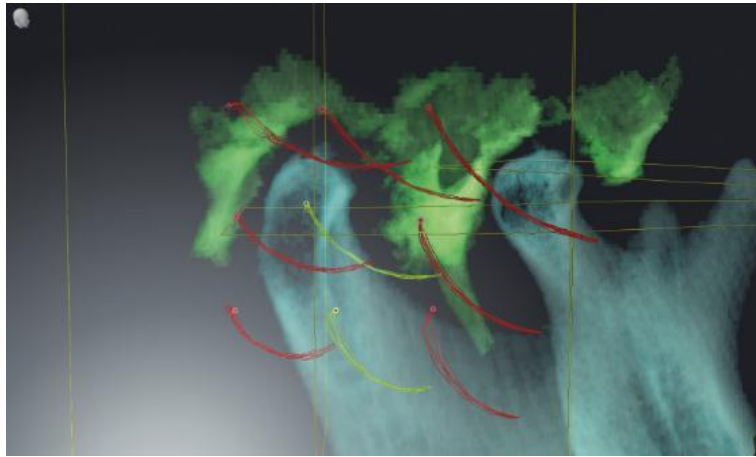


Figure 43 – Capture d'écran du logiciel Sicat Function™ présentant la superposition d'une grille de points à la périphérie du condyle.

*Les lignes rouges n'ont aucun lien avec le condyle anatomique [31].*

## 2.3 Avantages

Les avantages des articulateurs virtuels sont multiples. Rapides à manipuler, ils offrent un confort et un gain de temps au praticien et au prothésiste dentaire tout en assurant une bonne précision dans la détection des contacts occlusaux (cf. section 3.1).

L'utilisation des articulateurs virtuels ne remet pas en cause les concepts occlusaux ni les principes de l'étude occlusale. Dans les situations où leur recours peut être nécessaire, la dématérialisation et le déploiement croissant de l'informatique au sein des cabinets dentaires devrait en permettre l'introduction.

Les articulateurs virtuels bénéficient des avantages propres à l'empreinte optique. La prise d'empreinte est plus confortable pour le patient. Elle permet d'éviter ou de réduire les éventuels réflexes nauséeux ainsi que le temps de prise des matériaux. Par ailleurs, le risque de déformation des matériaux d'empreinte est écarté. La visualisation du résultat de l'empreinte est immédiate et autorise soit une modification de la préparation, soit un rebasage de l'empreinte. Le rebasage est impossible avec une empreinte conventionnelle, toute erreur d'empreinte nécessite de la recommencer totalement.

Les rapports dento-dentaires numérisés sont transmis directement au laboratoire de prothèse par connexion internet sécurisée. Cela procure un gain de temps non négligeable.

Les articulateurs virtuels permettent l'élimination des potentiels problèmes et erreurs inhérents aux articulateurs mécaniques [32] : le temps nécessaire pour le montage des deux modèles en articulateur (manipulation et temps de prise du plâtre), le nettoyage de l'articulateur après manipulation et les erreurs de repositionnement du modèle mandibulaire sur le modèle maxillaire via le matériau d'enregistrement inter-occlusal. D'ailleurs, en scannant les rapports inter-arcades directement en bouche, les articula-

teurs virtuels s'affranchissent des variations dimensionnelles, des imprécisions et du coût des matériaux d'enregistrement.

Les restaurations réalisées sur articulateur virtuel permettent de profiter de la précision ainsi que de l'adaptation des travaux issus de la CFAO [33]. De plus, les modèles virtuels étant inaltérables, leur montage sur articulateur est conservé de manière illimitée.

Les articulateurs virtuels sont plus ergonomiques [19] à utiliser que leurs homologues mécaniques. Lors de l'élaboration des restaurations prothétiques, la visualisation en temps réel des contacts occlusaux est possible et permet d'éviter les imprécisions liées à l'interposition et la manipulation de papier carbone coloré que ce soit au laboratoire ou lors de l'ajustage des prothèses en bouche. Selon Le [34], « il est prouvé scientifiquement que les marques imprimées sur les faces occlusales ne peuvent pas représenter la force, relative ou absolue, exercée sur les couronnes dentaires naturelles ou prothétiques ».

De plus en plus de laboratoires de prothèses investissent dans des solutions de CFAO et commencent à manipuler les articulateurs virtuels. Leur utilisation parallèle par les chirurgiens-dentistes permettrait l'obtention de prothèses mieux adaptées avec de moins en moins de retouches en bouche nécessaires.

## 2.4 Inconvénients

Les principaux freins à l'adoption des articulateurs virtuels peuvent résider dans :

- le coût du logiciel (et ses éventuelles mises à jour) ;
- la nécessité d'une formation, le temps d'apprentissage et d'adaptation au logiciel qui peuvent être chronophages. L'utilisation des articulateurs virtuels implique en effet la compréhension des technologies de CAO et FAO mais aussi l'acquisition des compétences et des aptitudes nécessaires à l'interprétation des données enregistrées par les scanners et les capteurs ;
- la prise d'arc facial et le montage sur articulateur physique est toujours nécessaire dans le cadre de reconstitutions de grande étendue. Dans ce cas, la chaîne numérique garante de la précision est rompue (voir partie 2.1.3.1) et la CFAO ne profite qu'au prothésiste.

La balance avantages / inconvénients penche néanmoins en faveur d'une adoption des articulateurs virtuels.

## — Chapitre 3 —

# Récents développements et perspectives

La précision de la chaîne numérique, en particulier du premier maillon que représente l’empreinte optique, a largement été étudiée dans la littérature scientifique [35, 36]. La précision de l’occlusion virtuelle repose-t-elle sur des preuves scientifiques ? Afin d’y répondre nous détaillons deux études en rapport avec la précision des contacts occlusaux déterminés par informatique : l’étude princeps de DeLong publiée en 2002 et la dernière étude sur le sujet de Solaberrieta parue en 2016.

Dans un second temps, nous évoquerons les récents travaux de recherche qui visent à améliorer la planification des restaurations de grande étendue dans l’environnement informatique.

### 3.1 Précision des contacts occlusaux virtuels

#### 3.1.1 Etude d’adéquation des contacts occlusaux virtuels et conventionnels en ICM par DeLong

Dans son étude, DeLong [37] compare les contacts occlusaux obtenus à partir de deux méthodes :

- les contacts virtuels calculés à partir d’images tridimensionnelles de modèles en plâtre et d’enregistrements occlusaux ;
- les contacts occlusaux obtenus de manière conventionnelle après mise en articulateur des modèles en plâtre. Les contacts ainsi matérialisés servent de référence pour la comparaison.

Pour cela, les modèles en plâtre de 10 couples d’arcades complètes d’adultes ont été montés sur un articulateur semi-adaptable Denar<sup>®</sup>. Les contacts occlusaux ont été visualisés par interposition de papier à articuler rouge 25 microns.

Le « profil virtuel dentaire » est réalisé par numérisation des modèles en plâtre et de l’enregistrement occlusal dans un scanner optique Comet 100. L’enregistrement occlusal résulte de l’interposition d’un silicone entre les faces occlusales des modèles montés sur articulateur en ICM.



Cet enregistrement occlusal a ensuite été numérisé 2 fois dans le scanner optique :

- une fois, appliqué sur le modèle mandibulaire. Dans ce cas seules les indentations maxillaires ont été numérisées ;
- l'autre fois de manière isolée. Dans ce cas les deux faces indentées, maxillaire et mandibulaire, ont été scannées.

Les contacts virtuels sont calculés de quatre manières différentes (figure 44).

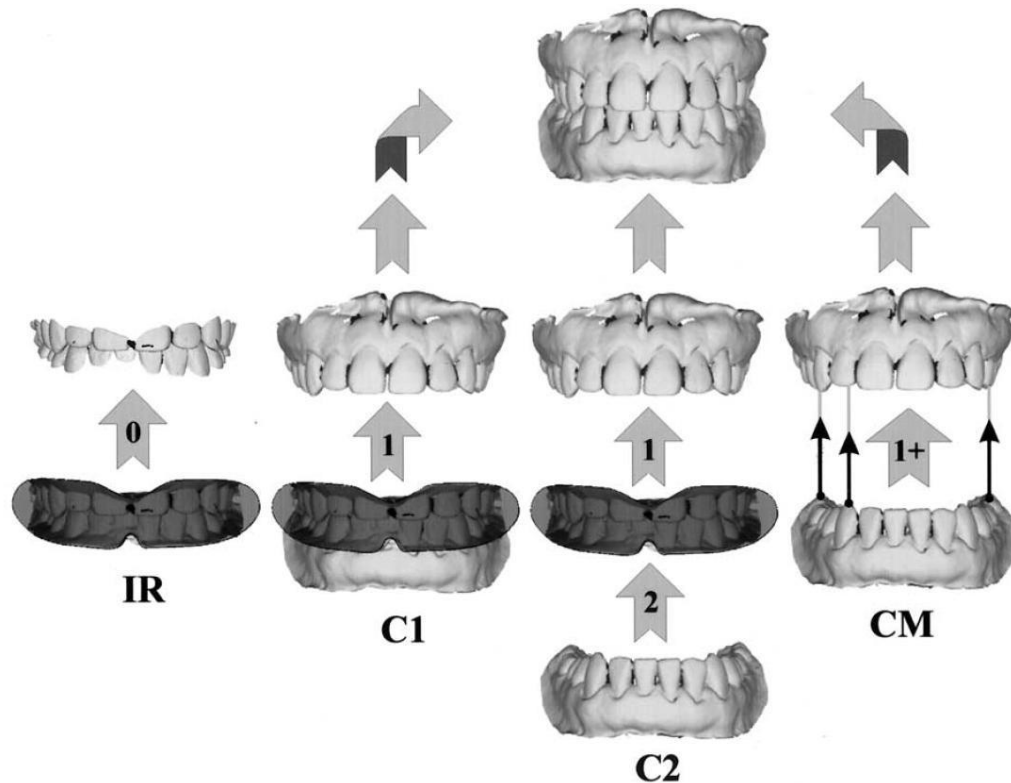


Figure 44 – Méthodes d'alignement des surfaces virtuelles [37].

La méthode IR calcule les contacts virtuels directement à partir de l'enregistrement occlusal, sans faire appel aux modèles virtuels des arcades dentaires.

La méthode C1 permet d'aligner le modèle maxillaire au modèle mandibulaire coiffé de l'enregistrement occlusal. Mathématiquement cet alignement est effectué à partir d'une matrice de transformation. Elle permet l'indentement des pointes cuspidiennes maxillaires dans l'enregistrement occlusal.

La méthode C2 reprend le procédé de la méthode C1 puis réalise l'indentement des cuspidés mandibulaires dans l'enregistrement occlusal.

La méthode CM utilise un alignement manuel des modèles virtuels à partir d'un algorithme de correspondance de trois points sachant que trois points non alignés définissent la position d'un corps rigide. Le logiciel calcule la matrice de transformation

qui optimise l'alignement de deux groupes de trois points aboutissant à l'alignement du maxillaire et de la mandibule. Le choix des points a été réalisé sur chaque modèle virtuel en adéquation avec les contacts occlusaux visualisés par le papier à articuler.

DeLong conclut que des contacts occlusaux obtenus par alignement des modèles virtuels sont en adéquation avec ceux visualisés sur articulateur physique (cf. Annexe A). De plus, la méthode la plus fiable pour obtenir des contacts virtuels repose sur l'alignement des modèles virtuels à l'aide d'un enregistrement occlusal (C2).

### 3.1.2 Etude comparative des enregistrements occlusaux virtuels et conventionnels par Solaberrieta

Ces premiers résultats sur la précision de l'occlusion virtuelle sont étayés par une étude de Solaberrieta [38] une dizaine d'années plus tard. L'étude teste la validité des contacts occlusaux obtenus virtuellement.

La méthodologie employée est similaire de l'étude de DeLong avec toutefois une différence : les six séries de mesure ont été réalisées en ICM mais sans interposition de matériau d'enregistrement occlusal. Cela permet d'éviter tout changement dans la position relative du maxillaire avec la mandibule. La méthode de gestion de l'occlusion virtuelle profite de l'évolution des logiciels de rétro-ingénierie (ingénierie inverse ou *Reverse engineering*). L'étude analyse la capacité des 3 logiciels (Rapidform 3, Geomagic Studio et Gom Inspect) à reproduire les contacts marqués par du papier à articuler sur des modèles en plâtre montés sur articulateur (PCH de la firme Panadent).

La comparaison s'effectue à partir de photographies des contacts occlusaux des modèles physiques superposées à des captures d'écrans des contacts déterminés informatiquement par les logiciels. La mise en occlusion des modèles virtuels se fait à l'aide d'un algorithme informatique appelé « meilleur alignement » (*best fit*). Globalement, les contacts occlusaux sont correctement identifiés par les logiciels (voir tableau 58 de l'annexe B).

Les différents logiciels ont également été comparés par paire. Les logiciels Rapidform et GOM donnent les résultats les plus proches (voir tableau 59 de l'annexe B).

L'étude de Solaberrieta démontre que la détermination des contacts virtuels par l'algorithme *best fit* est valide et par ailleurs plus précise que la méthode d'alignement manuelle utilisée par DeLong.

Les conclusions énoncées dans les deux études précédentes valident la fidélité de la gestion informatique de l'occlusion statique. Néanmoins, les contacts calculés virtuellement font appel à des logiciels différents de ceux des systèmes de CFAO disponibles sur le marché. Par ailleurs, la comparaison des contacts s'établit entre les contacts virtuels et les contacts de modèles en plâtre placés sur articulateur. C'est pour ces raisons, que nous avons avec l'aimable participation du Docteur Max Cordelette, cherché à visualiser l'analogie qu'il pouvait exister entre les contacts occlusaux virtuels calculés par le logiciel Cerec<sup>®</sup> 4.4 et les contacts visualisés cliniquement à l'aide de papier d'occlusion (figure 45).

Sans aucune prétention scientifique nous remarquons que les contacts sont semblables mais pas identiques, notons tout de même la finesse de reproduction du contact sur 42.



Figure 45 – Comparaison des contacts occlusaux en intercuspitation maximale entre le modèle virtuel (en haut) et cliniquement (en bas).

*Crédit : photographie réalisée avec la courtoisie du Docteur Cordelette.*

## 3.2 Transfert direct sur articulateur virtuel

Les techniques actuelles de transfert de modèles sur articulateur virtuel présentent comme inconvénient majeur de rompre la chaîne numérique. Pourquoi chercher à scanner des modèles déjà montés sur un articulateur programmé et ne pas réaliser les travaux prothétiques directement dessus ? La réponse est liée au fait que les articulateurs virtuels ne sont pour le moment utilisés qu'au laboratoire de prothèse dans des environnements de CFAO, les cliniciens ne profitent donc pas des bénéfices de la dématérialisation des articulateurs (cf. Avantages 2.3).

### 3.2.1 Prototype d'arc facial virtuel de Solaberrieta

#### 3.2.1.1 Présentation

C'est pour pallier ces défauts que Solaberrieta et al. proposent depuis 2013 un protocole de transfert direct des arcades numérisées sur un articulateur virtuel [39]. Le protocole original comporte 12 étapes et nécessite l'emploi d'une caméra intra-orale (Lava™ COS), d'un scanner extra-oral (ATOS I v.2), du logiciel d'analyse tridimensionnelle associé (GOM Inspect Professional), d'une fourchette d'arc facial, d'une feuille d'occlusion, d'un palpeur mécanique et d'un logiciel de rétro-ingénierie (Rapidform CAV, v2006).

Cette équipe de chercheurs a ensuite réalisé une étude de cas afin de comparer la précision de cette technique virtuelle de transfert à celle de la technique conventionnelle [40].

#### 3.2.1.2 Protocole

Nous détaillons dans cette thèse le protocole mis à jour en 2015 [41] :

- 1- Scanner les arcades maxillaire et mandibulaire du patient à l'aide d'une caméra intra-orale (dans ce cas la TRIOS® de 3Shape) afin d'obtenir des modèles virtuels.
- 2- Placer 3 points de repère (gommettes) sur le visage du patient. Les 2 premiers points localisent l'émergence cutanée de l'axe charnière et le troisième situe un des deux points infra-orbitaires (figure 46).



Figure 46 – Numérisation intra-orale des arcades dentaires et positionnement de repères faciaux [41].

3- Positioner/solidariser la fourchette plastique de l'arc facial à l'arcade maxillaire du patient à l'aide d'hydrocolloïde irréversible ou de silicone d'occlusion (figure 47).



Figure 47 – Fourchette garnie de matériau d’empreinte [41].

4- Prendre huit à dix clichés exobuccaux à l'aide d'un appareil photo numérique. Intégrer ces clichés à un logiciel de rétro-ingénierie (Agisoft Photoscan ; Agisoft LLC) afin d'obtenir la relation tridimensionnelle entre les points de repère sur le visage et ceux sur la fourchette de l'arc facial. On obtient un modèle 3D exobuccal de la fourchette (figure 48).

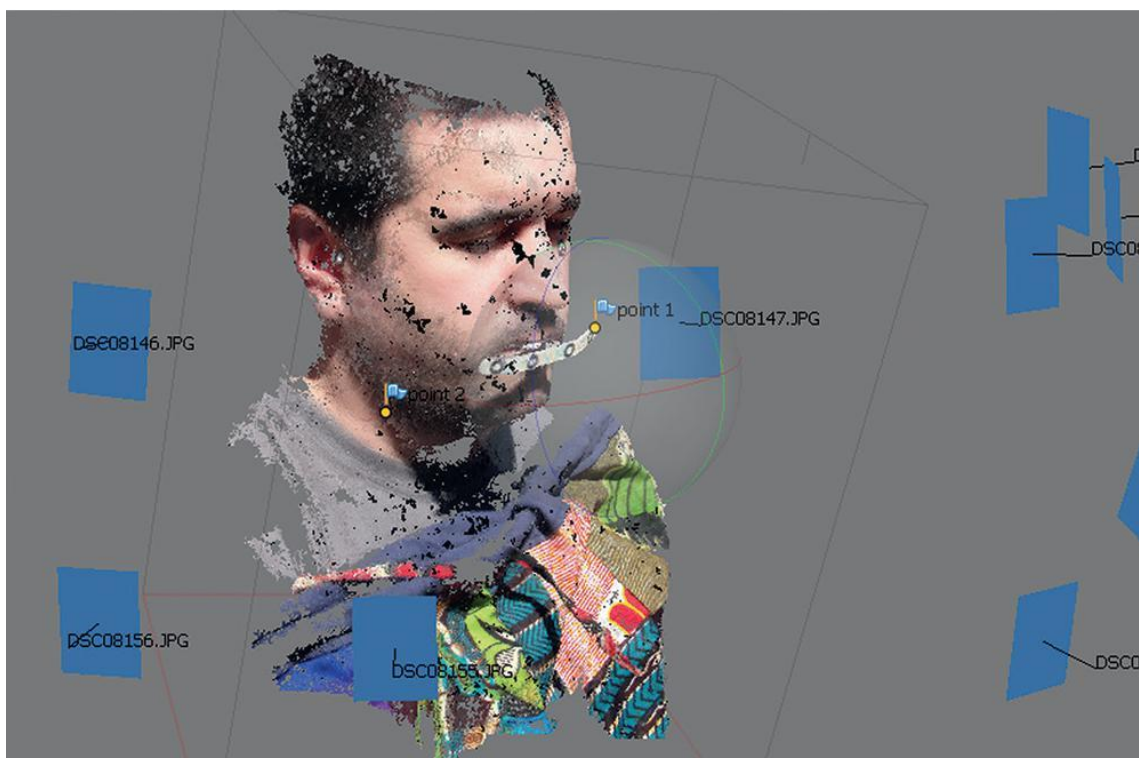


Figure 48 – Reconstitution tridimensionnelle du patient avec le modèle exobuccal de la fourchette [41].

5- Scanner l'empreinte/les indentations de la fourchette et sa face antérieure avec une caméra intra-orale.



6- Avec le logiciel de rétro-ingénierie (Rapidform CADv2006) charger le modèle 3D de la fourchette et l'aligner au modèle maxillaire en utilisant la commande « meilleur ajustement ».

7- Répéter l'étape 6 en alignant le modèle 3D exobuccal de la fourchette et le modèle virtuel de la fourchette comportant le matériau d'empreinte (figure 49).

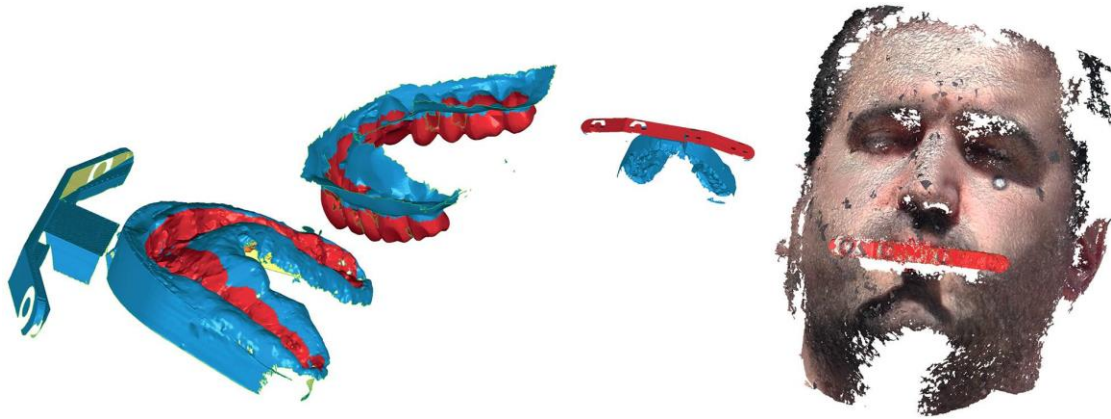


Figure 49 – Aligment du modèle maxillaire, de la fourchette et de sa position exobuccale [41].

8- Fusionner les différentes surfaces de l'arcade maxillaire virtuelle scannée en un modèle virtuel unique, supprimer les points aberrants, recalculer l'organisation du maillage des points et remplir les espaces vides résiduels après traitement des données.

9- Définir le plan de référence axio-orbitaire à l'aide des points de repères faciaux (axe charnière et point sous-orbitaire) et situer l'arcade maxillaire virtuelle par rapport à celui-ci (figure 50).

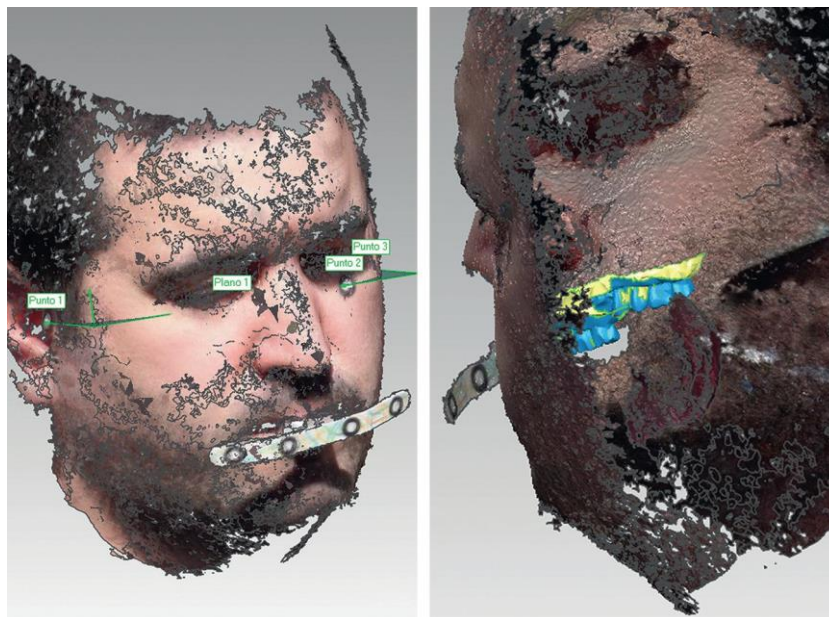


Figure 50 – Définition du plan de référence sur le patient virtuel et vue par transparence de la situation du modèle maxillaire [41].

10- Exporter le modèle maxillaire virtuel vers le logiciel d'articulateur virtuel en faisant coïncider la position du plan de référence définie dans le logiciel de rétro-ingénierie, au plan de référence de l'articulateur virtuel.

11- Positionner l'arcade mandibulaire virtuelle en scannant à l'aide d'une caméra intra-orale en relation centrée depuis trois directions (gauche, droite et de face). Faire correspondre ces scans avec les modèles virtuels maxillaire et mandibulaire. Placer le modèle mandibulaire sur le maxillaire en intercuspitation maximale sur l'articulateur virtuel (figure 51).



Figure 51 – Arcade dentaire exportée dans l'articulateur virtuel [41].

Ce protocole n'est actuellement pas adapté à un exercice clinique mais la précision de l'orientation du maxillaire serait suffisante pour une utilisation en orthodontie [40]. Des études supplémentaires sont nécessaires pour valider la précision et la reproductibilité de ce protocole d'utilisation d'arc facial virtuel.

## 3.2.2 Arc facial virtuel avec le Face Hunter

### 3.2.2.1 Présentation

Fondé sur le même concept que l'arc facial virtuel de l'équipe du Professeur Solaberrieta, un arc facial virtuel utilisant le Face Hunter est en cours de développement par la société Zirkonzahn. Le but est de combiner le transfert des arcades dentaires sur l'articulateur virtuel et l'intégration de la physionomie du patient en vue de réaliser des restaurations antérieures sans rompre le flux numérique de travail.

### 3.2.2.2 Protocole en cours de développement

Une fourchette de transfert est indentée sur le maxillaire du patient à l'aide d'un matériau d'empreinte. Après insertion de la fourchette en bouche, le visage du patient est numérisé de face (figure 52).



Figure 52 – Numérisation du visage du patient avec la fourchette de transfert. Crédit : Zirkozahn.

Puis, le visage du patient au repos est numérisé sans fourchette, de face, selon le profil gauche et droit. La prise de ces clichés est répétée sur le patient lors du sourire.

La fourchette est positionnée sur le modèle maxillaire en plâtre puis numérisée dans un scanner optique avec berceau rotatif (figure 53).

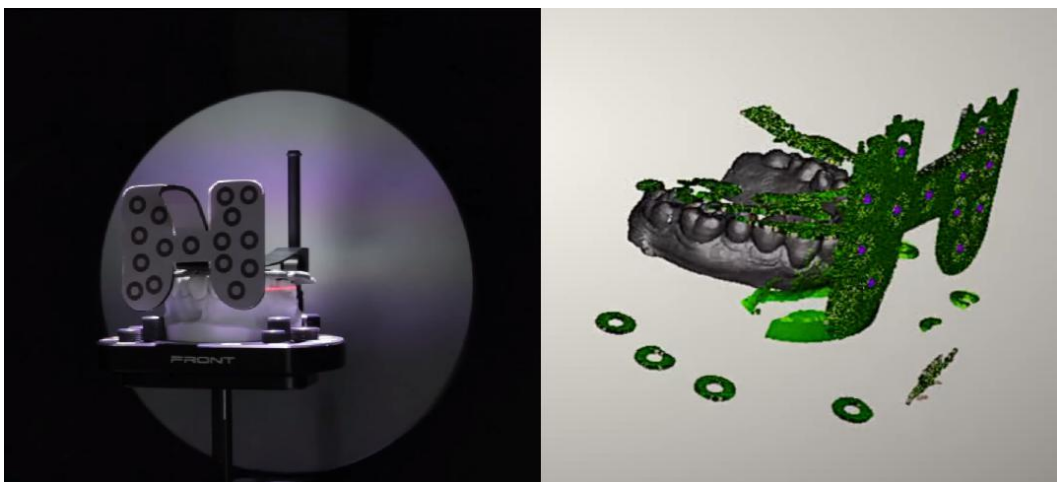


Figure 53 – Numérisation du modèle maxillaire avec la fourchette de transfert. À gauche, le modèle placé de le scanner optique. À droite, l'image virtuelle obtenue. Crédit : Zirkozahn.



Le logiciel fait correspondre par alignement la fourchette du scan facial à la fourchette indentée sur le modèle maxillaire. On obtient la position relative du maxillaire par rapport au massif facial du patient. Dans le logiciel de conception, il est possible à tout moment de superposer le visage du patient aux arcades virtuelles (figure 54).

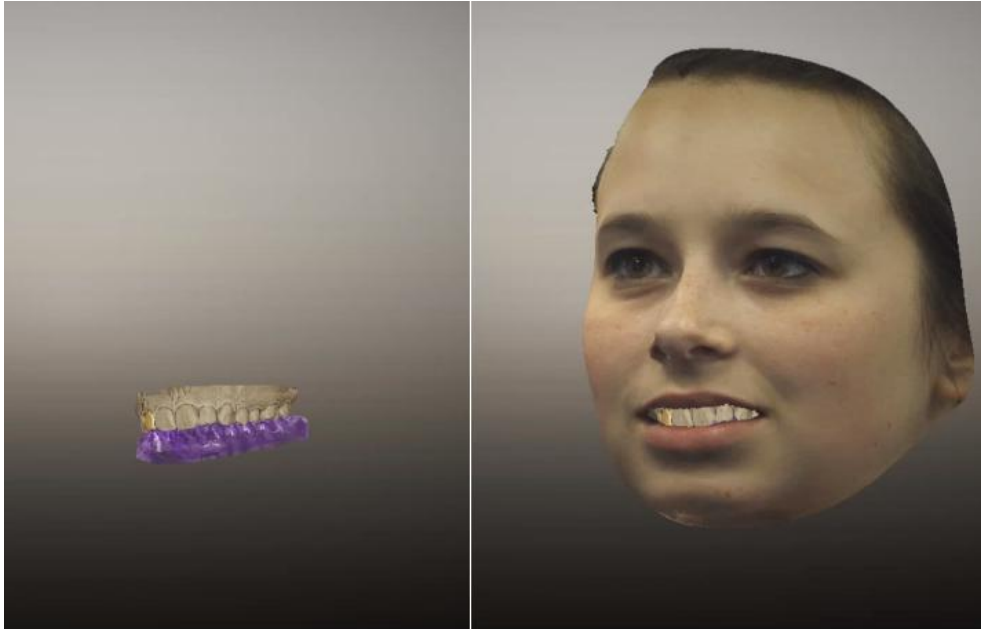


Figure 54 – Le logiciel *Zirkonzahn*.Modellier permet de replacer les arcades virtuelles dans leur contexte maxillo-facial. Crédit : *Zirkonzahn*.

L'arc facial virtuel peut être considéré comme le maillon manquant de la chaîne numérique prothétique. D'autres firmes, Pritidenta par exemple, ont bien compris cet enjeu et proposent des scanners faciaux bénéficiant du même transfert de technologie que *Zirkonzahn*.

# Conclusion

L'articulateur virtuel est une réalité dans un nombre croissant de laboratoires de prothèse dentaire. Les prothésistes dentaires ont été les premiers à saisir l'intérêt des systèmes de CFAO dans leur pratique quotidienne pour remplacer certaines techniques empiriques [42].

La gestion informatique de l'occlusion statique et dynamique est pertinente et valide. Les articulateurs virtuels remplacent avantageusement leurs homologues mécaniques dans les cas de reconstitutions unitaires ou de faible étendue. Le principal défaut de ces simulateurs virtuels demeure dans la nécessité de rompre la chaîne numérique pour des reconstitutions prothétiques de grande étendue. L'arrivée prochaine de l'arc facial virtuel pour une utilisation clinique devrait corriger cette carence.

De nombreux auteurs [19, 30] considèrent que la simulation informatique des mouvements d'articulateurs mécaniques n'est qu'un état transitoire de l'évolution technologique. Puisqu'il existe une relation étroite entre les concepts occlusaux-prothétiques et l'évolution des techniques permettant de reproduire la cinématique mandibulaire, la construction du nouvel outil que représente l'articulateur virtuel suppose l'élaboration de nouveaux concepts (occluso - prothétiques) plus proches de la physiologie. L'objectif à atteindre est d'obtenir une individualisation toujours plus précise des reconstitutions occlusales en les intégrant dans leur environnement anatomique et fonctionnel.

# Bibliographie

- [1] Selva C, Andrieu A, Destruhaut F, Toulouse E, Esclassan R. Utilisation de l'articulateur au cabinet et au laboratoire : mythe ou réalité ?. *Inf Dent*. 2016 Fév ; 16(1) : 57-62.
- [2] Orthlieb JD. *Occlusodontie pratique*. Rueil-Malmaison : Éditions CdP ; 2000.
- [3] Gaudy JF. *Anatomie clinique*. Rueil-Malmaison : Éditions CdP ; 2007.
- [4] Desmons S, Graux F, Libersa P, Dupas PH. Le muscle ptérygoïdien latéral : approche anatomique et neurophysiologique. *Rev Odont Stomat*. 2007 ; 36 : 45-60.
- [5] Collège national d'occlusodontologie, Commission de terminologie. *Lexique*. Paris : Quintessence International ; 2001.
- [6] Orthlieb JD. *Gnathologie fonctionnelle Volume 1 : occlusion et restauration prothétique*. Éditions CdP ; 2010.
- [7] Orthlieb JD. *Gnathologie fonctionnelle Volume 2 : occlusion et restauration prothétique*. Éditions CdP ; 2011.
- [8] Dupas PH, Margerit J. *L'articulateur au quotidien son utilisation simplifiée*. Paris : Éditions CdP ; 2012.
- [9] Gall MGL, Lauret JF. *La fonction occlusale : implications cliniques*. Rueil-Malmaison : Éditions CdP ; 2011.
- [10] Duminil G, Laplanche O. *L'occlusion tout simplement*. Espace Id ; 2014.
- [11] Lundeen HC, Gibbs CH. *Advances in occlusion*. Postgraduate dental handbook. Boston Wright ; 1982.
- [12] Toubol JP, Duret F. De l'articulaire au neuromusculaire, de la mécanique à l'électronique. *Cah Prothese*. 1989 ; 143 : 43-52.
- [13] Tamaki K, Celar AG, Beyrer S, Aoki H. Reproduction of excursive tooth contact in an articulator with computerized axiography data. *J Prosthet Dent*. 1997 ; 78 : 773.
- [14] Kordaß B, Gärtner C. The virtual articulator - concept and development of VR-tools to analyse the dysfunction of dental occlusion. *Int Congr Ser*. 2001 Jun ; 1230 : 689-94.
- [15] Shivamurthy S, Nandeeshwar D, Saritha M. Virtual articulators : a future oriented technology. *Asian J Med Clin Sci*. 2012 ; 1(2) : 98-101.
- [16] Szentpétery A. 3D Mathematic movement simulation of articulators and its application by the development of a software articulator. 1999.

- [17] Solaberrieta E, Etxaniz O, Minguez R, Muniozguren J, Arias A. Virtual Articulator for the Simulation and Analysis of Mandibular Movements in Dental CAD/CAM. Proceedings of the 19th CIRP Design Conference ; 2009 Mar 30-31 ; Cranfield, En-gland.
- [18] Hammad E. La Bluecam et l'Omnacam : changement et apport [Thèse pour le diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire]. Lille : Université du droit et de la santé de Lille 2 Faculté de Chirurgie Dentaire ; 2014.
- [19] Jaisson M, Felenc S. Occlusion et CFAO. In : Bartala M, Duret F. La CFAO appliquée. Paris : Espace ID ; 2014. p.37-45.
- [20] Gueridon S. L'articulateur virtuel du Cerec Software 4.2 : véritable outil de diagnostic ou simple aide à la modélisation d'éléments prothétiques ? [Thèse pour le diplôme d'état de Docteur en Chirurgie Dentaire]. Nice : Université Nice-Sophia Antipolis Faculté de Chirurgie Dentaire ; 2014.
- [21] Mehl A. A new concept for the integration of dynamic occlusion in the Digital Construction Process. In J Comput Dent. 2012 ; 15(2) : 109-23.
- [22] Hollender M, Allard Y, Richelme J, Casu JP. La CFAO indirecte. In : Bartala M, Duret F. La CFAO appliquée. Paris : Espace ID ; 2014. p.13-20.
- [23] Laplanche O, Duminil G. L'articulateur virtuel demain. . . c'est tout de suite. Inf Dent. 2011 Nov 23 ; (40-41) : 63-72.
- [24] Cooke MS, Orth D. Five-year reproducibility of natural head posture : A longitudinal study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1990 Jun 1 ; 97(6) : 489-94.
- [25] Peng L, Cooke MS. Fifteen-year reproducibility of natural head posture : A longitudinal study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1999 Jul ; 116(1) : 82-5.
- [26] Steger E. Face Hunter - Le nouveau scanner facial de Zirkozahn. CAD/CAM rapport de l'industrie Zirkozahn. 2013 ; 2.
- [27] Duret F, Blouin JL. Rapport Odontologique : la CFAO dentaire. Anvar ; 1987 Sept. Rapport n° C65.
- [28] Enciso R, Memon A, Fidaleo DA, Neumann U, Mah J. The Virtual Craniofacial Patient : 3D Jaw Modeling and Animation. Stud Health Technol Inform. 2003 ; 94 : 65-71.
- [29] Hugger A, Bölöni E, Stüttgen U. Accuracy of an ultrasonic measurement system for jaw movement recording. 35th Annual Meeting of the Continental European Division of the International Association for Dental Research ; 1999 ; Montpellier, France.
- [30] Ahlers MO, Bernhardt O, Jakstat HA, Kordaß B, Türp JC, Schindler HJ, Hugger A. Motion analysis of the mandible : guidelines for standardized analysis of computer-assisted recording of condylar movements. Int J Comput Dent. 2015 Jan ; 18(3) : 201-23.
- [31] Kordaß B, Ruge S. On the analysis of condylar path versus real motion of the temporomandibular joint : application for Sicut Function. Int J Comput Dent. 2014 Dec ; 18(3) : 225-35.
- [32] Alghazzawi TF. Advancements in CAD/CAM technology : Options for practical implementation. J Prosthodont Res. 2016 Apr ; 60(2) : 72-84.

- [33] Jaisson M, Felenc S, Nocent O. La gestion de l'occlusion par les systèmes de CFAO les critères de choix. *Cah Prothese*. 2013 Mar ; (161) : 39-52.
- [34] Le MK, Cohen-Levy J, Cohen N. Comment évaluer les contacts occlusaux en 2014 ? . *Inf Dent*. 2014 Avr ; (16-17) : 20-8.
- [35] Ender A, Mehl A. Full arch scans : Conventional versus digital impressions – an in-vitro study. *Int J Comput Dent*. 2011 ; 14 : 11-21.
- [36] Gjelvold B, Chrcanovic BR, Korduner EK, Collin-Bagewitz I, Kisch J. Intraoral Digital Impression Technique Compared to Conventional Impression Technique : A Randomized Clinical Trial. *J Prosthodont*. 2011.
- [37] DeLong R, Ko CC, Anderson GC, Hodges JS, Douglas WH. Comparing maximum intercuspal contacts of virtual dental patients and mounted dental casts. *J Prosthet Dent*. 2002 ; 88(6) : 622-30.
- [38] Solaberrieta E, Otegi JR, Goicoechea N, Brizuela A, Pradies G. Comparison of a conventional and virtual occlusal record. *J Prosthet Dent*. 2015 ; 114(1) : 92-7.
- [39] Solaberrieta E, Mínguez R, Barrenetxea L, Etxaniz O. Direct transfer of the position of digitized casts to a virtual articulator. *J Prosthet Dent*. 2013 Jun ; 109(6) : 411-4.
- [40] Solaberrieta E, Mínguez R, Barrenetxea L, Otegi JR, Szentpétery A. Comparison of the accuracy of a 3-dimensional virtual method and the conventional method for transferring the maxillary cast to a virtual articulator. *J Prosthet Dent*. 2015 ; 113(3) : 191-7.
- [41] Solaberrieta E, Garmendia A, Minguez R, Brizuela A, Pradies G. Virtual facebow technique. *J Prosthet Dent*. 2015 Dec ; 114 : 751-755.
- [42] Duret F. Année 2010, année CFAO. *Réal Clin*. 2009 ; 4(20) : 213-14.

## — Annexe A —

### Etude de DeLong [37]

Les contacts occlusaux obtenus virtuellement sur le maxillaire sont représentés sur la figure 55. Les cercles noirs matérialisent les zones attendues de contacts occlusaux en référence au modèle de référence. Les flèches noires indiquent les contacts virtuels aberrants c'est-à-dire des contacts qui ne correspondent à aucun contact sur le modèle de référence. Les flèches blanches désignent les zones de contacts absentes du modèle virtuel mais qui le sont sur le modèle de référence.

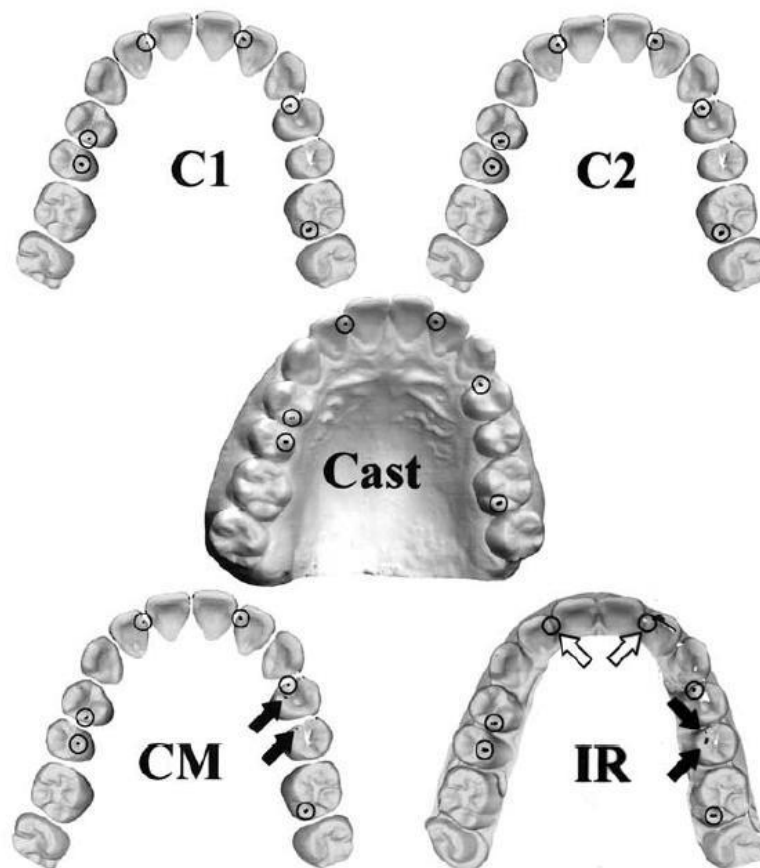


Figure 55 – Représentation des points de contacts occlusaux virtuels calculés au maxillaire selon les 4 méthodes (CM, C1, C2 et IR) [37].

La détection de ces contacts permet de déterminer les vrais positifs (contacts détectés virtuellement et existant sur le modèle de référence), les faux positifs (contacts présents virtuellement mais n'existant pas sur le modèle de référence) et les faux négatifs (contacts absents sur le modèle virtuel mais présents sur le modèle de référence). Cela permet ensuite de calculer la valeur prédictive positive comme étant la probabilité qu'un contact détecté virtuellement existe effectivement sur le modèle de référence. Plus cette valeur est proche de 1, plus le modèle est performant. De la même manière, il est possible de calculer la valeur prédictive négative. La méthode C2 donne les meilleurs résultats (tableau 56).

Method	Sensitivity	Specificity	Positive predictive values	Negative predictive values
C2	0.89	0.95	0.83	0.97
CM	0.86	0.96	0.83	0.96
C1	0.76	0.98	0.90	0.95
IR	0.80	0.89*	0.67*	0.96

\*Significantly different ( $P < .0001$ ;  $n = 10$ ) from other values in column.

Figure 56 – *Comparaison entre les contacts occlusaux calculés sur les modèles virtuels et les contacts révélés par le papier à articuler sur les modèles en plâtre [37].*



## Annexe B

# Etude de Solaberrieta [38]

## B.1 Validation du calcul des contacts occlusaux virtuels

L'adéquation des contacts obtenus virtuellement avec les contacts réels est analysée à partir d'un tableau de contingence 57.

A 2x2 contingency table with 'Reference diagnostic' on the vertical axis and 'Diagnostic test' on the horizontal axis. The vertical axis has '+' at the top and '-' at the bottom. The horizontal axis has '-' on the left and '+' on the right. The four quadrants are labeled: top-left is 'FP', top-right is 'TP', bottom-left is 'TN', and bottom-right is 'FN'. The table is enclosed in an orange border.

Reference diagnostic	+	FP	TP
	-	TN	FN
		-	+
		Diagnostic test	

Figure 57 – Tableau de contingence pour l'analyse des valeurs prédictives. FP : faux positif ; TP : vrai positif ; TN, vrai négatif ; FN : faux négatif. [38]

Les résultats donnés dans le tableau 58 indiquent que la méthode virtuelle Geomagic a permis de détecter 13 contacts effectifs (vrais positifs : TP) et 5 contacts n'existant pas sur le modèle de référence en plâtre (faux positifs : FP). Les deux autres logiciels, Rapidform et GOM Inspect donnent des résultats identiques à l'exception de la présence d'un faux négatif (TN).

La valeur prédictive positive (VPP, notée PV+ dans le tableau 58) permet de calculer la probabilité qu'un contact existe effectivement sur le modèle physique lorsqu'il est détecté par le logiciel. Plus cette valeur est proche de 1, plus cela signifie que le logiciel met correctement en évidence les contacts occlusaux. La VPP s'élève pour les 3 logiciels à 0,72 ce qui prouve leur efficacité.

Software	FP	TP	FN	TN	PV+	PN-
Geomagic	5	13	0	0	0.7222	0
Rapidform	5	13	1	0	0.7222	0
GOM Inspect	5	13	1	0	0.7222	0

Figure 58 – Tableau comparatif des contacts occlusaux calculés par les différents logiciels de rétro-ingénierie [38].

## B.2 Comparaison des logiciels par paire

Le tableau 59 présente pour 6 séries de mesures :

- l'écart maximal constaté entre les contacts virtuels calculés à partir de deux logiciels différents :  $d_{max}$
- l'écart moyen :  $dm$
- l'écart type :  $S$ . Une faible valeur indique que les écarts constatés sont peu dispersés.

Set	Geomagic-Rapidform			Rapidform-GOM			GOM-Geomagic		
	$d_{max}$	$dm$	$S$	$d_{max}$	$dm$	$S$	$d_{max}$	$dm$	$S$
1	0.118	0.010	0.011	0.098	0.010	0.007	0.087	0.008	0.009
2	0.121	0.013	0.017	0.067	0.006	0.004	0.162	0.011	0.009
3	0.102	0.010	0.012	0.121	0.011	0.009	0.166	0.017	0.017
4	0.147	0.014	0.013	0.103	0.009	0.008	0.145	0.010	0.011
5	0.230	0.017	0.017	0.112	0.010	0.006	0.196	0.013	0.012
6	0.119	0.012	0.014	0.089	0.008	0.007	0.098	0.009	0.010

Figure 59 – Tableau comparatif des logiciels par paire (écarts en mm) [38].

Les valeurs obtenues pour ces indicateurs sont faibles, quels que soit la série de mesure et le logiciel utilisé. Les contacts calculés informatiquement sont donc proches et cohérents pour les trois logiciels. Les logiciels Rapidform et GOM présentent les écarts les plus faibles (tableau 59 et courbes 60).

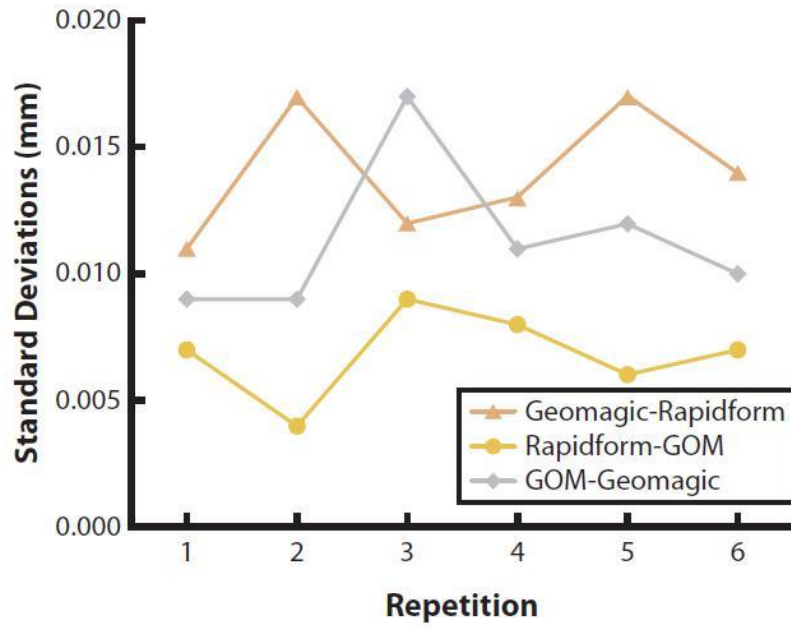


Figure 60 – *Ecart types calculés pour six séries de mesure [38].*

# Table des figures

1	Vue antéro-latérale de la branche montante de la mandibule. ....	15
2	Ligaments intrinsèques de l'ATM en coupe frontale. ....	18
3	Ligaments extrinsèques de l'ATM vue médiale. ....	19
4	Représentation graphique de la courbe de Spee. ....	21
5	Schématisation de la courbe de Wilson pour un couple de molaires. ....	21
6	La superposition du plan de référence chez le patient avec la branche supérieure de l'articulateur permet un positionnement fiable du moulage maxillaire. ....	22
7	Plan d'occlusion. ....	22
8	Position du plan de Camper par rapport au PAO. ....	23
9	Vue sagittale illustrant l'angle que forme la pente condylienne. ....	25
10	Différence entre les enveloppes de mouvements limites et physiologiques. . .	27
11	Comparaison des trajets entre le mouvement de mastication à gauche et le mouvement de latéroclusion à droite. ....	27
12	Schéma explicatif des différentes phases lors de la mastication. ....	28
13	Vue comparative d'un condyle anatomique et de la boule condylienne. ....	29
14	Comparaison du boîtier condylien du Quick et de son équivalent anatomique. .	29
15	Vue d'ensemble du système Cerec <sup>®</sup> . ....	33
16	Réglage de la distance intercondylienne dans le logiciel Cerec <sup>®</sup> . ....	34
17	Fenêtre permettant d'orienter les modèles virtuels. ....	35
18	Fenêtre "Paramètres d'articulation" du logiciel Cerec <sup>®</sup> 4.2. ....	36
19	Schéma représentant le triangle de Bonwill. ....	36
20	Schéma explicatif de l'angle de Balkwill. ....	37
21	Paramètres d'articulation du Cerec <sup>®</sup> 4.4. ....	38
22	Fenêtre du compas occlusal du logiciel Cerec <sup>®</sup> 4.4. ....	38
23	Fenêtre d'animation de l'articulation du Cerec <sup>®</sup> 4.4. ....	39
24	Articulateur virtuel du Dental System <sup>™</sup> avec sa table de montage. ....	40
25	Numérisation des modèles montés en occlusion dans le scanner Argus M2 HD de Dental Direct. ....	41
26	Fenêtre « Articulation virtuelle » détaillant la bibliothèque d'articulateurs disponibles (Dental System <sup>™</sup> ). ....	42
27	L'articulateur SAM <sup>®</sup> et son avatar virtuel obtenu après numérisation dans le scanner optique D850. ....	42
28	A gauche : vue d'ensemble du scanner optique S600 ARTI de la firme Zirkonzahn. A droite : l'articulateur SAM <sup>®</sup> placé dans le scanner. ....	43

29	Vue d'ensemble du flux de travail du Planesystem® . . . . .	43
30	Patient positionné grâce au PlaneFinder® . . . . .	44
31	A gauche la table de montage PlanePositioner® . A droite l'articulateur PS1 physique avec la table de montage. . . . .	44
32	Illustration schématique et clinique du positionnement du papillomètre. . . . .	45
33	Illustration schématique et clinique du positionnement du papillomètre. . . . .	46
34	Positionnement du modèle maxillaire selon l'axe médian du squelette et le centre de mastication. . . . .	47
35	Modèle maxillaire en place sur le PlanePositioner® . . . . .	47
36	Schématisation du report de la distance entre la crête osseuse et la ligne interlabiale sur l'articulateur PS1. . . . .	47
37	Superposition du visage du patient, scanné à l'aide du Face Hunter, et de l'articulateur virtuel PS1. . . . .	48
38	Vue d'ensemble de la chaîne de numérisation des modèles en plâtre grâce à un dispositif de transfert. . . . .	49
39	Le Jaw Motion Analysis positionné sur un patient. . . . .	51
40	Alignement du modèle tridimensionnel de la mandibule avec les données du JMA. . . . .	51
41	Différences de mesure constatées entre la table micromètre et le logiciel WinJaw pour des translations dans les trois plans de l'espace. . . . .	52
42	Fenêtre du logiciel Sicat Function™ permettant de sélectionner le centre condylien dans les trois plans de l'espace. . . . .	53
43	Capture d'écran du logiciel Sicat Function™ présentant la superposition d'une grille de points à la périphérie du condyle. . . . .	54
44	Méthodes d'alignement des surfaces virtuelles. . . . .	57
45	Comparaison des contacts occlusaux en intercuspitation maximale entre le modèle virtuel et cliniquement. . . . .	59
46	Numérisation intra-orale des arcades dentaires et positionnement de repères faciaux. . . . .	60
47	Fourchette garnie de matériau d'empreinte. . . . .	61
48	Reconstitution tridimensionnelle du patient avec le modèle exobuccal de la fourchette. . . . .	61
49	Alignement du modèle maxillaire, de la fourchette et de sa position exobuccale. . . . .	62
50	Définition du plan de référence sur le patient virtuel et vue par transparence de la situation du modèle maxillaire. . . . .	62
51	Arcade dentaire exportée dans l'articulateur virtuel. . . . .	63
52	Numérisation du visage du patient avec la fourchette de transfert. . . . .	64
53	Numérisation du modèle maxillaire avec la fourchette de transfert. . . . .	64
54	Le logiciel Zirkonzahn.Modellier permet de replacer les arcades virtuelles dans leur contexte maxillo-facial. . . . .	65
55	Représentation des points de contacts occlusaux virtuels calculés au maxillaire selon les 4 méthodes. . . . .	70
56	Comparaison entre les contacts occlusaux calculés sur les modèles virtuels et les contacts révélés par le papier à articuler sur les modèles en plâtre. . . . .	71

---

57	Tableau de contingence pour l'analyse des valeurs prédictives. . . . .	72
58	Tableau comparatif des contacts occlusaux calculés par les différents logiciels de rétro ingénierie. . . . .	73
59	Tableau comparatif des logiciels par paire. . . . .	73
60	Ecart types calculés pour six séries de mesure. . . . .	74

**Th. D. : Chir. Dent. : Lille 2 : Année [2016] – N°:**

Les articulateurs virtuels / **Adrian CRUCES**.- f. 77 : ill. 60 ; réf. 42.

**Domaines** : Prothèses – Technologie.

**Mots clés RAMEAU** : Articulateurs ; Conception assistée par ordinateur ; Occlusion dentaire.

**Mots clés FMeSH** : Articulateurs dentaires ; Conception assistée par ordinateur ; Occlusion dentaire.

Au début du XXIème siècle, de nouvelles technologies associées au développement croissant de l'informatique offrent de nouvelles perspectives dans les cabinets dentaires et les laboratoires de prothèse. La pratique de la dentisterie numérique s'est démocratisée et concerne un nombre croissant de praticiens et de prothésistes. Celle-ci a déjà révolutionné les étapes d'empreinte et de fabrication de prothèses.

Les articulateurs sont traditionnellement décrits comme des dispositifs mécaniques sur lesquels sont montés les moulages en plâtre des arcades du patient. Avec la CFAO sont apparus des articulateurs virtuels. Au cours de cette thèse, nous étudierons ces simulateurs qui permettent de modéliser l'occlusion de manière informatique.

En premier lieu, nous ferons des rappels sur l'anatomie de l'articulation temporo-mandibulaire afin d'en dresser l'analogie avec les articulateurs mécaniques.

Puis nous détaillerons les différents articulateurs virtuels disponibles et les principes de transfert des modèles qui y sont associés. Nous préciserons les avantages et inconvénients de ces articulateurs.

Enfin nous analyserons la validité des contacts occlusaux calculés virtuellement et nous décrirons les prochaines évolutions liées aux articulateurs virtuels.

**JURY** :

**Président** : Monsieur le Professeur Pascal BEHIN

**Assesseurs** : Monsieur le Docteur Claude LEFEVRE

Monsieur le Docteur François GRAUX

Monsieur le Docteur François-Xavier SANTOLALLA