



HAL
open science

Simulation virtuelle de l'occlusion dynamique : possibilités actuelles et perspectives

Regnaudin de Belleville

► **To cite this version:**

Regnaudin de Belleville. Simulation virtuelle de l'occlusion dynamique : possibilités actuelles et perspectives. Chirurgie. 2016. dumas-01347704

HAL Id: dumas-01347704

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01347704v1>

Submitted on 21 Jul 2016

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

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

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

Année: 2015/2016

n°56

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

Présentée et soutenue publiquement

Par: Regnaudin de BELLEVILLE

Né le 19/12/85 à Bordeaux

Le 20/07/1016

**Simulation virtuelle de l'occlusion dynamique : possibilités
actuelles et perspectives.**

Directeur de thèse

Mathieu CONTREPOIS

Membres du Jury

Président	Mme C. BERTRAND	Professeur des Universités
Directeur	M M. CONTREPOIS	Assistant Hospitalo-Universitaire
Rapporteur	M M. BARTALA	Maître de Conférences des Universités
Assesseur	M D'INCAU	Maître de Conférences des Universités

UNIVERSITE DE BORDEAUX

MAJ 01/11/2015

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

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

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

ENSEIGNANTS DE L'UFR

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

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

MAITRES DE CONFERENCE DES UNIVERSITES

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

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

ASSITANTS

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

Remerciement

A notre Présidente de thèse

Madame le Professeur Caroline Bertrand

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Directrice de l'UFR des Sciences Odontologiques

Sous-section Prothèse 58-02

Je vous remercie infiniment de l'honneur que vous me faites en acceptant la présidence de mon jury. Votre enseignement et vos qualités pédagogiques m'ont été précieux tout au long de mes études. Veuillez trouver ici, Madame le Professeur, le témoignage de ma profonde gratitude et de mes sentiments les plus respectueux.

A notre Directeur de thèse

Monsieur le Docteur Mathieu Contrepois

Assistant Hospitalo-Universitaire

Sous-section Prothèses – 58-02

Qui nous a fait l'honneur d'accepter de prendre la direction de cette thèse. Je vous suis extrêmement reconnaissant de m'avoir accompagné tout au long de la réalisation de ce travail. Pour votre totale disponibilité et toutes les connaissances que vous m'avez apportées, veuillez trouver dans cette thèse, l'expression de mes remerciements les plus sincères, mon profond respect et mon amitié.

A notre Rapporteur de thèse

Monsieur le Docteur Michel Bartala

Maître de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier

Sous-section Prothèses 58-02

Vous avez spontanément accepté de juger ce travail et je vous en remercie. Je tiens également à témoigner de votre intérêt et disponibilité. De par les précieux conseils que vous m'avez prodigués, votre expérience clinique partagée durant le stage actif, votre grande rigueur ainsi que votre professionnalisme, permettez-moi de vous exprimer toute mon estime.

A notre Assesseur de thèse

Monsieur le Docteur Emmanuel D'Incau

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section Prothèses 58-02

Qui nous a fait l'honneur de faire partie de ce jury, merci pour votre disponibilité et votre soutien.

A ma famille, ma copine et mes amies

Je tiens à vous remercier du soutien que vous m'avez apporté durant toutes ces années d'étude.

**Simulation virtuelle de
l'occlusion dynamique :
possibilités actuelles et
perspectives.**

Table des matières

Introduction.....	5
1. Contexte actuel : Des concepts fondamentaux d'occlusodontie à la simulation mécanique de la cinématique mandibulaire	6
1.1. L'appareil manducateur.....	6
1.1.1. Le système neuro-musculaire	7
1.1.2. Le système dentaire	9
1.1.2.1. Morphologie occluso-fonctionnelle	9
1.1.2.2. Arcades convenablement agencées.....	9
1.1.2.2.1. Les courbes de l'occlusion	9
1.1.2.2.2. Les plans de référence	11
1.1.2.3. Affrontement des arcades.....	12
1.1.2.3.1. L'occlusion d'intercuspidie maximale: OIM	12
1.1.2.3.2. La relation centrée: RC.....	12
1.1.2.3.3. Les dimensions verticales	13
1.1.2.3.1. Position thérapeutique	13
1.1.2.4. Les fonctions de l'occlusion.....	15
1.2. La cinématique mandibulaire	15
1.3. Les simulateurs mécaniques.....	18
1.3.1. Les occluseurs	18
1.3.2. Les articulateurs.....	18
1.3.2.1. Description des articulateurs.....	20
1.3.2.2. L'arc facial (arc de transfert) et table de montage.....	20
1.3.3. Montage des modèles.....	21
1.3.3.1. Prise d'empreinte et coulée des modèles	21
1.3.3.2. Localisation et montage du modèle maxillaire	21
1.3.3.3. Montage du modèle mandibulaire.....	22
1.3.4. Programmation	22
1.3.4.1. Enregistrements intrabuccaux.....	23
1.3.4.2. Enregistrements extrabuccaux.....	24
1.3.5. Limites des simulateurs mécaniques	26
2. Matériels et méthodes.....	27
3. Résultats.....	28
3.1. Simulateurs virtuels.....	28

3.1.1. Historique.....	28
3.1.2. "Occluseurs" virtuels.....	28
3.1.3. Articulateur virtuel.....	29
3.1.3.1. Simulation mathématique.....	30
3.1.3.2. Articulateurs virtuels totalement adaptables	36
3.1.4. Inventaire des données à recueillir pour le "montage" sur articulateur virtuel totalement adaptable	36
3.1.5. Technique d'acquisition tridimensionnelle.....	37
3.1.5.1. L'empreinte optique.....	37
3.1.5.2. L'imagerie tridimensionnelle par rayonnement X.....	37
3.1.5.3. La photographie tridimensionnelle	38
3.1.6. Techniques d'acquisition de la cinématique mandibulaire/pantographie numérisée	39
3.1.6.1. Principe de fonctionnement.....	39
3.1.6.2. Les différents systèmes	39
3.1.6.2.1. Les systèmes optiques	39
3.1.6.2.2. Les systèmes ultrasonores.....	40
3.1.6.2.3. Les systèmes électromagnétiques	41
3.1.6.3. Fixation de l'appareillage d'enregistrement.....	42
3.1.6.4. Enregistrement de la cinématique mandibulaire.....	44
3.1.7. Technique d'acquisition électromyographique	46
3.1.8. Jumelage des données	46
3.1.8.1. Principe.....	46
3.1.8.2. Jumelage des données d'imagerie et des arcades dentaires	47
3.1.8.2.1. Jumelage avec les téléradiographies de face et de profil.....	47
3.1.8.2.2. Jumelage avec un scanner radiologique.....	47
3.1.8.3. Jumelage des données du pantographe numérique et des données 3D.....	48
3.2. Possibilité diagnostique et thérapeutique	51
3.2.1. Possibilité diagnostique et thérapeutique des articulateurs virtuels mathématiques.....	51
3.2.1.1. Traitement orthodontique	51
3.2.1.1.1. Planification de traitement orthodontique	51
3.2.1.1.2. Planification de traitement orthognatique.....	52
3.2.1.2. Traitement prothétique.....	53
3.2.1.2.1. Restauration prothétique de faible étendue	55
3.2.1.2.2. Restauration prothétique important et reconstruction prothétique.....	55

3.2.1.3. Chirurgie implantaire guidée	56
3.2.2. Apport diagnostique et thérapeutique des articulateurs virtuels totalement adaptables	58
3.2.2.1. Apport visuel des articulateurs virtuels totalement adaptables	58
3.2.2.2. Détection des surfaces de contact	62
3.2.2.2.1. Seuil de tolérance et contacts	62
3.2.2.2.2. Soustraction des modèles et espace libre d'inocclusion	63
3.2.2.2.3. Codage couleur	64
3.2.2.3. Apports diagnostiques	64
3.2.2.3.1. Sur l'analyse axiographique	64
3.2.2.3.2. Sur l'analyse occlusale	68
3.2.2.3.3. Sur l'examen fonctionnel global	70
3.2.2.4. Apports thérapeutiques	72
3.2.2.4.1. Sur les thérapeutiques articulaires	72
3.2.2.4.2. Sur les thérapeutiques occlusales	75
4. Discussions	78
4.1. Gestion entièrement virtuelle d'un cas complexe	78
4.2. Validation	84
4.3. Avantages	85
4.3.1. Limites	89
4.4. Perspectives	90
Conclusion	92
Bibliographie	93

Introduction

Dans la pratique clinique au quotidien, l'utilisation et le réglage des articulateurs sont, à tort, trop souvent négligés ou laissés au soin des prothésistes car considérés comme trop complexes et trop chronophages. Ainsi, pour beaucoup de traitements, les modèles seront montés avec une table de montage et l'articulateur sera paramétré avec les valeurs "par défaut".

Cependant, lors d'une réhabilitation prothétique d'un cas complexe, l'utilisation et la programmation d'un articulateur sont indispensables à la fois lors de la phase diagnostic, de la phase de décision thérapeutique et lors de la réalisation du traitement en lui-même. Ainsi leurs utilisations nous permettent de réaliser des éléments prothétiques qui s'adapteront le mieux possible à la physiologie des patients, à condition que le paramétrage soit correctement réalisé, ce qui n'est pas forcément aisé.

Néanmoins, la conception de ces articulateurs a été réalisée à partir de valeurs moyennes, ce qui ne permet qu'une approximation de la situation réelle du patient. De plus, lors des phases de documentation et de diagnostic, certaines informations nécessaires à l'élaboration architecturale du plan de traitement ne peuvent qu'être retransmises indirectement sur ces articulateurs.

En revanche depuis peu, de par les progrès technologiques réalisés, il a été possible dans certains cas, de s'affranchir des articulateurs conventionnels. Ainsi, le développement des empreintes optiques a permis la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO) d'éléments prothétiques. Cependant, les systèmes actuels de simulation de l'occlusion ont été conçus de la même manière que les articulateurs mécaniques, c'est à dire qu'il n'est possible de personnaliser que les valeurs moyennes des trajectoires mandibulaires. Ils sont donc plus ou moins personnalisables mais ils ne peuvent permettre qu'une approximation des mouvements réels du patient.

D'un autre côté, de nouveaux systèmes intégrant la fonction individuelle d'un patient (le SICAT Function; SICAT, Bonn, Allemagne et le 3D-VAS; université de Greifswald, Allemagne), viennent de faire leur apparition, il est naturel de se demander si ces dispositifs vont permettre d'améliorer notre arsenal diagnostic et de compléter le fonctionnement des systèmes de CFAO dentaires. De plus, sera-t-il possible de pouvoir, à terme, s'affranchir des articulateurs mécaniques et de leurs limites. Afin de tenter de répondre à cette interrogation une revue de la littérature a été réalisée.

Après un bref rappel d'occlusodontie, du fonctionnement des articulateurs conventionnels, les résultats de la revue seront présentés à travers une description des différents simulateurs virtuels existant à ce jour, ainsi que des méthodes d'enregistrement des données nécessaires à la réalisation d'un montage virtuel. Puis, de par les informations que ce type de système apporte, leurs utilités diagnostiques et thérapeutiques, puis leurs limites pourront être exposées. Pour finir une présentation des perspectives de création d'un montage directeur selon les huit critères occluso-architecturaux (OCTA) sera présentée.

1. Contexte actuel : Des concepts fondamentaux d'occlusodontie à la simulation mécanique de la cinématique mandibulaire

Définir l'occlusion comme étant simplement le rapport des arcades dentaires lors de la fermeture de la bouche est bien trop limitatif. Les arcades dentaires ne sont que l'un des éléments d'une entité biologique que l'on appelle l'appareil manducateur [13].

1.1. L'appareil manducateur

L'appareil manducateur est composé de différents systèmes interagissant et interdépendants les uns des autres: le système ostéo-articulaire, les muscles masticateurs et les arcades dentaires. Les actions et interactions au sein de cet appareil sont coordonnées par le système nerveux central, qui en est le quatrième déterminant [13].

Le système ostéo-articulaire est composé de trois parties (Figure 1):

- Les os maxillaires,
- La mandibule,
- L'articulation temporo-mandibulaire (ATM) [13]

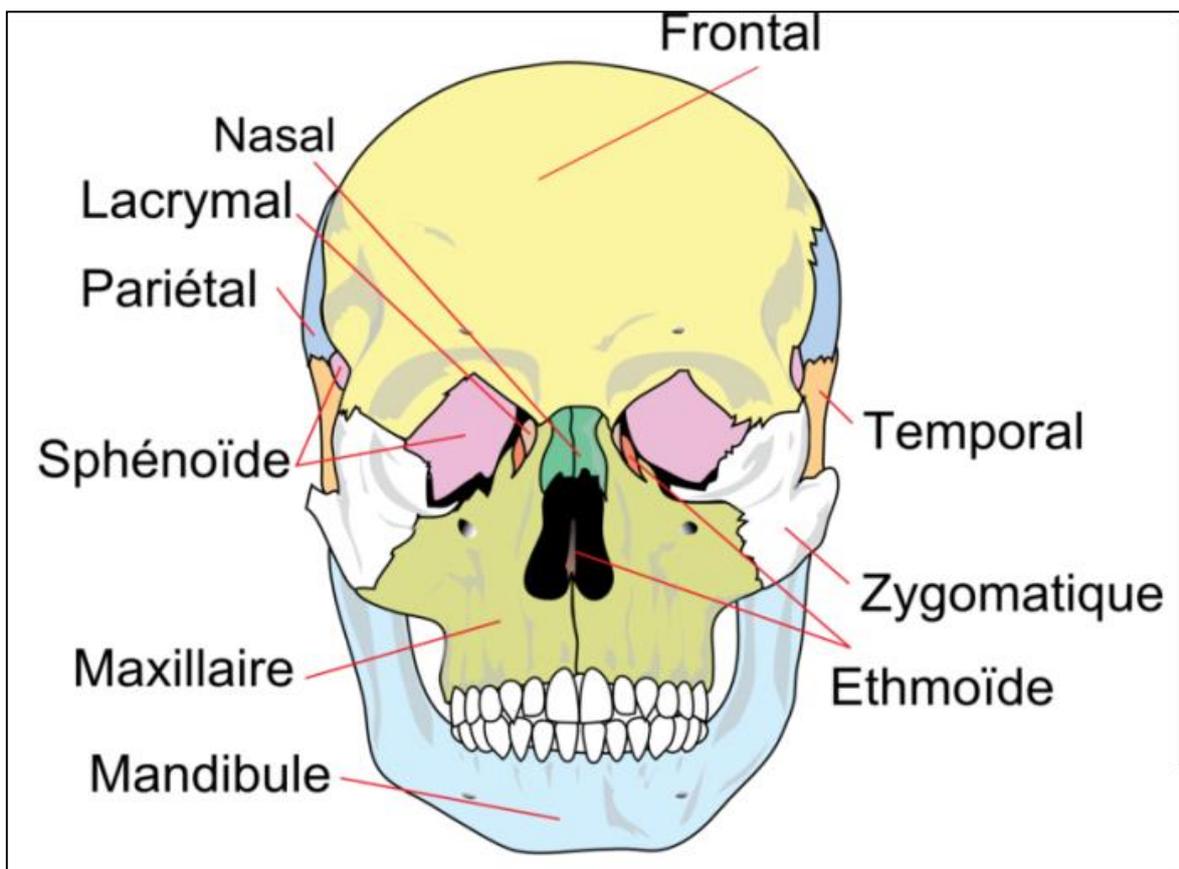


Figure 1 : Le squelette du crâne [23].

1.1.1. Le système neuro-musculaire

Les muscles masticateurs sont l'élément moteur de l'appareil manducateur. On distingue les muscles élévateurs et les muscles abaisseurs. Le ptérygoidien latéral occupe une place à part, car son rôle complexe est déterminant dans le fonctionnement mandibulaire (Figure 2) [3,13].

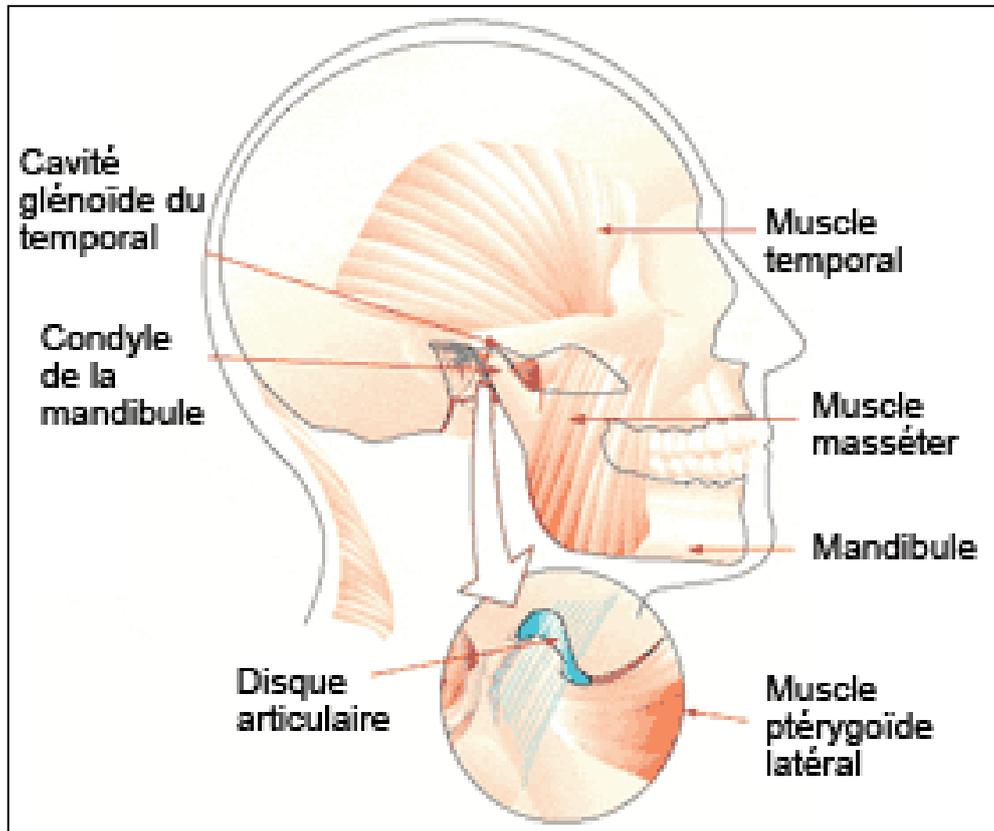


Figure 2 : Les principaux muscles masticateurs [74].

- Muscles élévateurs

Les principaux muscles élévateurs sont le temporal, le masséter et le ptérygoidien médial:

- **Le temporal** est le plus puissant des muscles masticateurs. On distingue trois faisceaux : antérieur, médian et postérieur. Il a un rôle d'élévateur pour ses faisceaux antérieur et moyen, mais aussi rétracteur pour le faisceau postérieur. Sa contraction unilatérale provoque un déplacement latéral du côté de la contraction [3,13].
- **Le masséter** présente deux faisceaux, un superficiel et un profond, plus mince. Il est principalement élévateur de la mandibule mais il participe aussi aux mouvements de protrusion / rétrusion et de latéralité [3,13].
- **Le ptérygoidien médial** est un muscle "symétrique" du masséter avec lequel il forme l'écharpe musculaire masticatoire dans laquelle la mandibule est suspendue. Il est élévateur de la mandibule, la combinaison de son action avec celle du masséter permet une fermeture puissante de la mandibule [3,13].

- Muscles abaisseurs

Les muscles abaisseurs sont répartis en deux groupes : les muscles abaisseurs directs (sus-hyoïdiens) et indirects (sous-hyoïdiens et les muscles du cou et de la posture de la tête).

- ✓ Muscles abaisseurs directs sont le digastrique, le stylo-hyoïdien, le mylo-hyoïdien et le génio-hyoïdien.

Ces muscles sont toujours activés, soit comme activateurs du mouvement d'ouverture, soit comme régulateurs du mouvement de fermeture [14].

- ✓ Muscles abaisseurs indirects

Un équilibre complexe s'établit entre les muscles abaisseurs indirects et les principaux muscles masticateurs pour maintenir la posture de la tête mais aussi de la mandibule. Ces muscles sont comparables à des haubans venant stabiliser le crâne sur la colonne cervicale [13].

- Le ptérygoïdien latéral

Les contractions musculaires antagonistes des chefs supérieur et inférieur du ptérygoïdien latéral favorisent la coaptation du disque sur son condyle. Cet antagonisme des deux chefs fait qu'ils sont désormais distingués par certains auteurs comme muscle ptérygoïdien latéral supérieur et muscle ptérygoïdien latéral inférieur. De plus, cet antagonisme joue un rôle majeur lors de certains processus pathologiques [13,14,77].

- Le système de régulation

L'interaction entre les ATM, les muscles et les dents est assurée par le système nerveux central (SNC), qui collecte des informations périphériques (afférence) et ajuste en retour la réponse efférente motrice musculaire. Des capteurs de différents types sont répartis au sein de chaque système pour percevoir des informations et en informer le cerveau:

- **Au niveau des ATM**, des capteurs peu précis informent le SNC sur la sensation douloureuse, les mouvements et la position de l'articulation.
- **Au niveau musculaire**, des capteurs informent le SNC sur l'état d'étirement du muscle.
- **Au niveau dentaire**, les capteurs desmodontaux constituant le système de capteur le plus performant, informent le SNC sur la consistance des aliments et l'intensité du contact dentaire [13,14].

Un système de rétrocontrôle s'organise entre les capteurs et les nerfs moteurs par l'intermédiaire du SNC, permettant la régulation du rythme et du tonus musculaire en fonction de la consistance des aliments. De plus il existe un rétrocontrôle d'urgence qui stoppe immédiatement la mastication lorsque les dents rencontrent un corps étranger qui pourrait leur occasionner des dégâts [14].

1.1.2. Le système dentaire

L'occlusion s'organise, sur le plan morphologique et anatomique, comme un ensemble hiérarchisé:

- une morphologie occlusale fonctionnelle
- une arcade convenablement agencée
- un affrontement des arcades respectant des règles biomécaniques.

Les fonctionnements occlusaux qui en découlent permettent un fonctionnement économe, moins fatigant et moins destructeur (économie d'énergie et pérennité structurelle) [13].

1.1.2.1. Morphologie occluso-fonctionnelle

Les dents humaines sont caractérisées par une morphologie occlusale constituée de formes convexes qui répondent à des impératifs physiologiques (par exemple réduire les contraintes, faciliter la prophylaxie...) [13].

- **Les dents des secteurs postérieurs** sont adaptées pour résister à des contraintes verticales. Les prémolaires et molaires comportent une surface occlusale complexe dont les éléments constitutifs ont chacun un rôle spécifique.
- **Les dents du secteur antérieur** sont adaptées pour résister aux contraintes transversales. Elles ont une surface occlusale plus réduite qui a pour rôle principal de guider la mandibule lors des différents mouvements [3].

Il existe une action de protection mutuelle entre les différents groupes : les postérieures protègent les antérieures en occlusion, les antérieures protègent les postérieures lors des mouvements extrusifs [3].

1.1.2.2. Arcades convenablement agencées

1.1.2.2.1. Les courbes de l'occlusion

Selon le principe de l'occlusion sphérique de Slavicek, "rien n'est plat, tout est courbe dans la morphologie et l'organisation dentaire", ainsi "le plan d'occlusion" n'est pas plat, ni en vue frontale, ni en vue sagittale pour la raison simple que les grands axes des dents ne sont pas parallèles entre eux. Par conséquent, il existe une courbe dans chaque plan de l'espace. Le plan d'occlusion (Figure 3) n'existe donc que de manière arbitraire même si certains instruments tentent de le matérialiser (plan de Fox), il est schématisé par les pointes cuspidiennes disto-vestibulaires des deuxièmes molaires mandibulaires et par le bord libre des incisives mandibulaires [15,63,64].

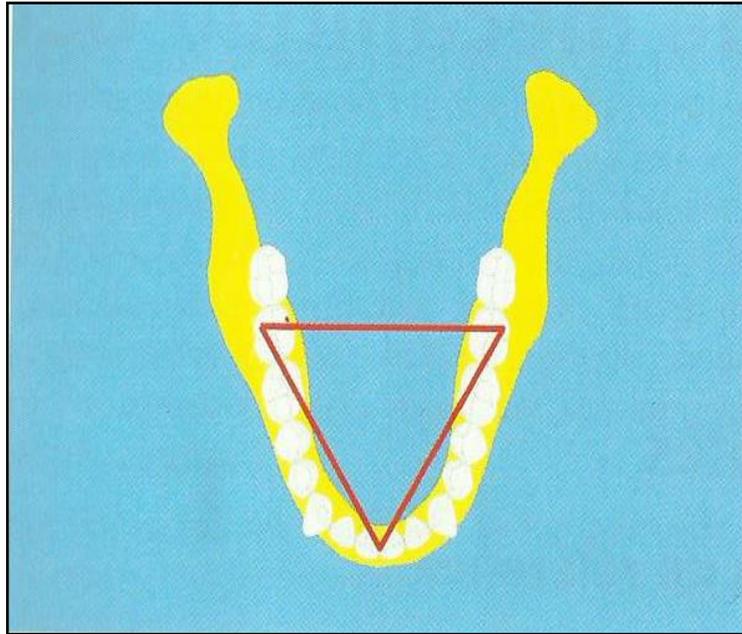


Figure 3 : Le plan d'occlusion [15].

Les arcades dentaires s'organisent dans le plan sagittal selon la courbe de Spee (Figure 4). Celle-ci est schématisée par une courbe antéropostérieure intéressant la pointe canine ainsi que les pointes cuspidiennes vestibulaires des prémolaires et molaires mandibulaires jusqu'à l'axe charnière [15].

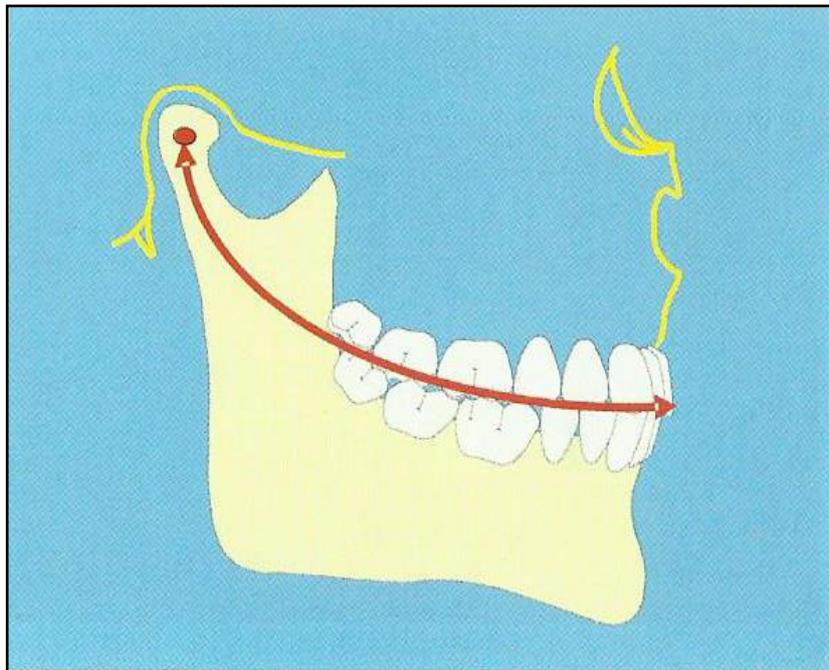


Figure 4 : La courbe de Spee [15].

Les courbes de Wilson (Figure 5), sont des courbures frontales à concavité généralement supérieure, assimilables à des portions de cercle de rayon variable, réunissant les sommets des cuspidés vestibulaires et linguales des deux dents homologues (elles peuvent être décrites au maxillaire et à la mandibule) [15,64].

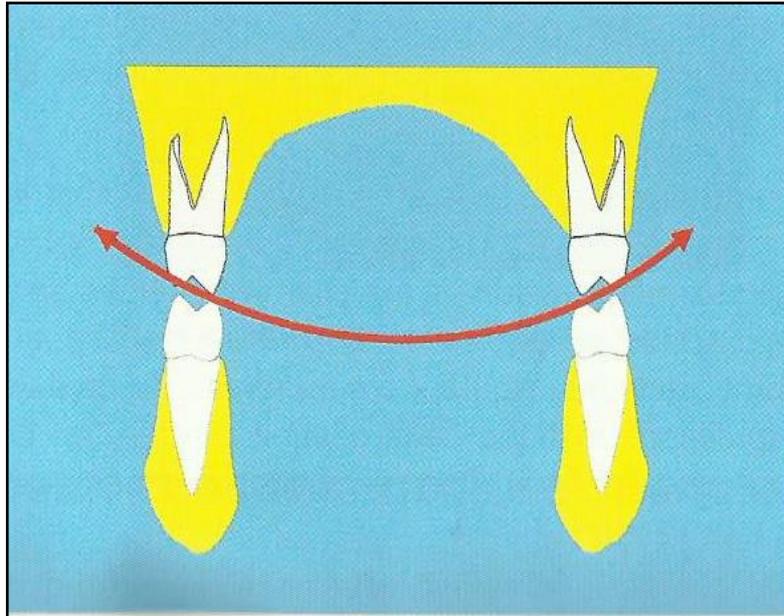


Figure 5 : La courbe de Wilson [15].

La conséquence de ces trois courbes est une organisation sphéroïde des arcades dentaires, ce qui permet une meilleure répartition et transmission des forces masticatoires des dents vers les aliments puis vers les structures osseuses sous-jacentes, tout en maintenant une efficacité masticatoire optimale à un moindre coût énergétique. De plus des courbes occlusales correctes permettent la translation mandibulaire sans interférences occlusales postérieures, tout en maintenant un rapprochement efficace des tables occlusales dans les phases de mastication [63,64].

1.1.2.2.2. Les plans de référence

Base de l'architecture, la première étape d'une construction consiste à matérialiser un, et un seul, plan horizontal de référence. Géométriquement, un plan est "plat", défini par trois points. Associé à un point "0", il crée un repère orthonormé à trois dimensions, préalable à toute quantification (Figure 6) [64].

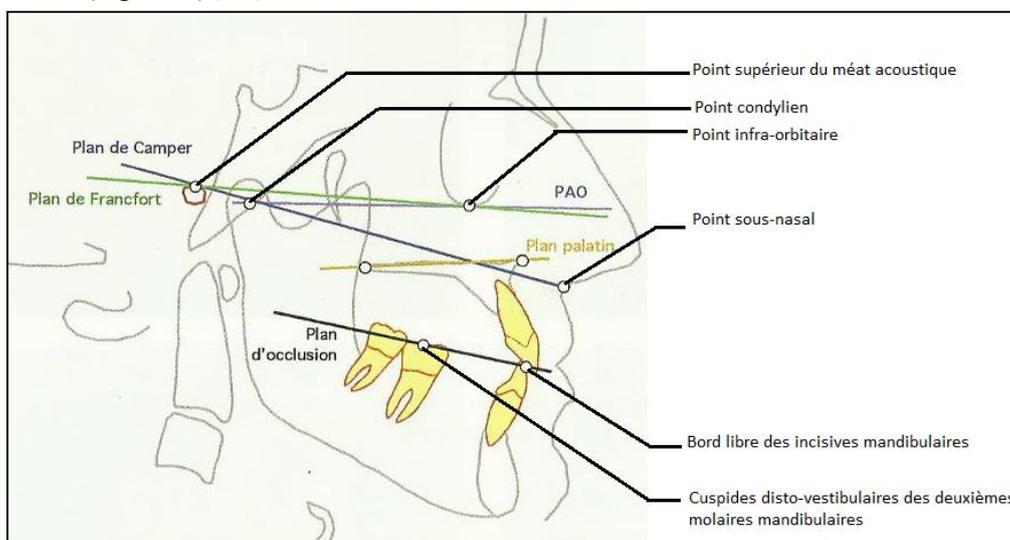


Figure 6 : Les plans de référence [64].

- **Le plan de Camper** (point sous-nasal/point supérieur du MEAT acoustique) est un plan anthropologique qui a été très tôt utilisé pour déterminer le plan d'occlusion en prothèse amovible complète. Il sert de référence à la confection et au réglage du bourrelet d'occlusion maxillaire [15,64].

- **Le plan de Francfort** (point infra-orbitaire/point supérieur du MEAT acoustique) est utilisé principalement en orthopédie dento-faciale, mais aussi en prothèse amovible complète [64].

- **Le plan axio-orbitaire (PAO)** En occlusodontologie, ce plan est la référence majeure de toutes les valeurs angulaires dentaires et condyliennes. Le PAO (point condylien droit et gauche, point infra-orbitaire gauche) répond parfaitement à différents besoins : simplicité; accessibilité; horizontalité sagittale en posture habituelle de la tête (regard à l'horizon); horizontalité frontale parallèle à la ligne bi-pupillaire; possibilité de superposition: sujet, imagerie (radiographie, scanner), axiographie, articulateur; pertinence anatomique: mise en situation de la relation spatiale occlusion/condyle mandibulaire [15,64].

1.1.2.3. Affrontement des arcades

Les positions de référence sont à la fois un repère clinique du positionnement de la mandibule par rapport au maxillaire (dans un but diagnostique) et un moyen de transfert de la clinique au laboratoire (dans un but thérapeutique). Cette position ne doit pas être affectée par le traitement. Seules, deux positions mandibulaires peuvent répondre aux caractéristiques d'une position de référence : l'occlusion d'intercuspidie maximale (OIM) et la relation centrée (RC) [64].

1.1.2.3.1. L'occlusion d'intercuspidie maximale: OIM

L'occlusion d'intercuspidie maximale (OIM) est la position où le rapport d'engrènement dentaire se caractérise par le plus grand nombre de contacts inter-arcades permettant une intensité de contraction symétrique et maximale des contraintes musculaires. Chez l'adulte, cette relation interarcades influence directement la situation des condyles dans les fosses mandibulaires [3,62].

Dans des conditions occlusales physiologiques, la stabilité mandibulaire obtenue en OIM est considérée comme cliniquement reproductible. Lorsque la position de référence est l'OIM, l'objectif occlusal du traitement visera à renforcer l'OIM existante, donc son enregistrement, s'il est nécessaire pour stabiliser les moulages, est renforcé par une table sectorielle d'enregistrement (dents préparées) ou une cire d'occlusion (zones édentées), les dents résiduelles assurant l'OIM par leur engrènement naturel. Par conséquent, il n'existe pas de "cire d'intercuspidation maximales" [15,63].

1.1.2.3.2. La relation centrée: RC

La relation centrée est une position articulaire reproductible qui se caractérise par une position bi-condylienne de référence appartenant au plan de référence, constituant le point zéro du repère orthonormé de référence. De plus, cette position autorise un mouvement de rotation

pure ou axial terminal d'environ 10° ce qui correspond à environ 10 à 15 mm d'ouverture au niveau des incisives (Figure 7) [63,64].

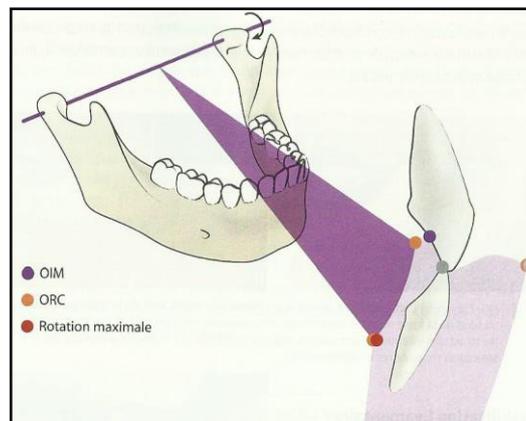


Figure 7 : La relation centrée [63].

L'occlusion de relation centrée (ORC) correspond aux contacts occlusaux produits par le mouvement axial terminal de la mandibule et donc des dents mandibulaires sur les dents maxillaires.

Dans des conditions musculo-articulaires physiologiques, la stabilité mandibulaire transversale obtenue en RC est anatomiquement confirmée et la reproductibilité de la manipulation reconnue par de nombreux travaux. Dans des conditions musculo-articulaires pathologiques ne permettant pas l'obtention de la stabilité mandibulaire, le praticien cherchera une position d'équilibration musculaire pour la réalisation du traitement. L'enregistrement de la relation centrée se fait sur une double épaisseur de cires, type Moyco®, il est préférable de réaliser trois enregistrements, afin de pouvoir valider la position de référence sur l'articulateur [13,64].

1.1.2.3.3. Les dimensions verticales

La dimension verticale d'occlusion (DVO) correspond à la hauteur de l'étage inférieur de la face mesurée entre deux repères (par exemple: point sous nasal, gnathion) lorsque les arcades sont en OIM [64].

La dimension verticale de repos (DVR) correspond à la hauteur de l'étage inférieur de la face mesuré entre deux repères, lorsque la mandibule est en posture de repos (inocclusion physiologique) [64].

L'espace libre d'inocclusion (ELI) correspond à la distance entre les surfaces occlusales maxillaires et mandibulaires quand la mandibule est en posture de repos. C'est la différence entre la DVO et la DVR [64].

1.1.2.3.1. Position thérapeutique

La position thérapeutique mandibulaire correspond à une position choisie par le praticien en fonction de différents facteurs (OIM résiduelle, état des ATM, DVO...), pour réaliser le traitement prothétique. L'OIM est dite fonctionnelle lorsqu'elle permet le centrage, guidage et calage (au moins 3 couples de dents cuspidées encore présents) de la mandibule par rapport au maxillaire. Cette position à une dimension verticale et sagittale (Figure 8) [58,63,64].

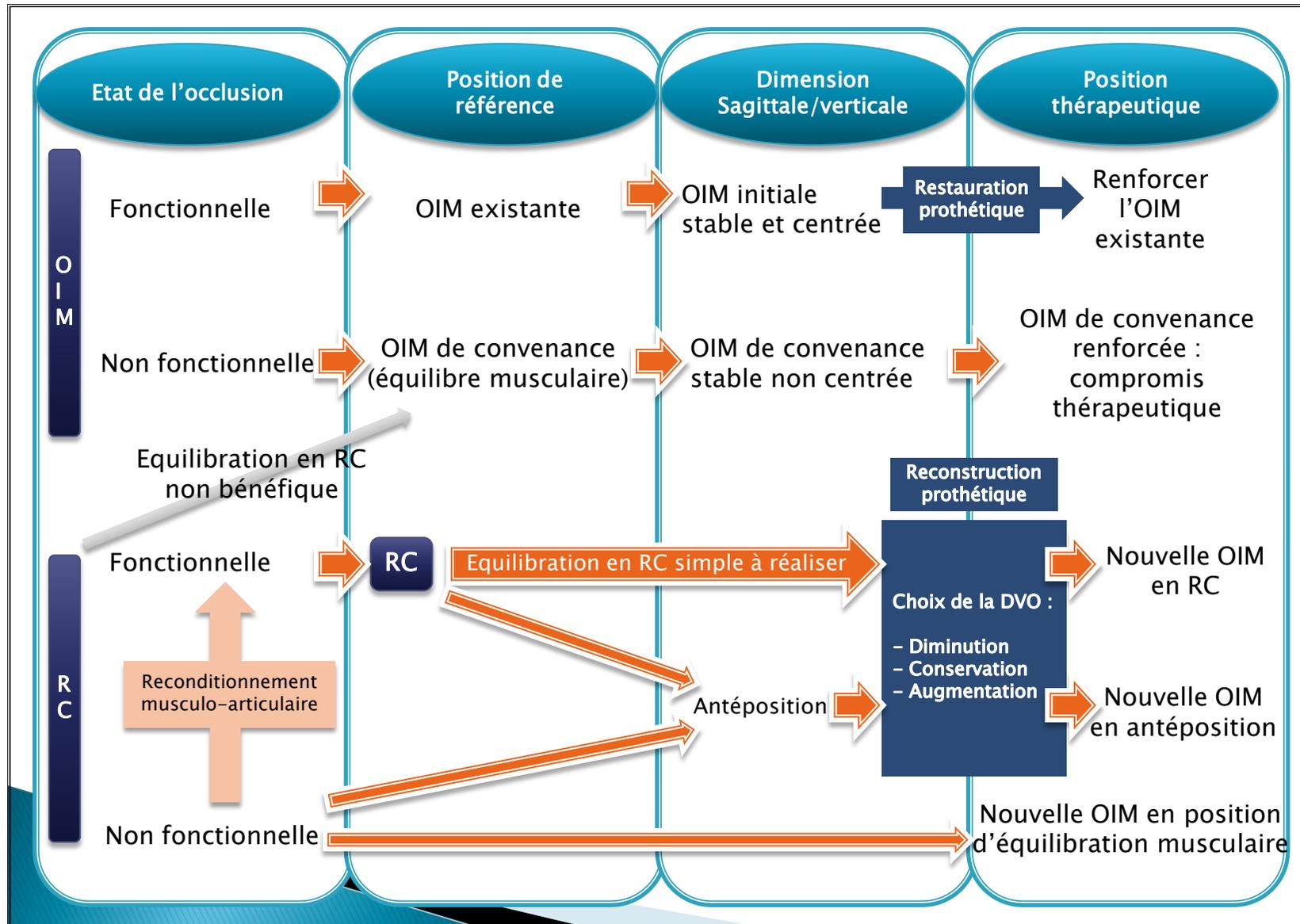


Figure 8 : Rationnel de décision pour l'établissement de la position thérapeutique [63,64].

1.1.2.4. Les fonctions de l'occlusion

La trilogie "centrage, calage, guidage" définit simplement, et dans un ordre hiérarchique précis, des rapports occlusaux induisant :

- une position mandibulaire de référence non contraignante (centrage): La mandibule, dans une position imposée par l'OIM, doit être dans une situation "orthopédiquement stable" et centrée. Les ATM doivent être ainsi capables d'absorber les contraintes sans risquer de "pincement articulaire", et les muscles sollicités dans des conditions synergiques optimales [13,63].
- une stabilité dentaire et mandibulaire durable (calage): L'occlusion en OIM doit stabiliser chaque couple dentaire antagoniste et, globalement, la mandibule. Le calage occlusal signifie donc, la stabilité de la mandibule contre le maxillaire; la stabilité de chaque dent avec son antagoniste (stabilité interarcades) et la stabilité de chaque dent avec les dents adjacentes (stabilité intra-arcades) [13,63].
- une direction des mouvements mandibulaires symétriques vers l'avant (guidage): La cinématique mandibulaire est très influencée par les contacts occlusaux survenant en position mandibulaire excentrée. Lorsque ces contacts sont à prédominance antérieure, ils définissent une fonction de guidage optimisée (les contacts dentaires forment des bornes qui protègent les ATM et contrôlent l'activité musculaire par voie proprioceptive) [13,63].

Ces trois fonctions occlusales dépendent directement de l'état de l'OIM résiduelle, de la différence transversale OIM/ORC et des dimensions verticales DVO/DVR.

1.2. La cinématique mandibulaire

La cinétique des mouvements mandibulaires est définie par sa position, sa vitesse et son accélération, et ces mouvements sont causés par des forces actives (musculaires) et passives (articulation et ligaments). Il en résulte que ces forces génèrent une accélération qui déplace la mandibule dans les six degrés de liberté par rapport au crâne (Figure 9) [89].

La plupart des mouvements des ATM sont des mouvements complexes qui ont trois composantes :

- **Les mouvements de rotation,**
- **Les mouvements de translation,**
- **Les mouvements combinés [3].**

Il Le diagramme de Posselt permet de définir l'enveloppe maximale des déplacements mandibulaires, il est obtenu en enregistrant dans les trois plans de l'espace (pantographie) le déplacement du point interincisif mandibulaire lors des mouvements limites de la mandibule (Figure 9) [13].

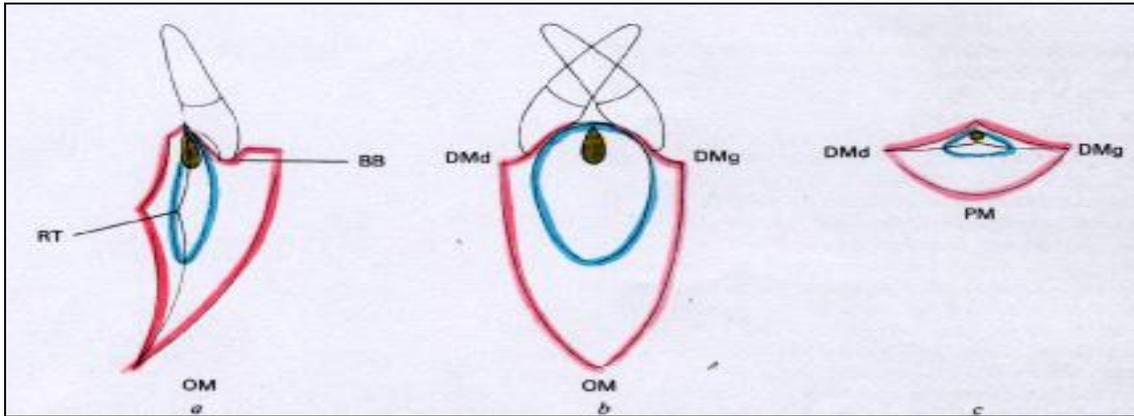


Figure 9 : Le diagramme de Posselt (RT: rétrusion terminale, OM: ouverture maximale, BB: Bout à bout incisif, DM: diduction maximale, PM: protrusion maximale) [80].

L'analyse des mouvements de diduction, à direction centrifuge, a fait naître les termes de "travaillant" pour désigner l'hémi-arcade maxillaire vers laquelle se dirige la mandibule et de "non travaillant" pour l'hémi-arcade du côté opposé. De plus, la terminologie actuellement adoptée qualifie le condyle "travaillant" de pivotant alors que le condyle "non travaillant" est nommé orbitant [58].

- **Condyle orbitant (droit)** : réalise un déplacement en deux temps, différents en direction et en durée (Figure 10 et 11) :
 - **Mouvement transversal immédiat (MTI)** qui désigne la première phase à composante transversale et interne du déplacement en diduction ("immediate side shift" des anglo-saxons).
 - **Mouvement transversal progressif (MTP)** correspondant à la deuxième phase du mouvement à composante sagittale interne ("Progressive Side Shift" des anglo-saxons) [58].

- **Condyle pivotant (gauche)** : réalise lors d'une latéralité centrifuge, ce que l'on appelle le mouvement de Bennet (ou mouvement de Lauret lors d'une latéralité centripète) qui est dissocié en deux phases correspondant aux deux phases du condyle orbitant :
 - **Mouvement initial de Bennett (MIB)** correspondant au MTI du côté opposé orbitant au niveau de l'amplitude transversale.
 - **Mouvement terminal de Bennett (MTB)** désignant la deuxième phase du mouvement, correspondant au MTP [58].

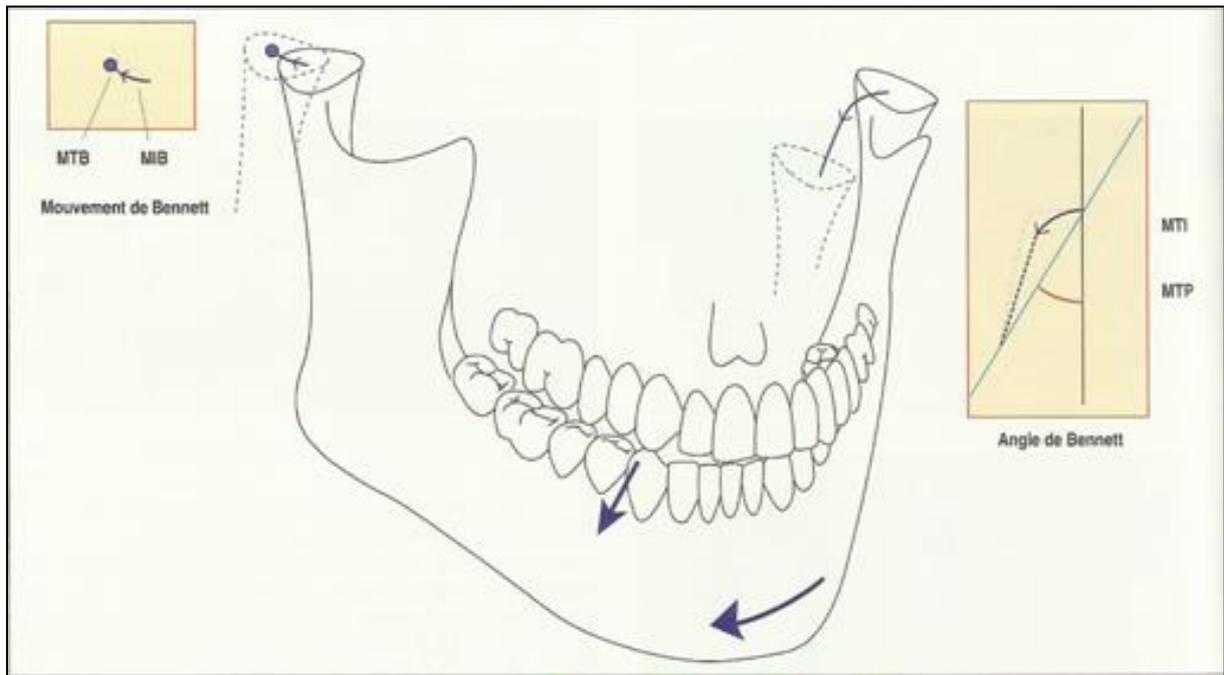


Figure 10 : Trajets condyliens et terminologie au cours d'une diduction droite (mouvement centrifuge) [58].

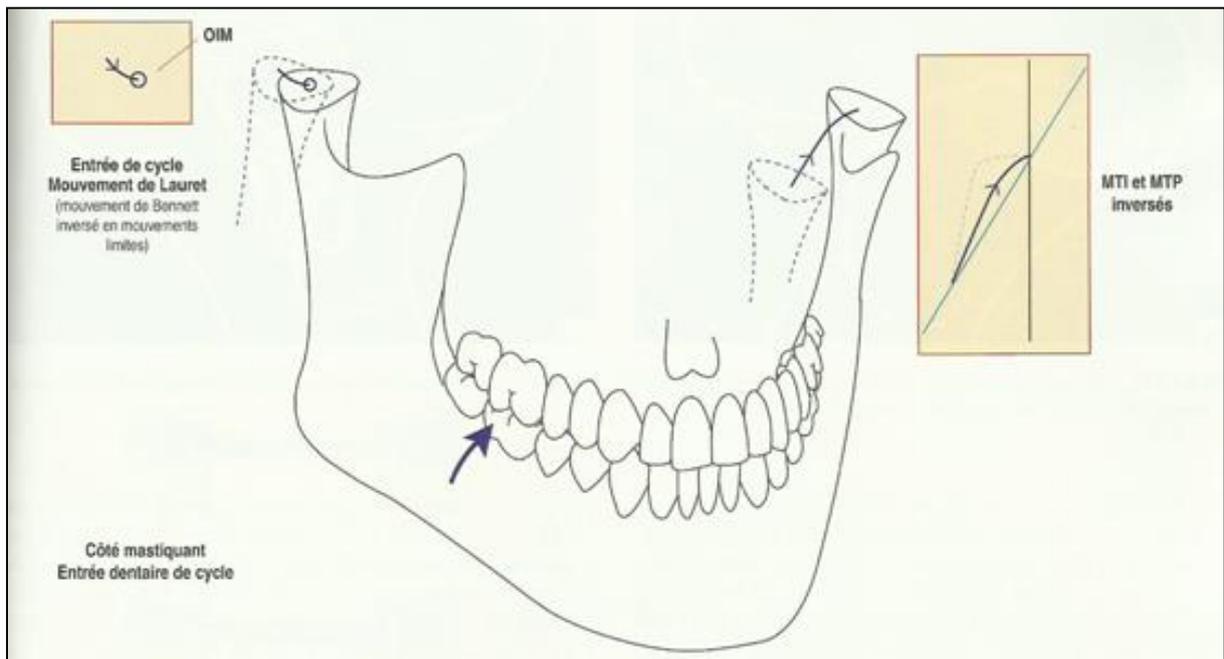


Figure 11 : Cinématique condylienne lors d'une entrée de cycle (mouvement centripète) [58].

1.3. Les simulateurs mécaniques

Les prothèses étant réalisées au laboratoire, il est nécessaire, pour assurer leur intégration fonctionnelle sans retouches excessives, de simuler l'occlusion statique et cinématique du patient. C'est la simulation de l'occlusion. Un simulateur est un dispositif mécanique sur lequel il est possible de fixer, puis d'affronter, les moulages. Pour toute réhabilitation prothétique, il est toujours indispensable de fixer les moulages sur un simulateur. Le travail "moulage à la main" est à proscrire [63].

Sous le terme de simulateur sont regroupés des matériels de conceptions très diverses, allant de l'occluseur à charnière, à l'articulateur entièrement adaptable et aux modèles informatiques. La capacité de ces dispositifs à simuler, de façon optimale, la cinétique mandibulaire humaine est très inégale [58].

1.3.1. Les occluseurs

Bien que l'occluseur ne présente que peu d'intérêt, il est souvent utilisé en laboratoire de prothèse pour la réalisation de restaurations prothétiques de petites étendues ne participant pas au guidage (guidage canin fonctionnel), dans le cas contraire, un montage sur articulateur sera conseillé. En effet, par définition, un occluseur est une simple charnière (Figure 12). Celle-ci doit être parfaitement rigide n'autorisant aucune translation. La position relative des moulages par rapport à la charnière de l'occluseur n'est pas analogue à la situation des arcades dentaires par rapport aux ATM. Le mouvement de rotation effectué autour de la charnière de l'occluseur ne reproduit donc en rien le mouvement d'abaissement-élévation de la mandibule [63].

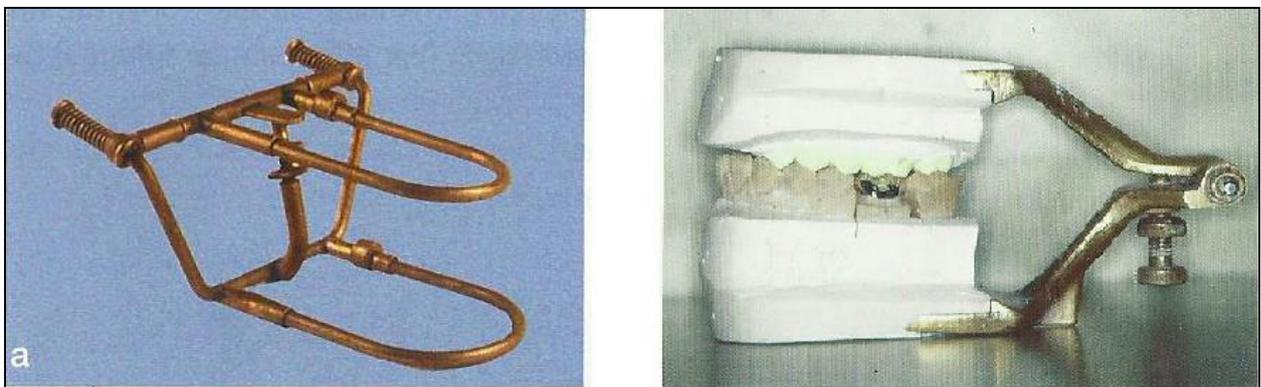


Figure 12 : Exemples d'occluseurs [63].

1.3.2. Les articulateurs

L'articulateur est un dispositif mécanique supportant les moulages maxillaire et mandibulaire et simulant les relations occlusales dans différentes positions mandibulaires en permettant la reproduction mécanique plus ou moins précise de la cinématique mandibulaire (Figure 13) [58,63].



Figure 13 : exemples d'articulateurs (à gauche : Quick Master, à droite : SAM) [15].

Comme l'occluseur, c'est une charnière rigide, mais il répond à trois critères supplémentaires :

- **Analogues** : La relation spatiale de l'axe de rotation du simulateur par rapport aux arcades dentaires est proche de celle du patient. Grâce à cette analogie, l'articulateur peut simuler le mouvement d'abaissement-élévation mandibulaire. Bien qu'il soit illusoire de les comparer à de véritables structures analogues des articulations temporo-mandibulaires [15,63].
- **Butée antérieure** : Le simulateur comporte une butée "table antérieure" (parfois programmable) et une tige antérieure réglable. Ce système permet de définir la dimension verticale et d'éviter l'usure des modèles [63].
- **Cinématique** : Le simulateur est capable de reproduire les mouvements de propulsion et de diduction avec plus ou moins de précision selon ces potentialités de réglages [63].

Il existe deux types de conceptions d'articulateur :

- **Les articulateurs de type ARCON** : qui sont le reflet de la situation naturelle. Comme dans la réalité, les boules condyliennes font partie de la branche inférieure alors que les boîtiers condyliens sont, quant à eux, solidaires de la branche supérieure. Ces articulateurs sont les plus répandus avec par exemple le Whip-Mix, le SAM, le Denar [2]...
- **Les articulateurs NON-ARCON** : qui, au contraire, ont les boules condyliennes solidaires de la branche supérieure et les boîtiers condyliens sur la branche inférieure. C'est le cas du Dentatus. Ils permettent, du fait que l'on ne mobilise que la branche supérieure d'un articulateur, une analogie entre les mouvements des sphères condyliennes et ceux de la mandibule. Ils sont déconseillés pour réaliser un changement de DVO car l'augmentation ou diminution de la DV provoquera une élévation/diminution de la pente condylienne relative [2,9].

Les articulateurs sont le moyen privilégié de simulation externe de la cinétique mandibulaire pour une analyse occlusale ou une réalisation prothétique [58].

- Les articulateurs non adaptables: Ces articulateurs n'ont pas de possibilité de réglage de la pente condylienne et du mouvement de Bennett, ces valeurs sont uniques (par exemple pente condylienne 40° et angle de Bennett rectiligne à 15°) [63].
- Les articulateurs semi-adaptables (ASA): Ces articulateurs reproduisent, le départ, la direction, et l'extrémité des déplacements condyliens mais pas le trajet intermédiaire. L'inclinaison du trajet condylien est figurée par un déplacement rectiligne alors qu'en réalité, la trajectoire est curviligne [9].
 - **ASA de première génération** : Ils permettent une individualisation de la pente condylienne et de l'angle de Bennett, mais les trajectoires condyliennes ne sont que rectilignes [63].
 - **ASA de deuxième génération** : Ils permettent, en plus des réglages précédents, de réaliser des trajectoires condyliennes curvilignes [63].
 - **ASA de troisième génération** : Ils permettent, en plus des réglages précédents, d'individualiser les mouvements de rétractions [63].
- Les articulateurs adaptables: Ce sont les articulateurs les plus précis. Tous les réglages précédemment décrits sont possibles mais la distance intercondylienne est entièrement ajustable. Ils reproduisent le détail des mouvements limites, y compris les déplacements latéraux initiaux et progressifs, ainsi que la courbure et la direction du trajet condylien [9,15].

1.3.2.1. Description des articulateurs

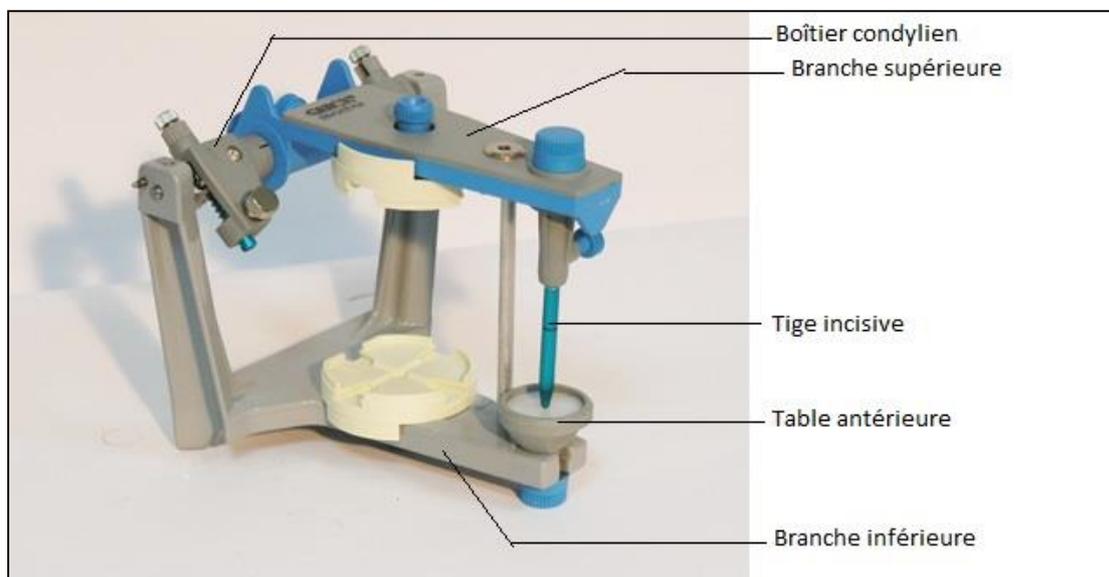


Figure 14 : Description de l'articulateur Quick Master

1.3.2.2. L'arc facial (arc de transfert) et table de montage

Lors du montage, il est nécessaire de connaître l'orientation spatiale du maxillaire afin de pouvoir positionner le modèle maxillaire au sein de l'articulateur. Pour ce faire, il existe deux possibilités, soit on utilise une table de montage matérialisant l'angulation entre le plan de

Camper et le plan axio-orbitaire réalisant un positionnement arbitraire du modèle maxillaire, soit on utilise un arc facial. L'arc facial est un dispositif propre à chaque articulateur, conçu de telle sorte que son plan soit superposable à celui d'un plan de référence, souvent le plan axio-orbitaire. Il permet de situer le modèle maxillaire par rapport à ce plan et respecte ainsi la conception anatomique de l'articulateur. Le modèle maxillaire se situe ainsi dans la même position spatiale que son original par rapport au crâne du patient. Il est toujours indiqué [9,15,63].

1.3.3. Montage des modèles

1.3.3.1. Prise d'empreinte et coulée des modèles

Après une prise d'empreinte rigoureuse des arcades, les modèles sont coulés. Idéalement, la coulée des modèles se réalise en deux étapes. Il est possible de réaliser deux types de socle:

- **Les socles à double base engrenés ou "split-cast"** : Ce type de socle permet de désolidariser le modèle de l'articulateur; un système d'emboîtement par encoches assure un parfait repositionnement sur la base. Ils permettent de contrôler la reproductibilité des cires de relation centrée (RC) et de comparer l'occlusion d'intercuspidie maximale (OIM) à l'occlusion de relation centrée (ORC).

- **Secteurs postérieurs mandibulaires démontables** : Le modèle mandibulaire est préparé de manière à pouvoir être segmenté en trois parties, les deux secteurs postérieurs prémolo-molaires sont amovibles et stabilisés par un système de pins parallèles (Dowelpins de PINDEX® par exemple). Ce type de coulée permet une appréciation instantanée de la dimension verticale et des possibilités de protection antérieure [2,13,63].

1.3.3.2. Localisation et montage du modèle maxillaire

Le montage des modèles nécessite la préparation à la fois de l'articulateur et des modèles. Puis l'élément de positionnement (arc facial ou table de montage) est fixé à l'articulateur avec le modèle maxillaire. Pour finir, du plâtre est positionné à la fois sur le modèle et sur la galette de montage (Figure 15) [13,15].

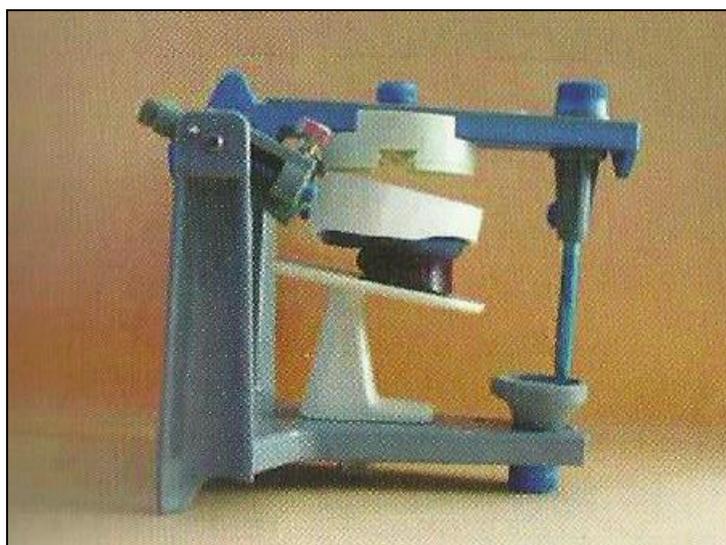


Figure 15 : Montage du modèle maxillaire à l'aide d'une table de montage [15].

L'utilisation d'un arc facial à embouts auriculaires (Figure 16), permet une localisation arbitraire de l'arcade maxillaire par rapport au plan axio-orbitaire. Mais le positionnement du modèle maxillaire ainsi obtenu est toujours plus précis que celui obtenu avec une table de montage [13,64].

L'utilisation d'un arc facial anatomique est indiquée lorsque la cinématique mandibulaire demande à être plus précise (béance antérieure, variation de dimension verticale). Il nécessite la localisation de l'axe charnière réel, soit de manière anatomique, soit de manière réelle [64].

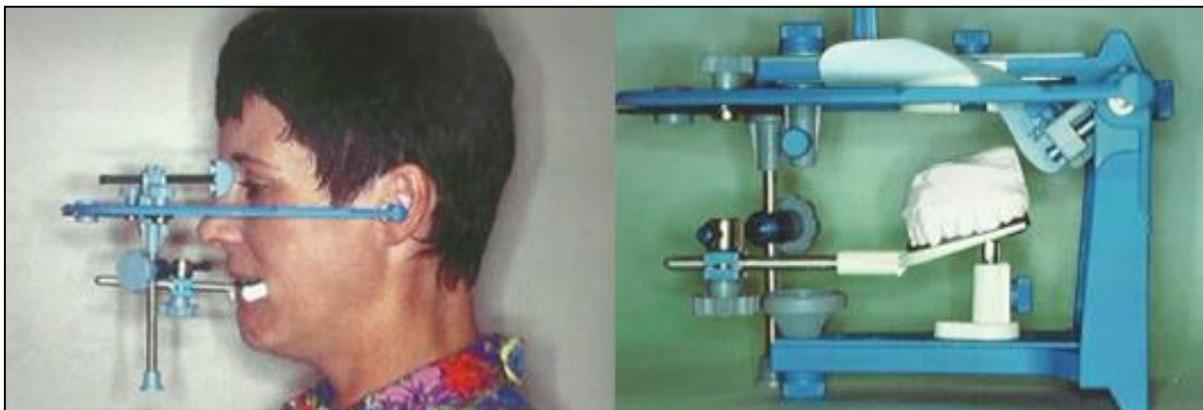


Figure 16 : Arc facial en place sur le patient puis sur l'articulateur [15].

1.3.3.3. Montage du modèle mandibulaire

Il existe deux possibilités pour positionner le modèle mandibulaire, soit en OIM soit en RC, en fonction de l'état des structures dentaires et du diagnostic/traitement recherché [13,15,63].

Il est indispensable que ces étapes soient réalisées au cabinet. Les risques d'erreurs et d'imprécisions sont trop importants si les mesures prises sur le patient sont transportées vers un laboratoire distant par un coursier plus ou moins attentionné. De plus, le traitement de l'occlusion est une chaîne de précision qui demande du temps et de la rigueur. La moindre erreur risque de compromettre le résultat final. Pour finir, chaque étape doit être validée avant de passer à l'étape suivante [13,58].

1.3.4. Programmation

La programmation des boîtiers condyliens permet de s'approcher au plus près de la cinématique condylienne du patient [15,58].

Lorsqu'ils sont programmés, c'est par l'enregistrement des mouvements excentriques, de propulsion et de latéralité, demandés en exécution volontaire aux patients que cette programmation est réalisée. Ces enregistrements peuvent être de deux types : intrabuccaux (clés interocclusales/check-bites), extrabuccaux (axiographie/pantographie) et permettent de régler les paramètres suivants:

- **l'angulation de la pente condylienne** (orientation générale de la sortie de cycle),
- **la "totalité de l'angle de Bennett"**:
 - amplitude du mouvement transversal immédiat (début de sortie de cycle),

- angulation du mouvement transversal progressif (orientation sagittale de sortie de cycle) [58].

- Le mouvement de Bennett ou de Lauret.

Dans certains cas cliniques (restauration de petite étendue ne participant pas aux guidages), une programmation arbitraire mais raisonnée est suffisante [15].

1.3.4.1. Enregistrements intrabuccaux

- Type check bites

Le matériau utilisé comme support d'enregistrement des "clés occlusales" peut être une cire dure (type Moyco), un silicone extra-dur ou tout autre matériau spécifique à l'enregistrement de l'occlusion [58].

Une technique dérivée des enregistrements par clés interocclusales peut être utilisée pour régler la pente condylienne et les paramètres fonctionnels de l'articulateur. Cette technique repose sur l'enregistrement des deux phases principales de la diduction, à défaut d'en sérier tous les temps:

- deux enregistrements effectués avec une induction manuelle de l'opérateur, droite et gauche, au début de la diduction (3 millimètres de décalage au niveau incisif) permettent d'enregistrer le MTI correspondant à l'amplitude de la phase initiale de la sortie de cycle du côté mastiquant;
- deux enregistrements, droite et gauche, en diduction extrême en bout à bout canin (7 à 8 mm) permettant le réglage du mouvement transversal progressif (MTP) et la pente condylienne [58].
- il est aussi possible d'obtenir la valeur des pentes condyliennes droites et gauche à l'aide d'une seule cire de propulsion.

Les enregistrements en latéralité permettent de régler les paramètres controlatéraux. Ainsi, les enregistrements en latéralité droite permettent le réglage des deux parties de l'angle de Bennett (MTI et MTP) du côté gauche, de la pente condylienne du côté gauche et le réglage du mouvement de Lauret/Bennett du côté droit. Pour finir, les enregistrements sont ensuite positionnés sur le modèle mandibulaire, la branche supérieure est refermée et les paramètres sont réglés jusqu'à obtenir un contact entre les sphères condyliennes et les différentes parties réglables du boîtier condylien (Figure 17) [58].



Figure 17 : Cires de latéralités en place sur le patient puis sur l'articulateur D5A (DENAR®) [58].

- Boîtiers condyliens individualisés

Pour certains articulateurs, il est possible d'enregistrer "mécaniquement" la cinématique mandibulaire afin de sculpter les boîtiers condyliens selon cette cinématique ; c'est le cas du Combi (DENAR®). Dans un premier temps, la cinématique mandibulaire est enregistrée au moyen de résine chémo-polymérisable, puis dans un deuxième temps, les boîtiers condyliens sont modelés avec de la résine, selon ces enregistrements (figure 18) [15].

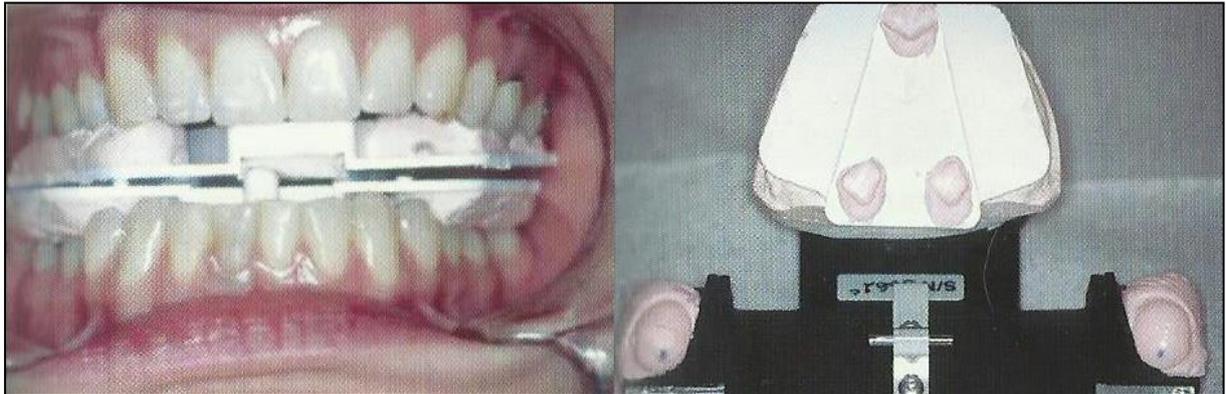


Figure 18 : Enregistrement de la cinématique mandibulaire et programmation de l'articulateur Combi (DENAR®) [15].

1.3.4.2. Enregistrements extrabuccaux

Plusieurs dispositifs permettent d'obtenir les différents paramètres nécessaires aux réglages d'un articulateur.

Panoramique: En traçant une droite joignant les deux sommets des fosses mandibulaires des ATM droite et gauche, puis une sécante sur chaque ATM qui relie le sommet de la fosse temporale à la partie la plus postérieure du tubercule articulaire, l'intersection de la droite et de la sécante donne la valeur approximative de la pente condylienne (Figure 19). Pour pallier les erreurs d'approximation, celle-ci est arrondie au nombre inférieur en prothèse fixe et arrondie au nombre supérieur en prothèse amovible [15].

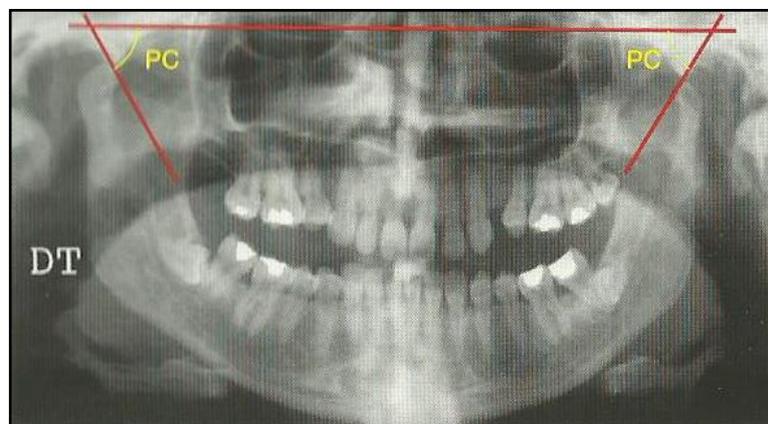


Figure 19 : Calcul de la pente condylienne à l'aide d'une radiographie panoramique [15].

L'axiographe: Une fourchette occlusale permet de fixer l'arc mandibulaire qui viendra tracer par l'intermédiaire de stylets, la cinématique mandibulaire sur des drapeaux fixés à l'arc maxillaire afin de déterminer la pente condylienne. Pour les angles de Bennett, les stylets sont remplacés par d'autres dispositifs, de type micromètres à tambour qui, lors d'une latéralité droite, permettront de régler l'angle de Bennet gauche (Figure 20). Un type d'axiographe correspond généralement à un type d'articulateur [15].



Figure 20 : Axiographe (quick axis) sur le patient [15].

Le pantographe: permet d'enregistrer les trajectoires condyliennes dans les trois plans de l'espace. Ces systèmes peuvent être mécaniques ou numériques et correspondent généralement à l'articulateur qui doit être programmé (exemple: articulateur DSE et pantographe électronique Pantronic (DENARD®), Figure 21). La lecture des résultats de l'enregistrement permet de choisir le boîtier condylien, les ailettes de Bennett et leurs différents réglages afin de correspondre au patient. Il est donc capable de reproduire plus précisément la cinématique condylienne du patient [15].

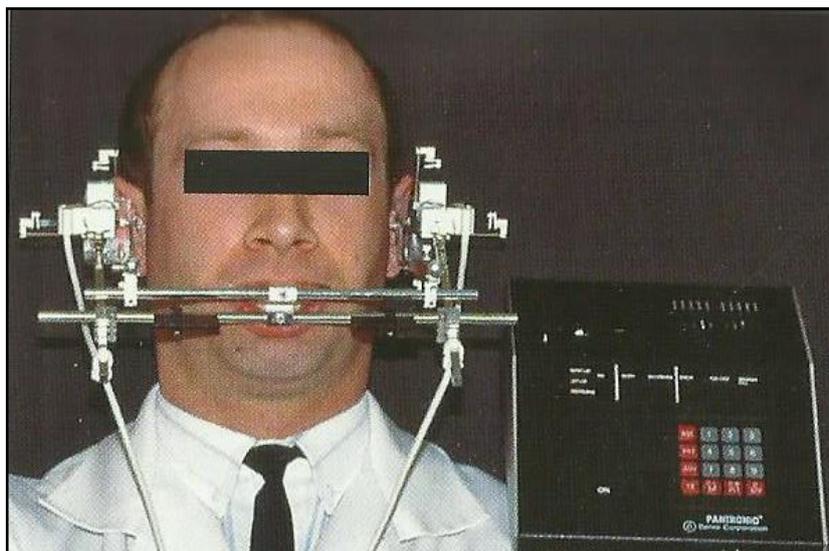


Figure 21 : Pantographe (Panatronic) en place sur le patient [15].

1.3.5. Limites des simulateurs mécaniques

La simulation mécanique produite par les simulateurs mécaniques est très éloignée des conditions biologiques réelles du patient. En effet, les mouvements produits par les simulateurs mécaniques sont limités par l'enceinte du boîtier condylien, qui reste invariable au cours du temps/mouvement, et qui ne peut pas reproduire les mouvements masticatoires qui sont directement liés aux actions des muscles et à la résilience des tissus mous et du disque articulaire. De plus, d'un point de vue occlusal, les contacts centrifuges des mouvements de latéralité ne sont pas les mêmes que les contacts centripètes des mouvements fonctionnels tels que la mastication. Enfin, de par l'impossibilité de reproduire la dépressibilité desmodontale sur les modèles en plâtre, il est impossible de reproduire les conditions réelles de l'occlusion dynamique. Il existe aussi d'autres problèmes liés à la procédure et aux matériaux de montage des modèles (déformation des empreintes, contraction des plâtres...) [57].

De par ces limites, la reproduction des contacts dynamiques lors des mouvements de latéralité semble peu fiable. Dans ce sens, Tamaki et col. ont réalisé une étude comparative entre des mordus en cire et un articulateur mécanique programmé à l'aide d'un axiographe numérique. Ils rapportent que l'articulateur mécanique ne reproduit que seulement 82% des contacts protrusifs et que 90% des contacts en latéralité. De plus, l'articulateur mécanique a tendance à créer de nouveaux contacts. [57]

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

2. Matériels et méthodes

L'objectif de ce travail a été, sur la base de la littérature scientifique, d'identifier les différents types de simulateurs virtuels en s'intéressant particulièrement aux articulateurs virtuels complètement adaptables. De plus, leurs principes de fonctionnement ainsi que les différentes possibilités diagnostiques et thérapeutiques présentes et futures seront explorées.

La base de données électronique "PubMed" a été utilisée pour la recherche d'article. La combinaison des mots clefs utilisés a été : "virtual articulator", "jaw relation records/methods", "occlusion and CAD/CAM" et "CBCT".

De plus, les firmes dont sont issus les systèmes de CFAO dentaires ont été contactées et/ou leur site internet a été visité afin de vérifier l'existence de nouveaux dispositifs qui n'auraient pas encore fait l'objet de publications et d'obtenir de leur part de plus amples informations.

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

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

3. Résultats

L'étude des publications d'intérêt a permis, de retracer la jeune histoire des simulateurs virtuels, de leur donner une définition, ainsi que d'identifier les différents dispositifs numériques et de comprendre leurs fonctionnements respectifs. Puis d'autre part, elle a permis de déterminer les possibilités diagnostiques et thérapeutiques actuelles et envisageables des différents systèmes.

3.1. Simulateurs virtuels

3.1.1. Historique

La CFAO (Conception Fabrication Assisté par Ordinateur) fut introduite dans la profession dentaire en 1971 par le Dr François Duret qui deux ans plus tard publia le premier ouvrage consacré à la CFAO dentaire et médicale sous la forme d'une thèse intitulée «Empreinte optique» [12,16].

De l'introduction de la CFAO en dentisterie est née la nécessité de concevoir des outils de simulation virtuels. En effet, à leur début, les systèmes de CFAO n'offraient qu'une possibilité limitée de simulation. Par conséquent, d'un point de vue occlusal, la conception des restaurations produites était équivalente à la conception d'un élément prothétique sur occluseur. Ces systèmes ne pouvaient donc pas prendre en considération les mouvements fonctionnels et le réglage occlusal dynamique des restaurations devait être réalisé au fauteuil ou sur articulateur. En d'autres termes, les restaurations avaient une très bonne adaptation d'un point de vue statique, en OIM, mais nécessitaient tout de même un réglage de l'occlusion dynamique au fauteuil. De plus, comme il a été présenté précédemment, les méthodes conventionnelles de montage sur articulateur présentent certains défauts et certaines limites. Les simulateurs virtuels ont donc été créés pour palier ces problèmes. En effet, les premières tentatives « d'articulation virtuelle » datent des années 1980 avec notamment l'Access Articulator du Dr Duret, depuis ces outils n'ont cessé de se développer mais peuvent présenter certains défauts des simulateurs mécaniques. Les simulateurs virtuels sont des programmes informatiques qui permettent, tout comme les simulateurs mécaniques, de positionner les modèles virtuels dans l'espace et de simuler les relations occlusales statiques et dynamiques, permettant ainsi d'évaluer les modifications occlusales à réaliser lors de la phase de CAO (Conception Assisté par Ordinateur) [27,49,52,57,75,79,81,92].

3.1.2. "Occluseurs" virtuels

Les premiers systèmes de FAO (fabrication assisté par ordinateur) permettaient de simuler la position d'intercuspidie maximale (position statique) et non l'intercuspidation (mouvements d'accès à l'OIM) et de recréer les structures dentaires à partir de cette position (Figure 22). Pour ce faire, le système informatique utilise le principe de modélisation "biogénérique" qui consiste à recréer les surfaces dentaires absentes à partir des surfaces dentaires résiduelles. La conception d'un élément prothétique peut se faire selon quatre types de modélisation "biogénérique":

- **Base de données**, l'élément prothétique est conçu à partir d'une morphologie coronaire préétablie qui est adaptée automatiquement au niveau de la préparation (couronne),

- **Corrélation**, les structures résiduelles servent à guider la conception des structures prothétiques (inlay),
- **Réplication ou reproduction** qui consiste à prélever une unité morphologique et à la transposer sur l'élément prothétique (conception d'une 11 à partir d'une 21) [20,57,68].
- **FGP**. La technique du FGP (Functionally Generated Path) est une méthode introduite par Meyer, qui consiste à l'enregistrement intrabuccal des mouvements tridimensionnels de la mandibule. Elle est utilisée pour la restauration (couronne, bridge et onlay) des secteurs postérieurs (prémolo-molaire) en présence d'une fonction canine suffisante. En technique conventionnelle, la fonction est enregistrée sur une table sectorielle formée de cire malléable qui est positionnée sur la/les préparation(s). Puis le patient est amené à réaliser plusieurs mouvements mandibulaires sous le contrôle du praticien. L'avantage de cette technique est qu'elle permet de prendre en considération la mobilité desmodontale, les déterminants antérieurs et postérieurs, la torsion de la mandibule, l'influence de l'activité musculaire et le mécanisme de contrôle proprioceptif. Son application sur un simulateur virtuel nécessite la réalisation de trois empreintes:
 - une empreinte optique de la/les préparation(s) et des dents adjacentes,
 - une empreinte optique d'un mordue occlusal permettant la reconstruction de la dent antagoniste,
 - et une empreinte optique du FGP. [24,33,37,51,84,87].

Ce type de simulateur est indiqué pour les restaurations de faible étendue ne participant pas à la fonction (onlay, couronne unitaire en présence d'un guide antérieur favorable).

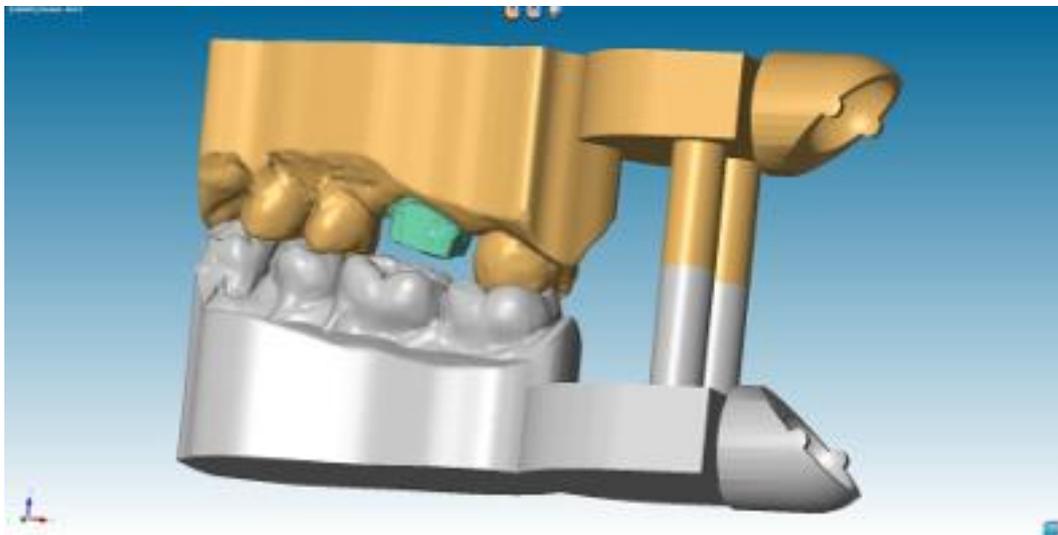


Figure 22 : Exemple d'occluseur virtuel de dentalwings [97].

3.1.3. Articulateur virtuel

Dans les cas où les reconstructions sont de grande étendue et/ou participent à la fonction, le principe de modélisation "biogénérique" est insuffisant pour concevoir, à lui seul, les structures dentaires. Il est donc nécessaire d'utiliser un outil de simulation de la cinématique mandibulaire. L'articulateur virtuel, de par la simulation des mouvements qu'il procure, permet de limiter l'espace disponible à la modélisation "biogénérique"[68].

On peut considérer qu'il existe une classification des articulateurs virtuels en fonction du procédé par lequel ils simulent la cinématique mandibulaire et donc l'occlusion dynamique, soit par modélisation mathématique, on parlera donc d'articulateur virtuel mathématique; ou alors grâce à la cinématique du patient qui aura été numérisée au préalable puis couplée aux modèles virtuels, on parlera ici d'articulateur virtuel adaptable ou complètement adaptable. Pour éviter toute confusion avec les articulateurs virtuels mathématiques adaptables, les termes "complètement ou totalement" ont été ajoutés aux articulateurs virtuels adaptables "non mathématiques", tout au long de ce travail. [28,42,79,81,82].

3.1.3.1. Simulation mathématique

Ces articulateurs ont été développés de deux manières, soit à partir d'un algorithme informatique permettant d'animer une structure totalement virtuelle (Figure 23) ou à partir d'un articulateur mécanique dont la totalité des surfaces des pièces qui le composent auront été scannées au préalable pour être animées dans l'espace virtuel (Figure 24). En effet un algorithme informatique permet d'animer une structure totalement virtuelle. Ce type d'articulateur est basé sur une simulation mathématique des mouvements d'un articulateur. Les articulateurs virtuels mathématiques sont capables de reproduire les mouvements d'un articulateur mécanique [52,79,81,82].

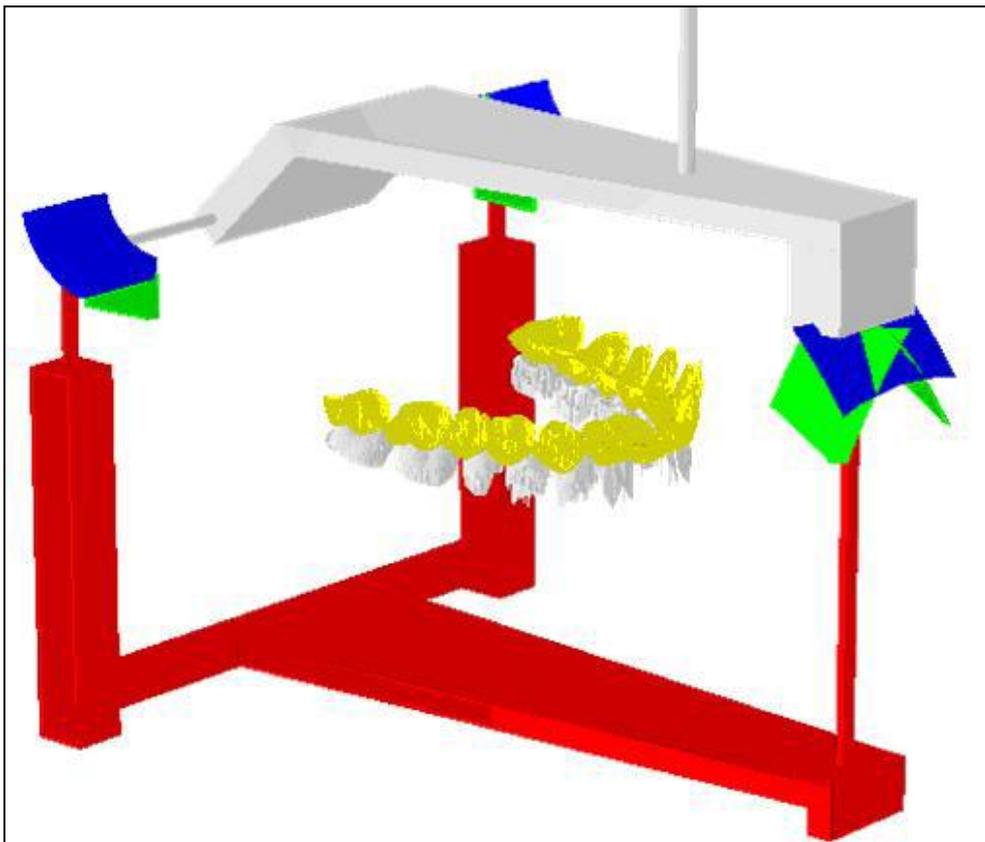


Figure 23 : Articulateur de Szentpétery obtenu à partir d'un algorithme informatique [81].

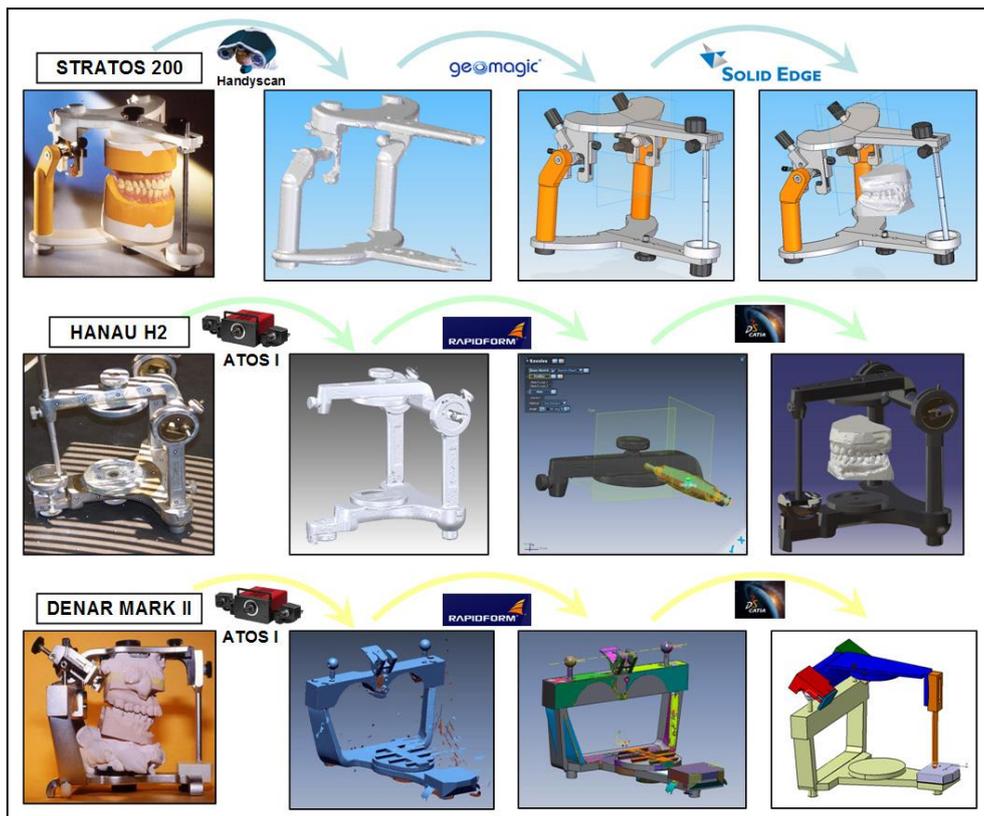


Figure 24 : Prototypage de l'articulateur virtuel à partir d'un articulateur mécanique [81].

La simulation mathématique offre de nouvelles possibilités de réglages qui ne sont pas réalisables sur articulateurs mécaniques, telles que le choix de la courbure de l'angle de Bennett ou encore la possibilité de réaliser des mouvements différents avec les mêmes paramètres (par exemple: lors de l'intercuspidation, il existe différentes trajectoires d'accès à l'OIM; ou encore la possibilité d'animer les modèles en fonction d'un FGP virtuel calculé informatiquement en fonction des paramètres de réglage de l'articulateur) [52,81,82].

Ces possibilités rendent ce type d'articulateur plus flexible que les articulateurs mécaniques. En revanche, de par la simulation mathématique, ces articulateurs fonctionnent grâce à des valeurs moyennes ; par conséquent, il est difficile d'obtenir le mouvement individuel de chaque patient. De plus, ces articulateurs virtuels sont conçus sur le même principe que les articulateurs mécaniques ; il est donc nécessaire de déterminer la position des modèles virtuels au sein de l'articulateur virtuel mathématique. Pour ce faire, il existe trois possibilités:

- Soit les modèles virtuels sont montés sur l'articulateur virtuel mathématique par l'intermédiaire:
 - d'une table de montage standardisée qui est l'équivalent virtuel d'une table de montage physique sur articulateur mécanique (Figure 25),

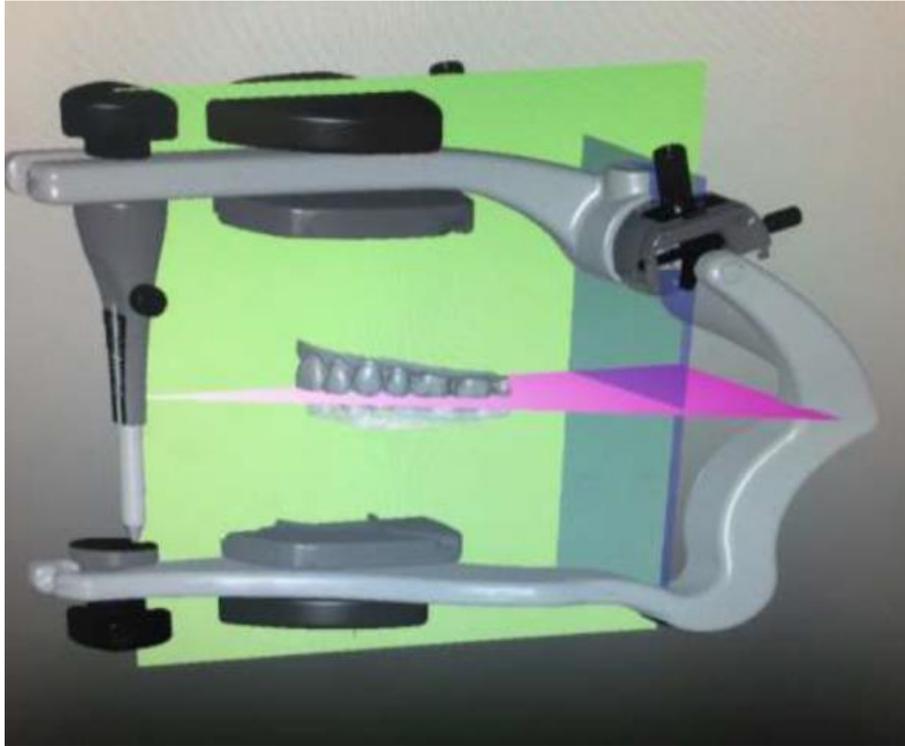


Figure 25 : Articulateur virtuel avec table de montage orientée de 10° par rapport au plan de Francfort [30].

- ou d'une table de montage personnalisée qui positionne le modèle maxillaire en fonction de la distance intercondylienne et de l'âge du patient (Figure 26) [30].



Figure 26 : Articulateur virtuel du logiciel CEREC® 4.2. [100].

- Soit les modèles sont montés à l'aide d'un arc facial, sur un articulateur mécanique équivalent au type d'articulateur virtuel utilisé ; puis la position de ces modèles est scannée soit directement sur l'articulateur mécanique ou alors séparément avec leur embase sur un dispositif de transfert, afin de définir la position des modèles virtuels dans l'articulateur virtuel (Figure 27, 28 et 29),

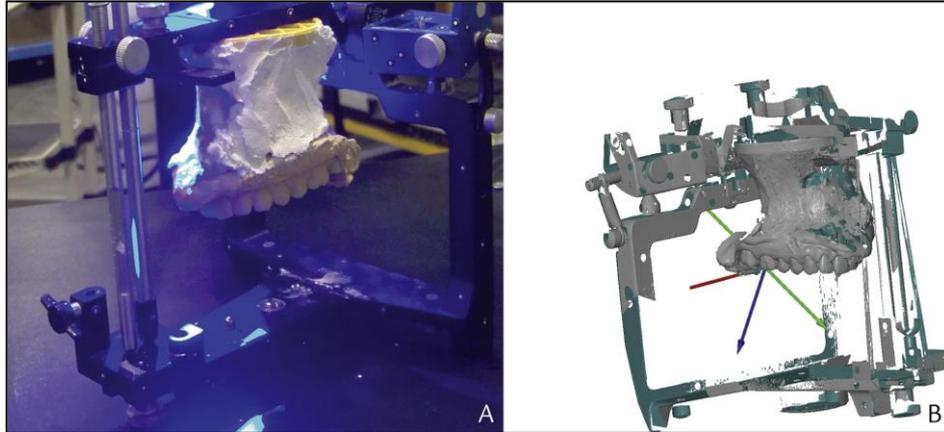


Figure 27 : Montage du modèle maxillaire virtuel à l'aide d'un montage standard sur articulateur mécanique [84].



Figure 28 : Scannage des deux modèles séparément avec le scan 3Shape® (photos du Dr Contrepoiset de Christophe Sireix)

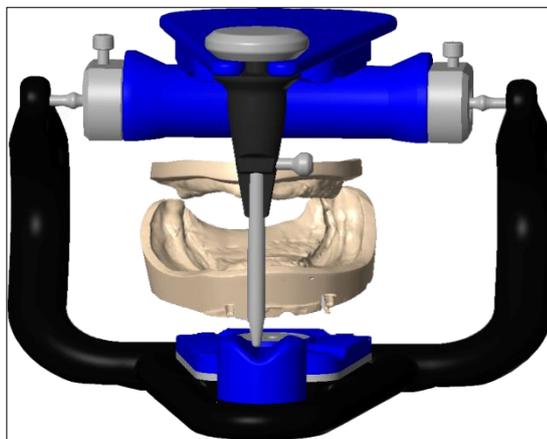


Figure 29 : Modèles sur articulateur virtuel 3SHAPE® (image du Dr Contrepoiset de Christophe Sireix).

- Pour finir, la réalisation d'un arc facial expérimental a permis d'enregistrer la position de l'arcade maxillaire en bouche, ce qui a permis par la suite de la positionner dans l'articulateur virtuel (Figure 30 et 31). Leurs concepteurs ont comparé cette technique à celle du double montage et en ont conclu qu'elle nécessite moins de temps mais que sa précision permettait son application uniquement pour l'analyse orthodontique [30,52, 81,82,83,84,85].

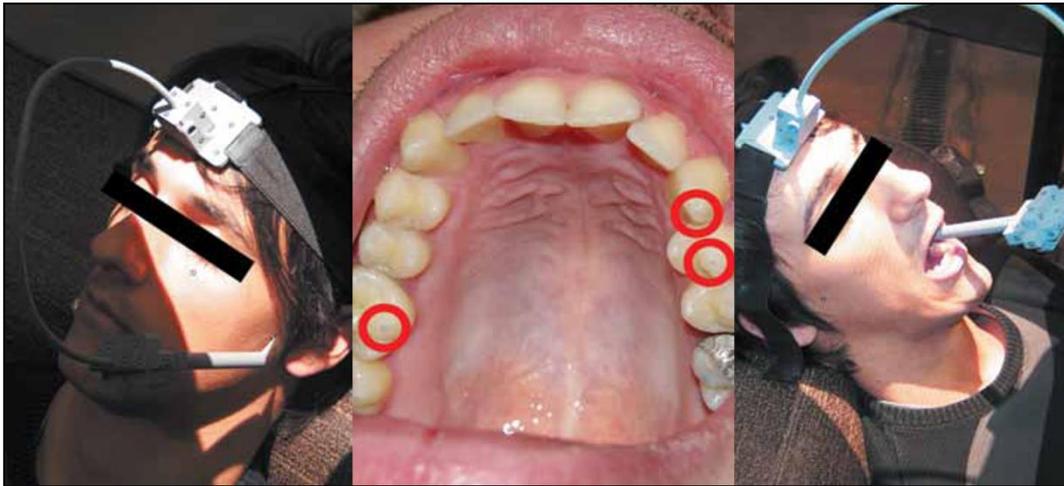


Figure 30 : Localisation sur le patient du plan de référence et de la position du maxillaire par rapport à ce plan à, à l'aide de l'arc facial numérique [83].

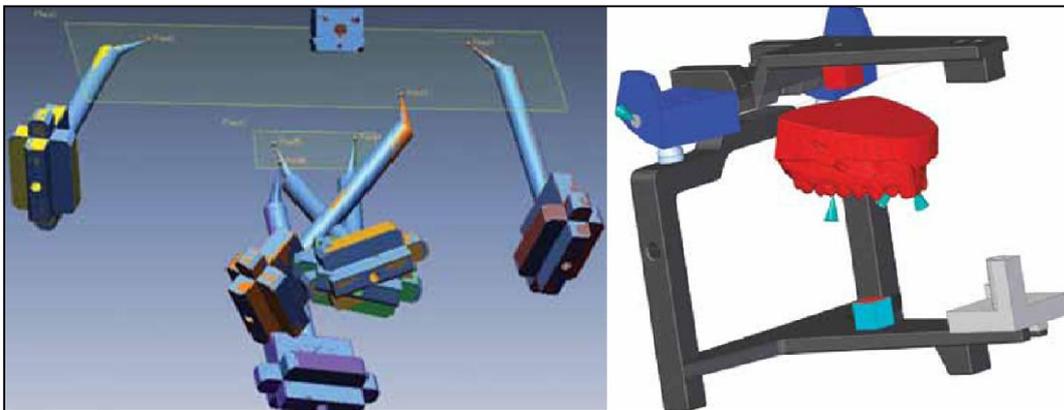


Figure 31: Transfert virtuel des points de référence et positionnement du maxillaire [83].

D'autre par, la société Zirkonzahn commercialise un arc facial alternatif qui ne positionne plus le maxillaire par rapport au plan axio-orbitaire mais par rapport à la ligne aile du nez/tragus et aux traits du visage du patient. De plus, ce système est basé sur le parallélisme du plan d'occlusion avec la ligne aile du nez/tragus (Figure 32).

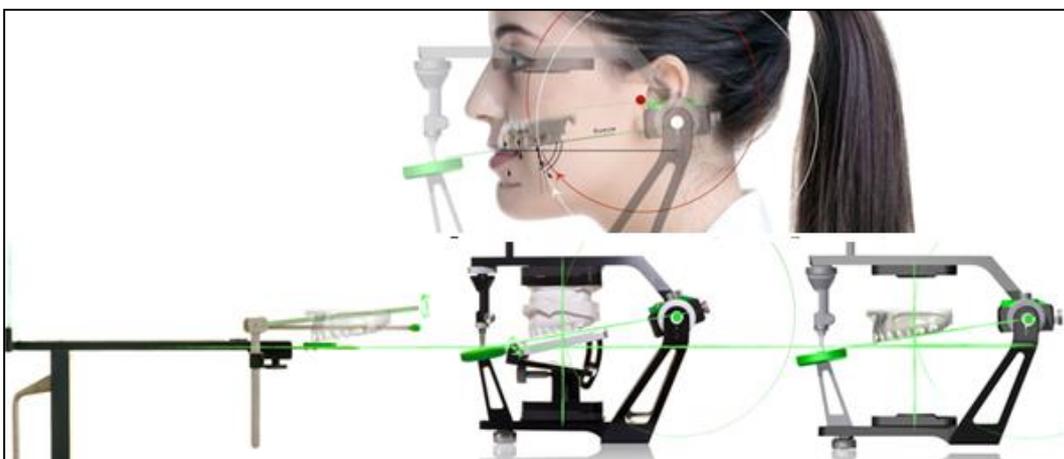


Figure 32 : Schéma de transfert de la position du maxillaire au sein de l'articulateur PS1 de Zirkonzahn® [104].

Pour ce faire, le système comporte l'équivalent d'un arc facial appelé "Plane Finder®" qui est positionné sur la ligne "aile du nez/tragus" alors que le patient adopte la position naturelle de la tête (NHP: natural head position) en regardant dans le miroir du "Plane Finder®". Celui-ci forme un plan parfaitement horizontal par rapport au visage du patient. Il peut à tout moment être retrouvé puisqu'il dépend de la position naturelle de la tête, qui est reproductible. On obtient ainsi un plan de référence pour la définition du plan d'occlusion (Figure 33).



Figure 33 : Patient positionné en NHP au sein du "Plane Finder®" de Zirkozahn®, avec les plans rectilignes d'orientation en place [104].

Puis, une plaque d'enregistrement de l'occlusion (bite tray) est garnie de matériaux d'empreinte permettant de "fixer" la position du maxillaire par rapport au plan de référence du "Plane Finder®"(Figure 34). Lors de cette étape, il est possible pour les patients édentés d'enregistrer directement la hauteur labiale pour la transférer au sein du système. Pour ce faire, une cale sera positionnée sur la plaque d'enregistrement de l'occlusion avant l'enregistrement de la position du maxillaire (Figure 35) [66,104].



Figure 34 : Enregistrement de la position du maxillaire au sein du "Plane Finder" [66].



Figure 35 : Enregistrement de la hauteur labiale et positionnement de la cale sur la plaque d'enregistrement de l'occlusion [66].

3.1.3.2. Articulateurs virtuels totalement adaptables

Historiquement, c'est en 1994 qu'a été réalisée la première recherche visant à numériser les mouvements mandibulaires dans les trois plans de l'espace (pantographie numérisée) afin de les combiner aux surfaces dentaires (uniquement les premières molaires). Le but de cette recherche était de démontrer qu'il était possible de reproduire virtuellement les contacts occlusaux tels qu'ils se produisaient in vivo ; de plus, ils ont déduit que leur technique expérimentale était limitée par le matériel informatique et qu'elle était trop longue pour une application clinique. [35].

Ce type d'articulateur tend à transférer le mouvement des arcades du réel vers le virtuel. Pour ce faire, il est nécessaire de "numériser" précisément les mouvements mandibulaires dans les six degrés de liberté de mouvement, au moyen d'un appareil d'enregistrement de la cinématique mandibulaire: un pantographe numérique. Il est nécessaire de définir au minimum trois points physiques et de les corréliser précisément à leur points virtuels afin que le déplacement du modèle virtuel mandibulaire par rapport au modèle virtuel maxillaire soit le même que le déplacement de l'arcade mandibulaire par rapport à l'arcade maxillaire, il n'est donc pas nécessaire de réaliser un paramétrage ou une localisation de l'axe charnière terminal. Il est ainsi possible d'obtenir les avantages des articulateurs mécaniques sans avoir à les imiter. C'est en partie pour cette raison mais aussi parce qu'il existe des versions virtuelles d'articulateur mécanique adaptable, qu'ils ont été qualifiés par certains auteurs comme articulateurs virtuels complètement adaptables. Ce type d'articulateur est une version virtuelle du Replicator (Figure 36) qui est un simulateur mécanique animé par des micromoteurs qui reproduisent le déplacement d'enregistrements extrabuccaux [21,33,58,71,72,73,81,105].

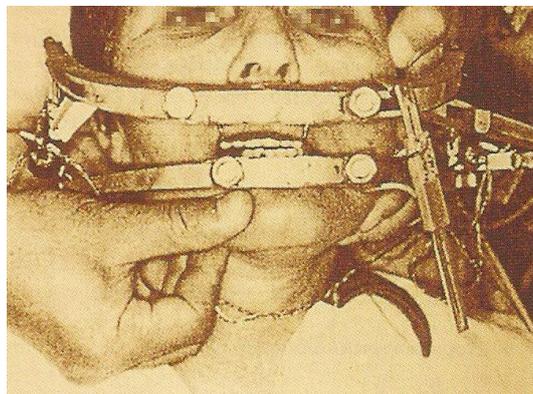


Figure 36 : Support d'enregistrement de la cinématique mandibulaire du Réplicator [58].

3.1.4. Inventaire des données à recueillir pour le "montage" sur articulateur virtuel totalement adaptable

Les simulateurs virtuels nécessitent au moins une représentation fidèle des structures dentaires sous la forme de modèles virtuels, un enregistrement du rapport intermaxillaire et/ou une orientation de ces modèles au sein du simulateur. Mais il est possible d'intégrer d'autres informations afin d'améliorer le diagnostic et le traitement qui en découle (cinématique

mandibulaire, enregistrements électromyographiques, bruits articulaires, données d'imagerie Rayon-X...) [78].

3.1.5. Technique d'acquisition tridimensionnelle

3.1.5.1. L'empreinte optique

La mesure optique est une mesure de déformation. Le principe consiste à projeter un rayonnement lumineux de référence, appelé rayonnement incident, et dont les caractéristiques sont connues. Ainsi, une onde lumineuse pouvant être incohérente (polychromatique) ou cohérente (laser) est projetée sur un objet (arcades dentaires, modèles, etc.), l'objet ainsi éclairé, comme tout objet éclairé, renvoie une partie du rayonnement qu'il reçoit. Cette onde lumineuse réfléchie est mesurée par une caméra photosensible (Figure 36). Elle est aussitôt convertie en information numérique et comparée au rayon incident afin de recueillir les données concernant la surface de l'objet sous forme d'une multitude de points. Une multitude de mesures sont donc réalisées par cm^2 et, grâce à un algorithme informatique, la forme tridimensionnelle de l'objet est représentée. Il est important de noter qu'une nouvelle technologie "*three-dimensional in-motion vidéo*" a fait son apparition. Cette technologie réalise des empreintes optiques par le biais de trois caméras hautes définitions ne nécessitant pas la projection d'un faisceau lumineux. Il est certaines fois nécessaire de réaliser un poudrage de l'objet afin que la lumière soit réfléchie de manière cohérente. Une fois l'arcade numérisée, le modèle virtuel est stocké sous la forme d'un fichier « .STL » (Standard Triangulation Language) qui peut être utilisé à l'infini sans se dégrader. L'empreinte optique peut être réalisée soit directement sur le patient ou indirectement; dans ce cas, une empreinte surfacique classique est réalisée, puis les modèles sont coulés et enfin scannés. La résolution des scanners optiques varie beaucoup d'un système à l'autre et se situe aux alentours d'une dizaine de micromètres. [12,50,89].

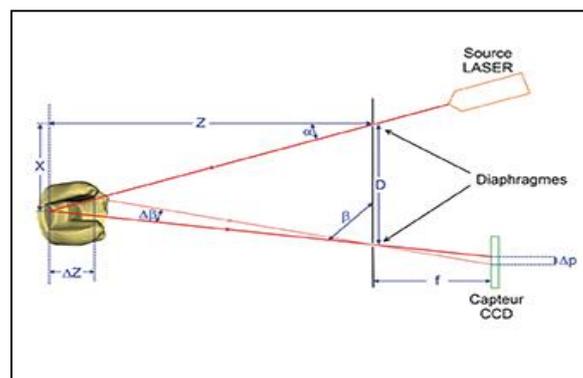


Figure 36 : Schéma de fonctionnement de l'empreinte optique [101].

3.1.5.2. L'imagerie tridimensionnelle par rayonnement X

Cet examen recouvre le scanner aussi appelé tomodynamométrie (TDM; on rencontre également l'abréviation de CT scan pour *computerized tomography* : scanner en anglais), ainsi que le Cone Beam (CBCT, *Cone Beam Computerized Tomography* en anglais) couplé à un logiciel d'imagerie 3D ou à un logiciel de simulation informatique dans le cadre de l'implantologie assistée par ordinateur. Tout comme la radiographie traditionnelle, cet examen utilise les propriétés physiques du rayonnement X qui traverse le corps du sujet (ou de l'objet) et sera plus ou moins

absorbé par les différentes structures. Ainsi, un faisceau incident (beam) de rayons X est dirigé vers le centre de la région à étudier, puis des récepteurs situés à l'opposé de la source du rayonnement X viennent mesurer les rayonnements résiduels (figure 37). Les structures scannées sont conservées sous la forme de fichiers « DICOM » (Digital Imaging and COmmunications in Medecine). Il est ainsi possible de visualiser des structures radio-opaques sous forme de coupes axiales successives ou de reconstructions tridimensionnelles de la mandibule, du maxillaire ou des deux. De plus, ce type d'imagerie dite sectionnelle ou imagerie en coupes autorise une discrimination par plan des structures anatomiques. La précision de l'image dépend de la taille des voxels (unité de mesure tridimensionnelle) qui peuvent mesurer jusqu'à 125µm [10,11,95].

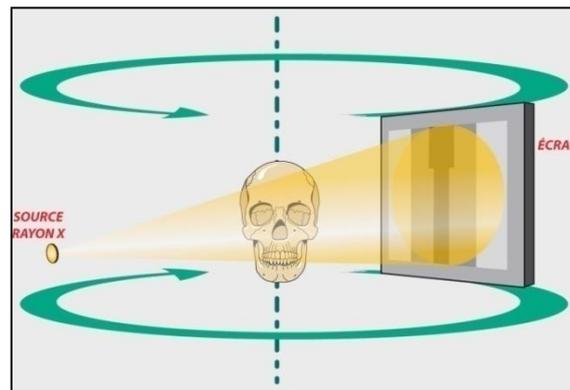


Figure 37 : Principe de fonctionnement du cône beam [98].

3.1.5.3. La photographie tridimensionnelle

En plus de l'acquisition des surfaces dentaires et de la structure squelettique, il a été montré expérimentalement qu'il était possible d'acquérir la surfaces tridimensionnelle en couleur du visage d'un patient au moyen d'une prise de vue stéréophotogrammétrique. Il est nécessaire de réaliser au moins trois clichés lors de différentes mimiques faciales qui seront conservés sous forme de fichier « .OBJ » (Figure 38) [17,18,39].



Figure 38 : Ensemble de données tridimensionnelles (STL, DICOM, OBJ) [39].

De plus, les systèmes commercialisés "Plane Finder"/"Face Hunter" de la firme Zirkonzahn®, permettent à la fois la réalisation de scans photoréalistes tridimensionnels et la localisation du maxillaire. Une fois la localisation du maxillaire réalisée, les photographies réalisées selon un protocole standardisé, peuvent être jumelées à l'aide du "Face Hunter"(Figure 39) avec le modèle maxillaire au sein de l'articulateur virtuel "Plane System®" (PS1) ou son équivalent physique qui sera présenté ultérieurement (Figure 58) [66,22,104].



Figure 39 : Modèle maxillaire numérique positionné suivant les données de "Plane Finder" et le scan du "Face Hunter" (photo Zirkozahn).

3.1.6. Techniques d'acquisition de la cinématique mandibulaire/pantographie numérisée

3.1.6.1. Principe de fonctionnement

Le système de "Motion Capture" en anglais, capture des mouvements en français, est un procédé par lequel les mouvements sont enregistrés par un appareillage électronique afin d'être numérisés. Pour enregistrer précisément la cinématique mandibulaire, le système doit être capable d'enregistrer les mouvements de la mandibule dans tous ses déplacements. Les articulations temporo-mandibulaires ayant une capacité de déplacement dans ces six degrés de liberté, l'appareillage de mesure doit être capable d'enregistrer ces déplacements dans les six degrés de liberté (trois plans de l'espace). La mandibule se déplaçant par rapport au crâne, le système d'enregistrement doit déterminer la position de la mandibule par rapport au crâne; il est donc nécessaire que les composants du système soient fermement fixés à la fois sur le crâne et sur la mandibule. De plus, si l'on cherche à obtenir précisément les mouvements de la totalité de l'enveloppe fonctionnelle, il ne faut pas que l'appareillage de mesure vienne interférer/modifier les trajectoires mandibulaires par une modification du plan d'occlusion [1,33,55,71,73,78,89].

3.1.6.2. Les différents systèmes

3.1.6.2.1. Les systèmes optiques

On peut donner comme exemple commercial le système FreeCorder Bluefox, ou à titre expérimental le système VICON, mais il existe d'autres systèmes. De plus, les systèmes optiques ont le plus souvent été utilisés à titre expérimental (Figure 40) [20,70,105].



Figure 40 : Support d'enregistrement optique de la cinématique mandibulaire passif à gauche le "Freecorder®BlueFox" GmbH® et actif à droite le "TRI-MET" Tokyo-Shizaisha® [99,105].

L'enregistrement de la cinématique mandibulaire est réalisé par des caméras CCD (charge-coupled device) normales ou infra rouge qui enregistrent le déplacement de marqueurs mandibulaires par rapport à des marqueurs maxillaires ou crâniens. Puis, un programme informatique analyse ces enregistrements pour en extraire les trajectoires condyliennes. Pour enregistrer le déplacement des marqueurs dans les trois plans de l'espace, il faut au moins deux (point de vue) caméras qui doivent être positionnées à équidistance en avant du patient. Quant aux marqueurs, ils sont positionnés sur un dispositif (arc) mandibulaire et sur un autre dispositif (arc) maxillaire ou directement sur la peau. Il est nécessaire d'avoir aux moins 6 marqueurs pour s'assurer que les déplacements sont bien enregistrés dans les trois plans de l'espace. Ils peuvent être actifs (LED) ou passifs (sphères réfléchissantes, motifs particuliers) [21,25,70,105].

De cette manière, les caméras enregistrent le déplacement des marqueurs maxillaires/crâniens et mandibulaires. Pour obtenir les trajectoires mandibulaires dans les six degrés de liberté, il ne reste plus qu'à soustraire les déplacements des marqueurs maxillaires/crâniens aux marqueurs mandibulaires [25].

La précision d'enregistrement des trajectoires mandibulaires varie de 1 à 150 μm [99,105].

3.1.6.2.2. Les systèmes ultrasonores

On peut donner comme exemple le Jaw Motion Analyser (JMA, Zebris Medical GmbH®) et le Jaw Motion Tracking (JMT⁺, SICAT), mais il en existe d'autres (Figure 41). Ces deux systèmes sont équivalents ; ils comportent quatre émetteurs, six récepteurs pour le JMT⁺ et huit récepteurs pour le JMA, répartis tout autour de la cavité buccale, ce qui permet de réaliser des mesures à la fois aux abords du plan d'occlusion et des ATM [33,44,48,71].



Figure 41 : Support d'enregistrement ultrasonore à gauche le "Jaw Motion Analyser" (Zebris Medical GmbH®), à droite le "Arcus Digma II" (KaVo®) [44].

Les systèmes d'enregistrement basés sur les ultrasons réalisent leur mesure sans contact ; ils déterminent le temps parcouru par plusieurs ondes ultrasonores entre le point d'émission et le point de réception (microphone) et convertissent ces données en distances numériques. Ce type de système fonctionne comme un système de géolocalisation qui enregistre, dans les six degrés de liberté, les mouvements mandibulaires en déterminant (par triangulation) la position spatiale statique et dynamique de la mandibule par rapport à un plan de référence arbitraire (PAO) en fonction du temps. Le point sous-orbitaire est déterminé au moyen d'un stylet fixé (agissant

comme un scanner tactile) sur l'arc mandibulaire, tandis que l'axe charnière terminal est obtenu par ouverture/fermeture répétée. Les capteurs et émetteurs étant distribués autour de la tête du patient, ils réalisent des mesures sur une grande étendue, ce qui permet de réaliser les mesures simultanément à proximité et à distance de l'axe charnière de l'ATM. Le système garantit une précision clinique de mesure d'environ 0.1 mm pouvant aller jusqu'à 85µm (à la fréquence maximale de 200Hz); pour plus d'exactitude les constructeurs précisent que le système a une précision de 0.1 mm pour l'axe y, de 0.2 mm pour l'axe x et z. De plus, ils rajoutent que la précision des valeurs articulaires est précise a +/- 2° près [5,17,18,33,48,67,73].

Pour réaliser l'enregistrement, une fourchette paraocclusale permet la fixation de l'arc mandibulaire (environ 10g) sur lequel sont positionnés les émetteurs ultrasonores tandis que l'arc maxillaire (environ 110g) sur lequel sont positionnés les récepteurs (microphone) sert de contrepartie aux émetteurs mobiles, est fixé au crâne en venant s'appuyer sur les mastoïdes et la racine du nez, le tout est maintenu en place par une bande de caoutchouc qui vient entourer le crâne. De cette manière, les mouvements mandibulaires sont enregistrés naturellement par rapport au crâne et la position de la tête n'a donc aucune incidence sur les mesures réalisées avec ce système [67,71].

3.1.6.2.3. Les systèmes électromagnétiques

On peut citer comme exemple commercialisés le SinfoMed K7® (Myotronics-Noromed Inc.) ou encore le Sirognathographe® (SIEMENS A.G.). Aucun de ces systèmes n'a encore été utilisé pour réaliser une simulation de l'occlusion dynamique du patient, mais ils sont couramment utilisés pour le diagnostic des dysfonctionnements de l'appareil manducateur (DAM), pour la localisation de la position physiologique de repos myocentree ou encore la programmation des articulateurs mécaniques et virtuels mathématiques. Le système est composé de deux éléments, un dispositif aimanté (2g) qui sera positionné au niveau mandibulaire et un dispositif électronique enregistrant les variations du champ électromagnétique qui sera fixé sur le crâne du patient. Le dispositif aimanté, collé aux surfaces dentaires, émet des lignes de champ magnétique qui seront captés par les solénoïdes du dispositif péricrânien afin de calculer les déplacements mandibulaires (Figure 42). Puis, le logiciel affiche en temps réel les déplacements mandibulaires et condyliens dans les trois plans de l'espace avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre [26,58,76].



Figure 42 : Positionnement des différents éléments du Sirognathographe® (SIEMENS A.G.): à gauche émetteur magnétique, à droite support d'enregistrement magnétique [58].

3.1.6.3. Fixation de l'appareillage d'enregistrement

Cette étape concerne uniquement les systèmes optoélectroniques et ultrasonores. L'étape décisive de l'enregistrement de la cinématique mandibulaire dont dépend toute la précision de la simulation, est la fixation de l'arc d'enregistrement à la mandibule par l'intermédiaire de la fourchette. Il existe deux choix de fourchette : elle peut être soit paraocclusale soit "péri-occlusale"/occlusale.

- **La fourchette "péri-occlusale"** est une option plus favorable car il est possible d'utiliser différents types de matériaux (plâtre, silicone) qui assureront une fixation stable de la fourchette. En revanche, ce type de fourchette vient recouvrir les surfaces occlusales mandibulaires, ce qui rend inaccessible une partie de l'enveloppe fonctionnelle des mouvements mandibulaires.
- **La fourchette para-occlusale** nécessite la réalisation d'une procédure plus compliquée ; cependant, elle autorise les contacts dentaires rendant possibles les interactions entre occlusion et muscles masticateurs, permettant ainsi d'enregistrer les mouvements mandibulaires sous l'influence directe de ces interactions [1,32].

Avant, il était nécessaire que la fourchette soit individualisée au laboratoire par une adjonction de résine entre la fourchette et les faces vestibulaires du modèle mandibulaire sans provoquer d'interférences occlusales (Figure 43). Puis, la fourchette était fixée sur la mandibule au moyen d'une résine ou d'un ciment provisoire (type Durelon, 3M ESPE®) [1,32].



Figure 43 : Fourchette para-occlusale individualisée au laboratoire [32].

Il est possible, maintenant, d'individualiser l'attachement mandibulaire directement au cabinet ; en effet, certains systèmes (CADIAX, JMA, JMT⁺) sont fournis avec une fourchette adaptable. Ce type de fourchette est constitué d'un métal flexible, ce qui permet son adaptation à volonté sur l'arcade mandibulaire. De plus, le matériau qui réalise l'interface entre la fourchette et les dents doit avoir une stabilité dimensionnelle suffisante (supérieure à celle d'un ciment temporaire) et une bonne mouillabilité (thixotropie) sans réaction exothermique excessive, afin d'optimiser le contact matériau/dent et donc la stabilité de la fourchette. Les résines ou les silicones d'occlusion correspondent à ces exigences (LuxaBite, DMG-Dental® ou Metal-Bite, R-dental®) [1,34].

L'adaptation et la fixation de l'attache se déroulent de la manière suivante:

- Premièrement, la fourchette est cintrée autour de l'arcade mandibulaire en dessous du plan d'occlusion. Pour s'assurer de cela, il est utile de positionner une feuille de cire entre les arcades et de demander au patient de serrer fermement les dents, ainsi la feuille de cire délimitera la hauteur maximale à laquelle l'attache pourra être positionné (Figure 44 et 45).



Figure 44 : Préparation de la fourchette para occlusale et protection des surfaces occlusales [1].



Figure 45 : Vérification de l'absence d'interférences entre la fourchette para occlusale et les surfaces occlusales [1].

- Deuxièmement, la partie buccale de la fourchette est enduite de matériau et positionnée sur la mandibule. La feuille de cire a été conservée en place pour s'assurer que le matériau ne vienne pas fuser sur les faces occlusales et provoquer d'interférences. Puis l'attache est maintenu fermement en place jusqu'à la prise totale du matériau (Figure 46) [1,34].



Figure 46 : Induction de la fourchette et fourchette en place [1].

Il a été montré et prouvé qu'une fourchette occlusale individualisée, soit au laboratoire, soit en clinique, était capable de supporter l'arc mandibulaire d'enregistrement et de rester stable durant la totalité de l'enregistrement [1,5].

Il faut noter qu'à titre expérimental Etz et col ont réalisé une attache directe entre l'arc maxillaire et l'arcade maxillaire (sur le même principe que la fixation de l'arc mandibulaire) permettant ainsi d'éviter tout mouvement de l'arc maxillaire et donc d'optimiser la précision des mesures et la reproductibilité des mesures d'une séance à l'autre (Figure 47) [19].

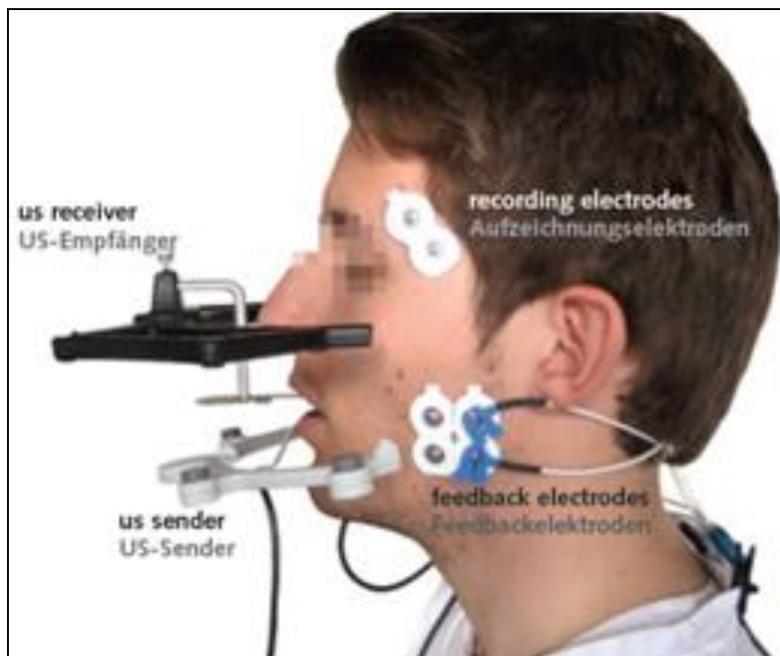


Figure 47 : Fixation intrabuccale des deux appareillages d'enregistrement et des électrodes d'enregistrement de l'activité musculaire [19].

3.1.6.4. Enregistrement de la cinématique mandibulaire

Dans le cas d'une analyse axiographique numérisée, le support d'enregistrement maxillaire est positionné sur le patient, puis à un plan de référence (PAO) est défini à l'aide d'un pointeur situé sur le support d'enregistrement mandibulaire permettant ainsi le calcul des trajectoires. Par

contre, dans le cas de la programmation d'un articulateur virtuel complètement adaptable, le "plan de référence" est défini grâce à l'utilisation d'un système tiers qui sera présenté ultérieurement.

La détermination des valeurs de programmation d'un articulateur (pente condylienne et angle de Bennett) nécessite l'enregistrement d'un minimum de trois mouvements d'ouverture/fermeture (localisation de l'axe charnière terminal), de trois mouvements de protrusion/rétraction (pente condylienne) et de trois mouvements de latéralité droite et gauche (angle de Bennett). L'enregistrement de ces trois types de trajectoires permet ainsi au programme informatique de déterminer les angles nécessaires à la programmation des articulateurs semi-adaptables et adaptables mécaniques ou virtuels mathématiques [5,48].

Il est aussi possible de déterminer l'enveloppe fonctionnelle des mouvements mandibulaires (rhomboïde de Posselt) en demandant au patient de réaliser les mouvements limites de la mandibule (Figure 48) [21,34,48].

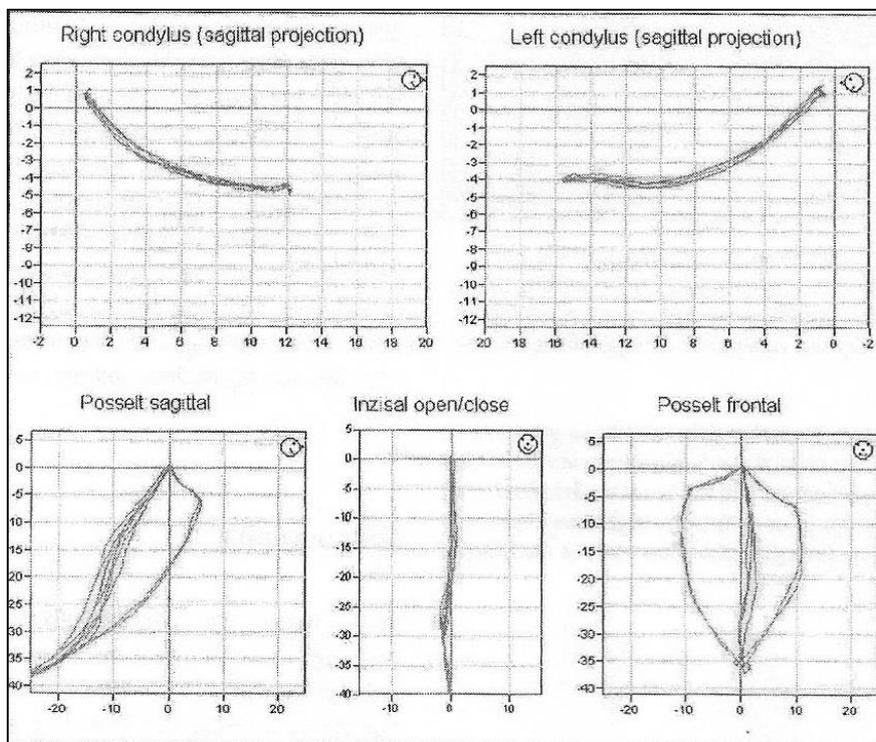


Figure 48 : Affichage des trajectoires condyliennes et du diagramme de Posselt dans les trois plans de l'espace du programme du logiciel "WinJaw" Zebris Medical GmbH® [48].

L'enregistrement des mouvements mandibulaires étant totalement ouvert, il est possible de réaliser des enregistrements masticatoires. Ainsi, le patient peut réaliser une mastication unilatérale ou bilatérale d'un aliment mou ou solide, du point de départ (mise en bouche de l'aliment) jusqu'à l'OIM (dégltition) et le praticien peut évaluer l'évolution des trajectoires condyliennes au cours de la mastication. De même, pour l'analyse axiographique, le patient peut réaliser une latéralité droite ou gauche, centripète ou centrifuge avec ou sans guidage du praticien. Dans les deux cas, le résultat peut être visualisé directement à l'écran ou sauvegardé sous la forme d'un fichier ASCII qui sera lu par la suite par un programme adéquat (pour le JMA, c'est le programme WinJaw, Zebris Medical GmbH®) [34,70,72].

3.1.7. Technique d'acquisition électromyographique

Certains systèmes d'enregistrement de la cinématique mandibulaire sont fournis avec des appareillages électromyographiques, et permettent un enregistrement et donc un affichage synchrone des deux types de données. Les électrodes permettent d'enregistrer l'activité musculaire du temporal, du masséter, des muscles supra-hyoïdiens et cervicaux mais certains auteurs précisent qu'il est aussi nécessaire de réaliser un enregistrement intrabuccal des ptérygoïdiens latéraux surtout lors d'un repositionnement antérieur de la mandibule. Les électrodes composées le plus souvent d'un gel Ag/AgCl, sont positionnées à la surface du corps (après nettoyage des surfaces cutanées à l'aide d'une solution alcoolique), en regard des muscles à explorer, et enregistrent les différents potentiels électriques lors de l'activité musculaire et au repos (Figure 49) [26,40,72,76,77].

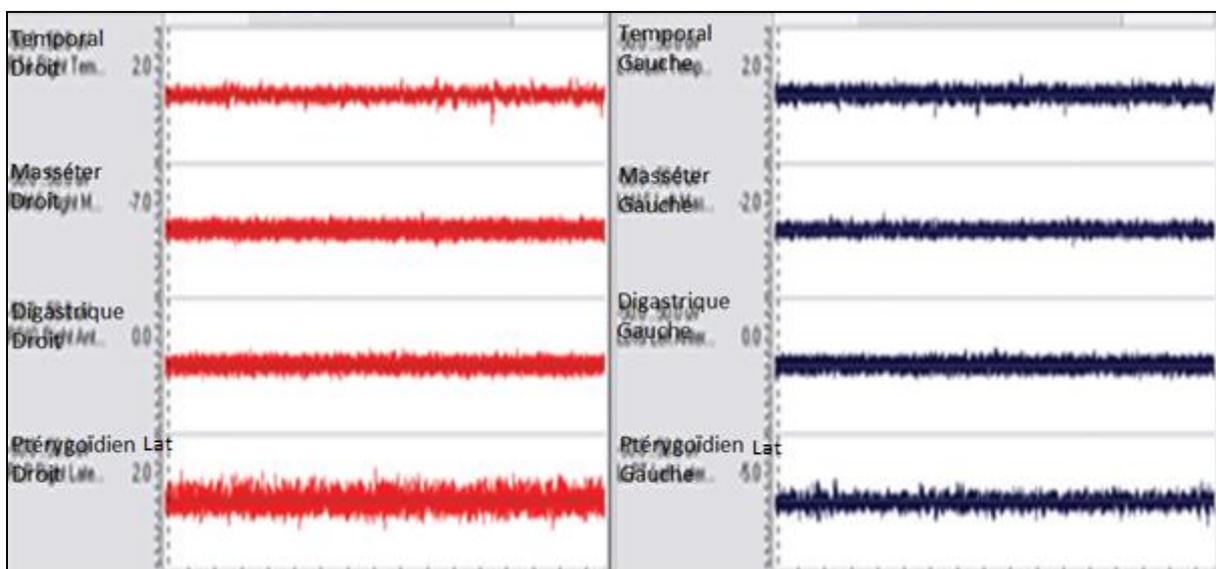


Figure 49 : Affichage de l'enregistrement simultané de l'activité électromyographique (Pré-TENS) du logiciel WinJaw® (Zebris Medical GmbH) [77].

3.1.8. Jumelage des données

3.1.8.1. Principe

L'étape de jumelage des données est nécessaire pour permettre à la fois la superposition des données informatiques utilisant des dialectiques différentes et la coordination spatiale et temporelle de ces différentes données. En effet, les données issues d'une empreinte optique sont sous la forme d'un fichier STL, celles issues d'un examen radiographique numérisé sont sous la forme d'un fichier DICOM et celles issues de l'enregistrement pantographique numérisé et de l'enregistrement électromyographique sont sous la forme d'un fichier ASCII. De plus, chacun de ces fichiers utilisant un système de coordonnées propre, il est nécessaire d'avoir un système orthonormé unique et commun à chacun de ces fichiers [21,34,48,70,71,72,73,91,105].

Le jumelage est divisé en deux parties, celui des modélisations tridimensionnelles et celui de la cinématique mandibulaire avec ces modélisations:

- Le jumelage des modèles d'arcades virtuels et des données d'imagerie se réalise de manière semi-automatique à l'aide d'un programme informatique adéquat.
- Le jumelage des données cinématiques et des modélisations se réalise à l'aide d'un dispositif intermédiaire.

3.1.8.2. Jumelage des données d'imagerie et des arcades dentaires

3.1.8.2.1. Jumelage avec les téléradiographies de face et de profil

Le jumelage se déroule en deux étapes : d'une part les deux téléradiographies sont référencées l'une par rapport à l'autre, et d'autre part, les téléradiographies sont jumelées avec les modèles virtuels des arcades. Les étapes suivantes se déroulent sur le programme informatique :

- Le référencement des téléradiographies commence par l'obtention d'informations concernant la réalisation de l'examen (distance patient/appareil, résolution de l'image) et la sélection d'éléments sur l'image (porions droit et gauche). Ces informations permettent la localisation de l'axe de rotation entre les deux téléradiographies et de définir le repère orthonormé.
- Le jumelage entre les modèles se réalise par la sélection sur l'image des faces vestibulaires des incisives et des premières molaires (Figure 50) [27].

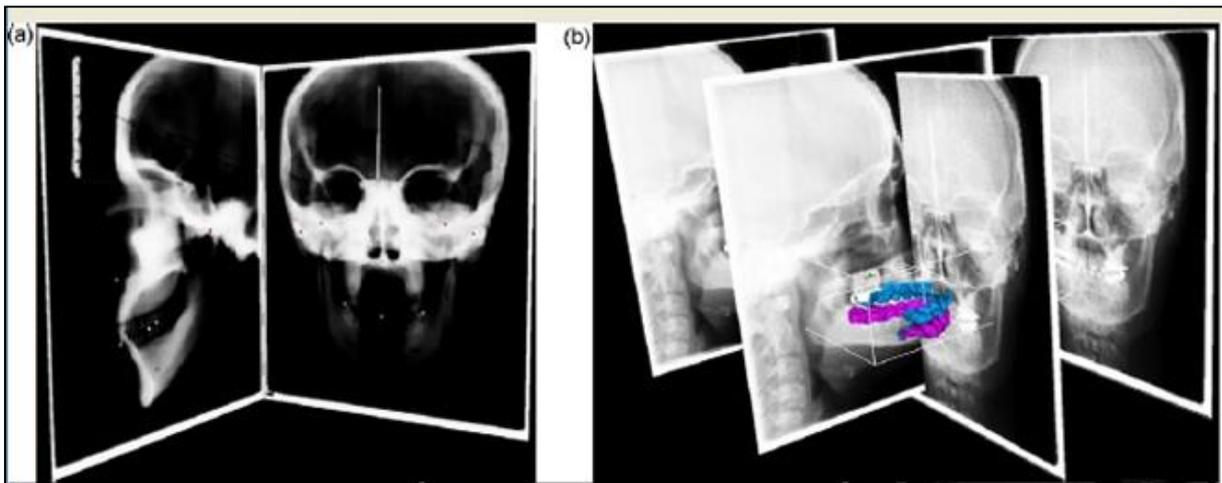


Figure 50 : Jumelage des arcades avec deux téléradiographies (face et profil) du logiciel "RapideForm2006"(INUS Technology®) [27].

3.1.8.2.2. Jumelage avec un scanner radiologique

Le jumelage de ces deux types de données est aussi réalisé par l'intermédiaire d'un programme informatique ("SICAT Function" SICAT®, "SIMPLANT" DENTSPLAY®). Les données issues de l'empreinte optique sont ainsi superposées aux données d'imagerie et permettent de les faire correspondre précisément et de les afficher exactement à la même position. Pour ce faire, l'utilisateur sélectionne deux points qui correspondent précisément aux deux types d'images (empreinte optique, imagerie radiographique), puis le programme recherche à l'aide d'un algorithme répétitif, la position optimale du modèle virtuel sur la modélisation du scanner [6,10,11,69].

On peut noter qu'il est possible de scanner par RX les modèles des arcades ou les prothèses dans le cas du système "All On Four" de NobelBiocare® et de les jumeler directement avec la modélisation crânienne du patient et donc de conserver le même type de fichier [88].

3.1.8.3. Jumelage des données du pantographe numérique et des données 3D

D'un point de vue historique, les expériences visant à jumeler directement les trajectoires virtuelles obtenues par enregistrement de la cinématique mandibulaire aux arcades virtuelles utilisaient toutes un système tiers : un scanner tactile, afin de définir précisément la position des détecteurs/émetteurs des supports d'enregistrements par rapport aux faces occlusales et vestibulaires des arcades. Cette manipulation était longue et présentait un risque majeur d'erreur, c'est pour ces raisons qu'il a été nécessaire de développer un composant analogique de jumelage [21,34,47,70,71,72,73,91,105].

Le jumelage des données cinématiques et des données tridimensionnelles (modèle virtuel et/ou modélisation crânienne) se fait au moyen d'un composant analogique. Ce composant a la forme d'un double porte empreinte spécial associé à la fois au système d'enregistrement de la cinématique et au programme informatique (Figure 51). Deux points de vue ont été adoptés, soit le jumelage se fait au moment de l'empreinte optique du porte empreinte, soit il se fait au moment de l'examen scanner réalisé avec le porte empreinte en bouche [34,47,71,72,73].

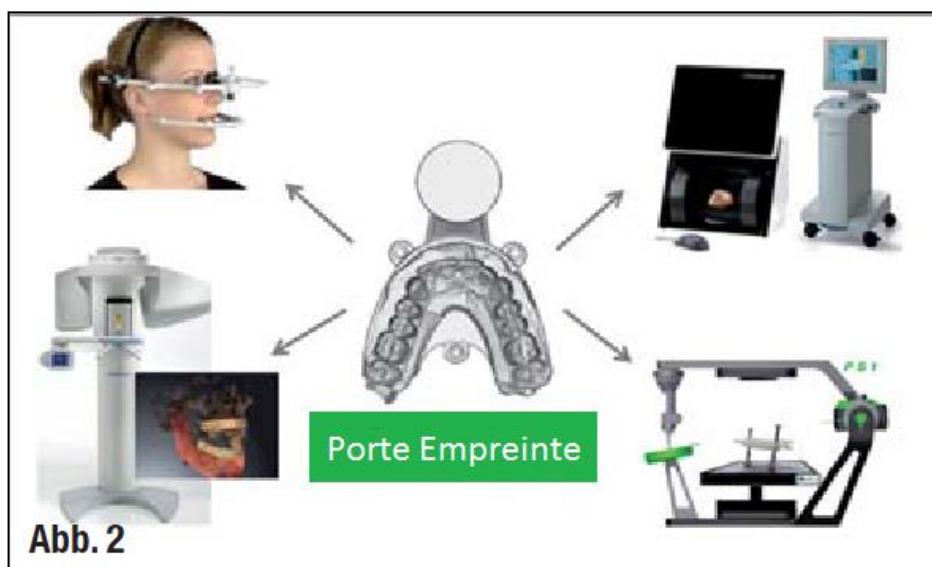


Figure 51 : Schéma récapitulatif représentant le porte empreinte de couplage, les systèmes d'acquisition tridimensionnelle scanner (GALILEOS, Sirona®) avec le logiciel de traitement (SICAT Function, SICAT®) et optique de cabinet et de laboratoire, le pantographe numérique (JMT+, SICAT®) et l'articulateur mécanique PS1 (Zirkonzahn®) [47].

L'élément analogique est un porte empreinte spécial (FusionBite Tray dans le cas du SICAT Function, SICAT®), il comporte un attachement paraocclusal qui permet la fixation du capteur mandibulaire du système d'enregistrement de la cinématique mandibulaire (JMT+, SICAT® ou JMA, Zebris Medical GmbH®). De plus, il comporte des marqueurs, qui sont soit des marqueurs radio opaque (dans le cas du SICAT Function) soit trois petites cavités réparties tout autour des

arcades sur la face externe du porte empreinte dans les cas du "3D Virtual Articulator System" (3D VAS de Zebris medical, GmbH®) ou "DentCam"(université de Greifswald, Allemagne). Ils permettent, à la fois, la localisation du porte empreinte lors de la réalisation de l'examen d'imagerie ou de l'empreinte optique et la différenciation entre le maxillaire et la mandibule.

Le jumelage des données se fait en deux étapes:

- Premièrement, les structures osseuses ou dentaires avec le porte empreinte en place sont numérisées à l'aide d'une empreinte optique ou d'un examen d'imagerie radiographique, le Cone Beam:

- Dans le cas du logiciel "3D Virtual Articulator System" (3D VAS) ou "DentCam"(université de Greifswald, Allemagne), le matériau d'empreinte adapté au traitement optique (type silicone Futar Scan ou Metal Bite, GmbH®) est enduit sur les deux versants du porte empreinte qui est, par la suite, inséré en bouche permettant l'acquisition des surfaces dentaires maxillaires et mandibulaires. Puis le porte empreinte est positionné en l'état dans un scanner optique permettant d'une part la "numérisation" des surfaces dentaires et d'autre part la localisation du porte empreinte et la différenciation des arcades grâce au programme informatique.

- Dans le cas du logiciel SICAT Function (SICAT®), le porte empreinte est inséré en bouche à l'aide d'un matériau type silicone, puis l'examen Cone Beam est réalisé avec le porte empreinte, toujours en bouche. Là aussi, le programme informatique détecte sur l'image incidente les marqueurs radio opaques et permet de définir la position spatiale du porte empreinte et la différenciation entre le haut et le bas (Figure 52).Après segmentation de la mandibule (et des structures de la fosse glénoïde, le cas échéant), les données cinétiques de JMT+ sont superposées aux images et affichées en taille réelle avec une précision géométrique.

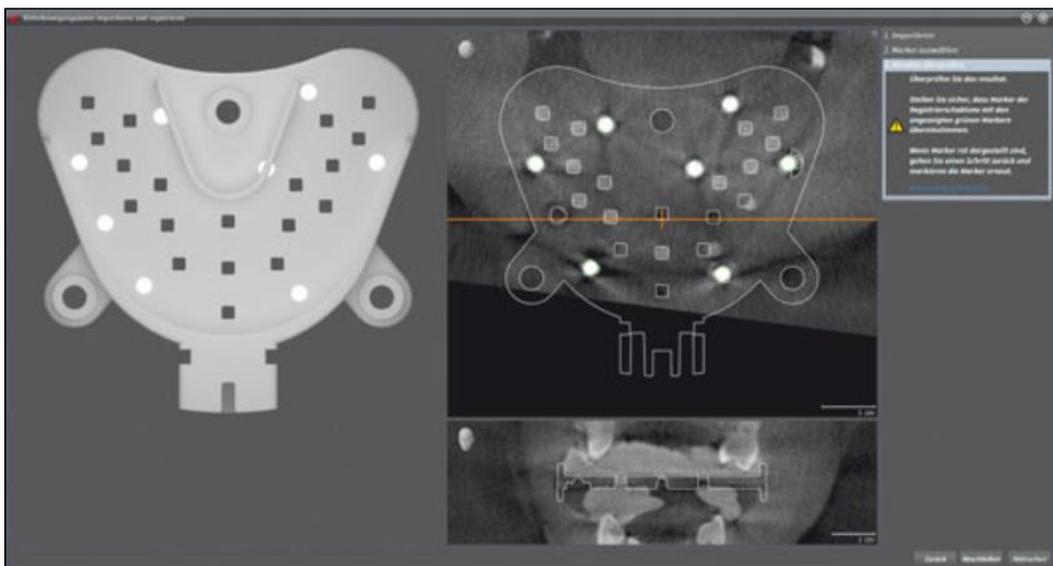


Figure 52 : Détection du porte empreinte analogique lors de l'examen d'imagerie, logiciel SICAT Function (SICAT®) [34].

-Puis, la situation spatiale du porte empreinte doit être définie dans le système orthonormé du pantographe numérique. Pour ce faire, l'attache du porte empreinte permet la fixation des émetteurs mandibulaires, ce qui permet de détecter la position du porte empreinte par rapport au détecteur maxillaire/crânien. Ainsi, la position du porte empreinte est fixée dans le système de coordonnées du JMA, ce qui donne la position du maxillaire dans l'espace virtuel. Les émetteurs mandibulaires sont ensuite fixés sur l'attachement paraocclusal de la mandibule alors que le porte empreinte est toujours en place ; de cette manière, le programme informatique détermine la relation inter arcade déterminée lors de la prise d'empreinte. Après segmentation de la mandibule (et des structures de la fosse glénoïde, le cas échéant), les données cinétiques de JMT+ dans le cas du SICAT Function sont superposées aux images et affichées en taille réelle avec une précision géométrique. Pour finir le porte empreinte doit être désinséré pour permettre l'enregistrement de mouvements fonctionnels (figure 53) [34,45,46,71,72,73].

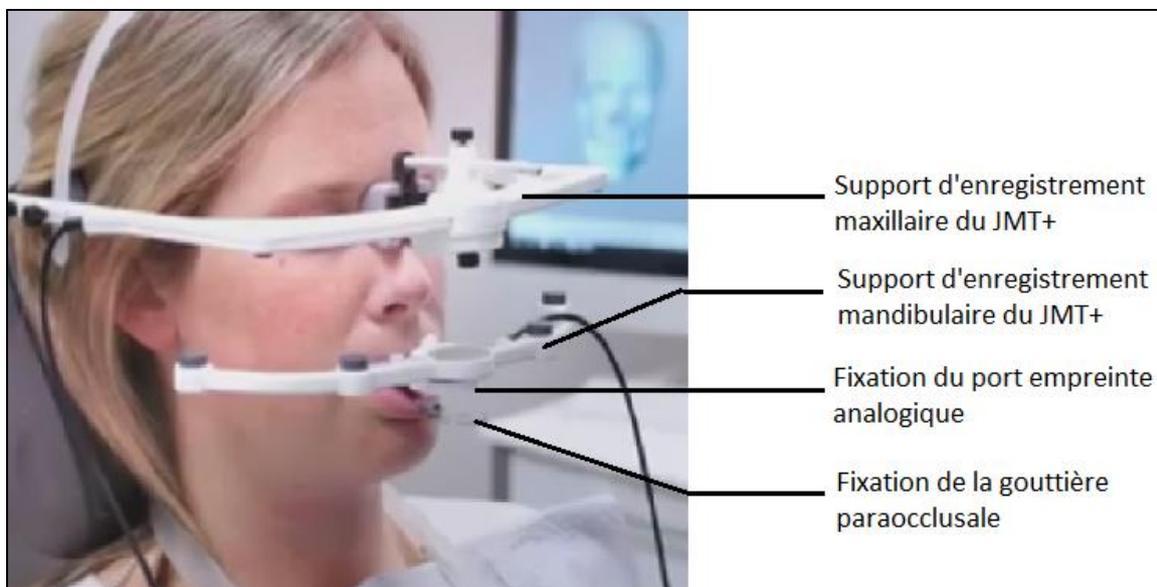


Figure 53 : Localisation du porte empreinte analogique pour le système du JMT+ (SICAT®)
[103].

Lors de la phase diagnostique d'un cas prothétique, il est fondamental d'acquérir un certain nombre d'informations qui seront essentiels à la conception du projet prothétique (par exemple la programmation d'un articulateur mécanique nécessite la réalisation d'une axiographie ou la planification implantaire nécessite la réalisation d'un examen d'imagerie (Figure 54)). Le nombre de données à acquérir dépend directement de la complexité du cas et de la thérapeutique envisagée. Donc, de la capacité de traitement des différentes données d'un simulateur virtuel découlent ses indications diagnostiques et thérapeutiques.



Figure 54 : Affichage simultané des trajectoires mandibulaires et des données d'imagerie [45].

3.2. Possibilité diagnostique et thérapeutique

Certains articulateurs virtuels sont déjà capables de concevoir des éléments prothétiques selon le réglage de la cinématique ; ils sont, aussi, capables de simuler les mouvements mandibulaires, en déplaçant les modèles virtuels et de corriger les surfaces occlusales de ces modèles pour permettre des mouvements sans interférences ni prématurités. De plus, ces simulateurs sont adaptatifs, c'est à dire que l'on peut aisément passer d'un "occluseur" virtuel à un articulateur virtuel [23,71].

3.2.1. Possibilité diagnostique et thérapeutique des articulateurs virtuels mathématiques

3.2.1.1. Traitement orthodontique

3.2.1.1.1. Planification de traitement orthodontique

L'orthodontiste accompagne son analyse céphalométrique et photographique initiale, d'une analyse des modèles d'étude sur articulateur. Cette étape peut être faite aujourd'hui sur des modèles numériques à partir d'empreinte optiques ou surfaciques scannées. Des logiciels d'orthodontie permettent une simulation virtuelle de différents plans de traitement (alignement dentaire, expansion transversale, extraction...). Un véritable set up virtuel peut alors être conçu afin de visualiser le résultat esthétique et occlusal final. L'articulateur virtuel mathématique n'est qu'un module intégré à ces logiciels de planification de traitement orthodontique. Cet outil permet au praticien de vérifier l'occlusion statique et dynamique au fur et à mesure de la simulation des étapes du traitement. Les résultats diagnostiques offerts par les logiciels de traitement des moulages numérisés sont plus rapides à obtenir et les manipulations simplifiées car plus ergonomiques (Figure 55 et 56) [29,50,96].

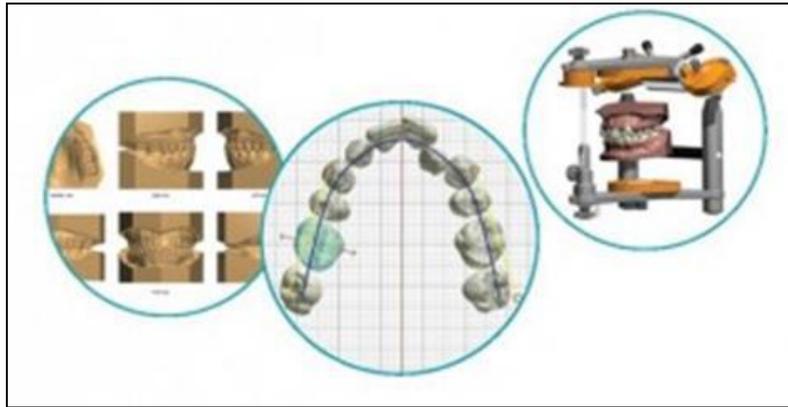


Figure 55 : Logiciel « Ortho-Analyzer » 3SHAPE ® [96].

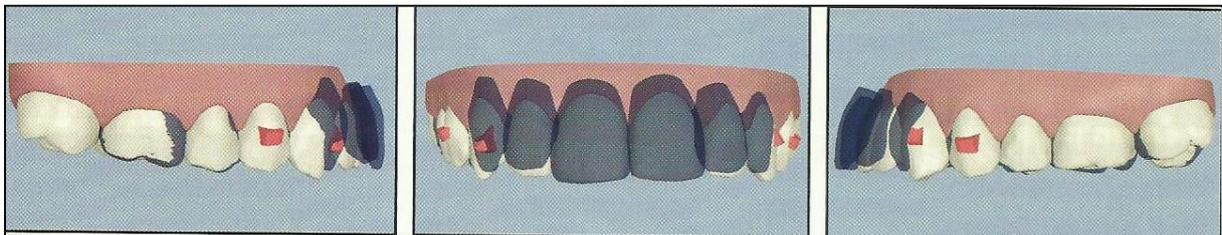


Figure 56 : Set-up virtuel de l'arcade maxillaire, logiciel "ClinCheck" ALIGNTECH ® [29].

3.2.1.1.2. Planification de traitement orthognatique

Deux techniques ont été développées, pour la planification orthognatique à l'aide d'un articulateur virtuel mathématique, soit les modèles virtuels sont montés sur l'articulateur virtuel à l'aide d'un double montage avec un articulateur physique, soit les modèles virtuels sont jumelés aux téléradiographies de face et de profil (Figure 41); afin de déterminer la position du ou des maxillaires (Figure 57 et 58). Une fois la position des modèles virtuels définie, la gouttière de repositionnement chirurgicale sera réalisée par séréolothographie [27,86].

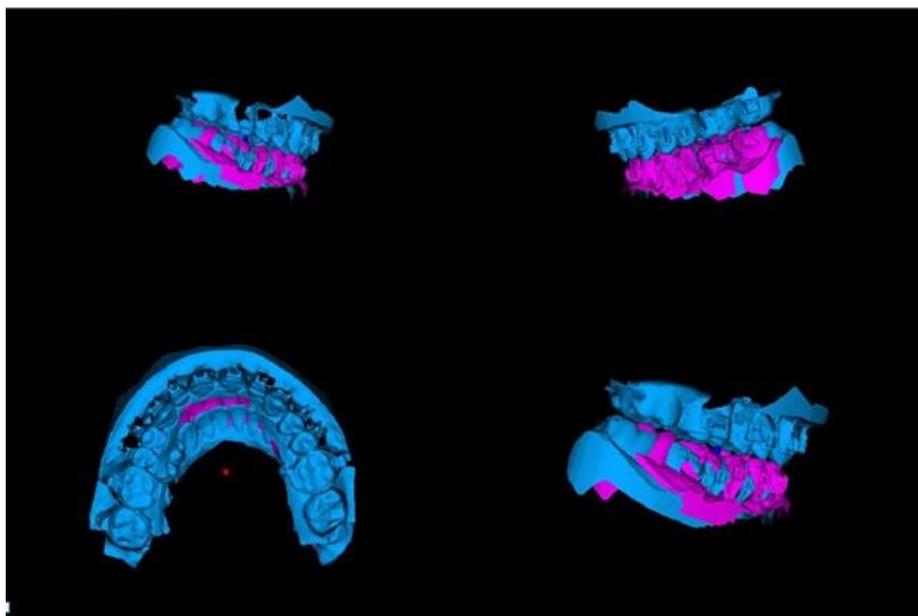


Figure 57 : Affichage comparatif entre la position préopératoire (bleu) et postopératoire (rose)

[27].

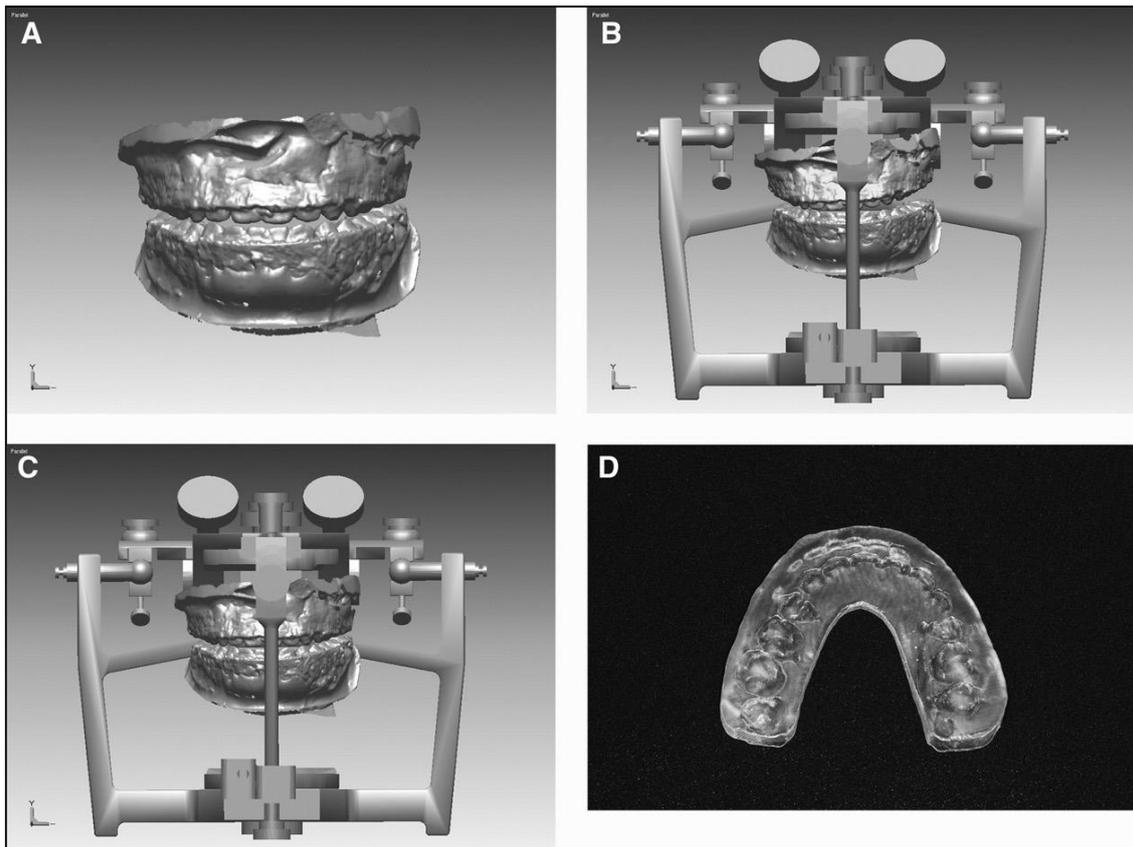


Figure 58: Affichage du programme ORAPIX® (A: modèles virtuels, B modèles virtuels montés sur l'articulateur virtuel à l'aide d'un double montage, C: après repositionnement du modèle maxillaire, D: gouttière chirurgicale obtenue par stéréolithographie) [86].

3.2.1.2. Traitement prothétique

Les systèmes de CFAO permettent de traiter les cas de prothèses fixées et amovibles. Dans la plupart des cas de prothèse amovible, l'empreinte optique est indirecte et concernera le modèle secondaire issue de l'empreinte anatomo-fonctionnelle, sauf dans le cas d'édentements encastés de petite étendue où la prothèse peut être réalisée par CFAO directe. De plus, le rapport inter maxillaire sera enregistré de manière conventionnelle puis les bases d'occlusion seront scannées afin de restituer ce rapport intermaxillaire au sein de l'articulateur virtuel [7,54].

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

Lors d'un traitement prothétique, le choix du simulateur virtuel dépend de trois facteurs, l'étendue du projet prothétique (restauration ou reconstruction prothétique), la position thérapeutique (OIM ou RC) et la modification du guidage (Figure 59).

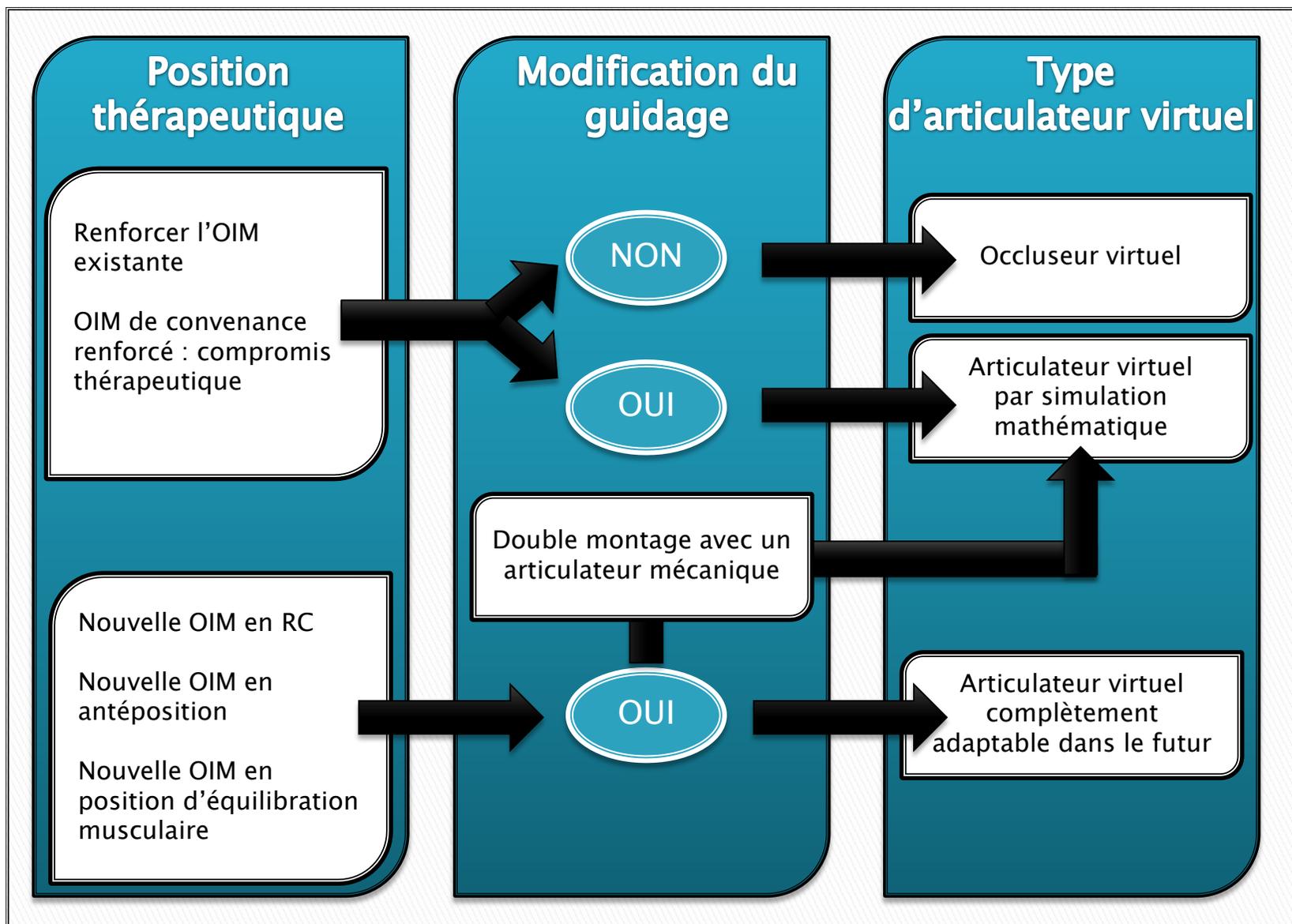


Figure 59 : Tableau récapitulatif pour le choix du simulateur virtuel.

3.2.1.2.1. Restauration prothétique de faible étendue

Dans le cas où le plan d'occlusion et les guidages sont préservés (restaurations unitaires ou de bridges de petite étendue), il est possible d'utiliser un occluseur virtuel ou un articulateur virtuel avec table de montage (Figure 60 et 61) [8,59].

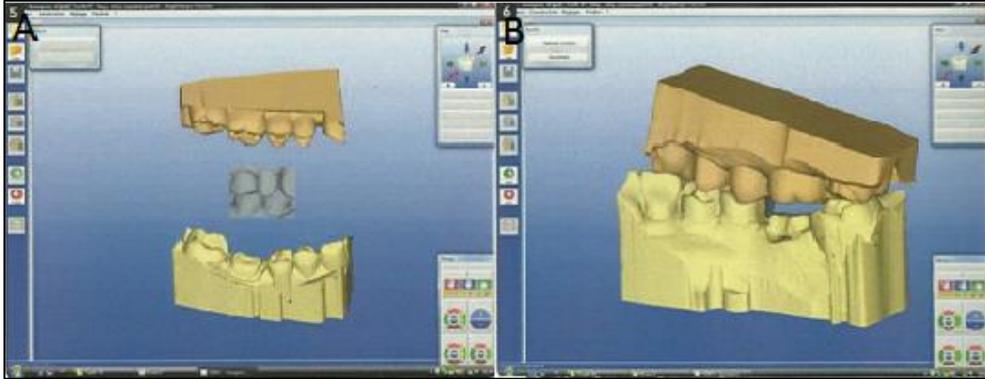


Figure 60 : Exemple restauration unitaire par prothèse fixée; A: empreinte optique de la préparation sur 46, des dents antagonistes et du rapport inter maxillaire; B: modèles virtuels en occlusion [53].

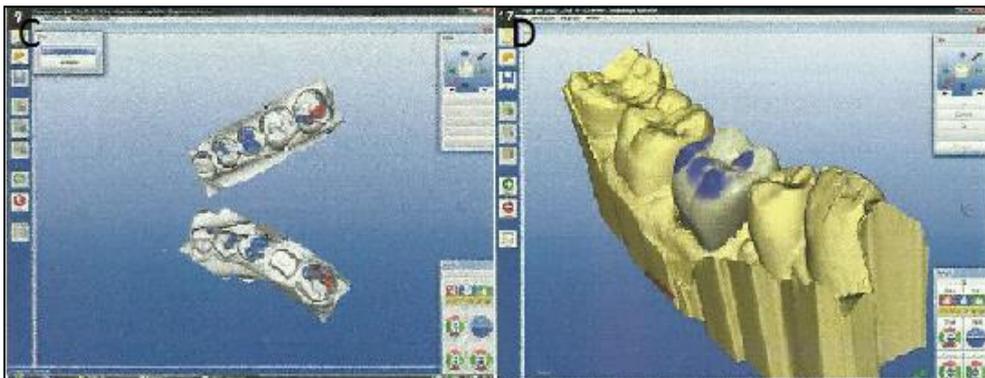


Figure 61 : Exemple restauration unitaire par prothèse fixée; C : détection des points de contact sur les dents adjacentes à la préparation; D : simulation de forme et mise en occlusion automatique [53].

3.2.1.2.2. Restauration prothétique important et reconstruction prothétique

Dans les cas plus complexes:

- Restauration du guidage antérieur.
- Changement de la position de référence et de la dimension verticale d'occlusion.
- Restauration postérieurs antagonistes et/ou en extension.

Il est nécessaire d'avoir un positionnement plus précis du maxillaire et dans certains cas de réaliser un montage en RC. Il est donc nécessaire de réaliser un double montage physique/virtuel [37,38].

On peut monter par exemple gestion assistée par ordinateur d'un cas de prothèse amovible totale (Figure 62).

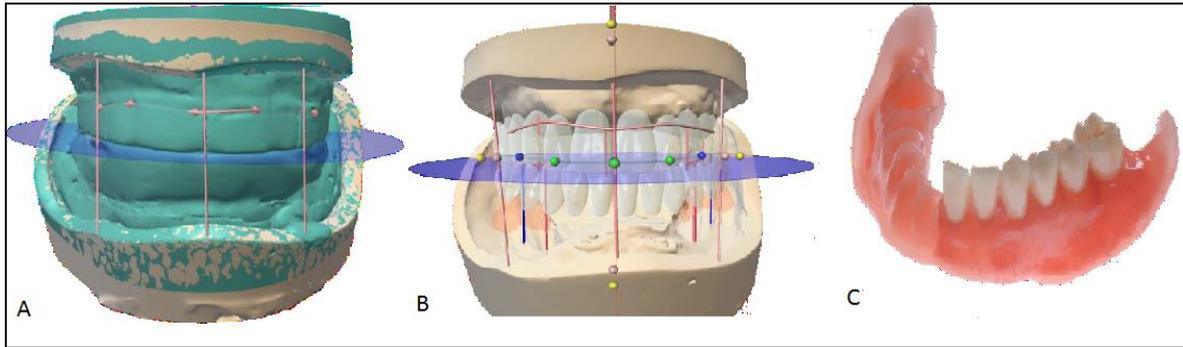


Figure 62 : Exemple de reconstruction prothétique par prothèse amovible totale à l'aide du logiciel 3SHAPE®; A: Base d'occlusion scannées RIM virtuel; B: set-up virtuel des dents prothétiques en fonction du rapport intermaxillaire; C: Plaque de résine avec l'emplacement des dents en négatif (photo du Dr Contrepois et de Christophe Sireix).

De plus, il est possible, si cela est nécessaire (montage de céramique cosmétique par exemple), de transférer l'orientation et le rapport intermaxillaire des modèles du monde virtuel vers le monde physique. Ainsi, l'articulateur PS1 présente une table de montage particulière (Plane Positionner) qui peut être réglée en fonction des paramètres de l'articulateur virtuel. Les modèles physiques créés par stéréolithographie seront par la suite positionnés sur le "Plane Positionner" par l'intermédiaire de cales (Mounting Block) créées aussi par stéréolithographie (Figure 63) [7,22,47,66,104].

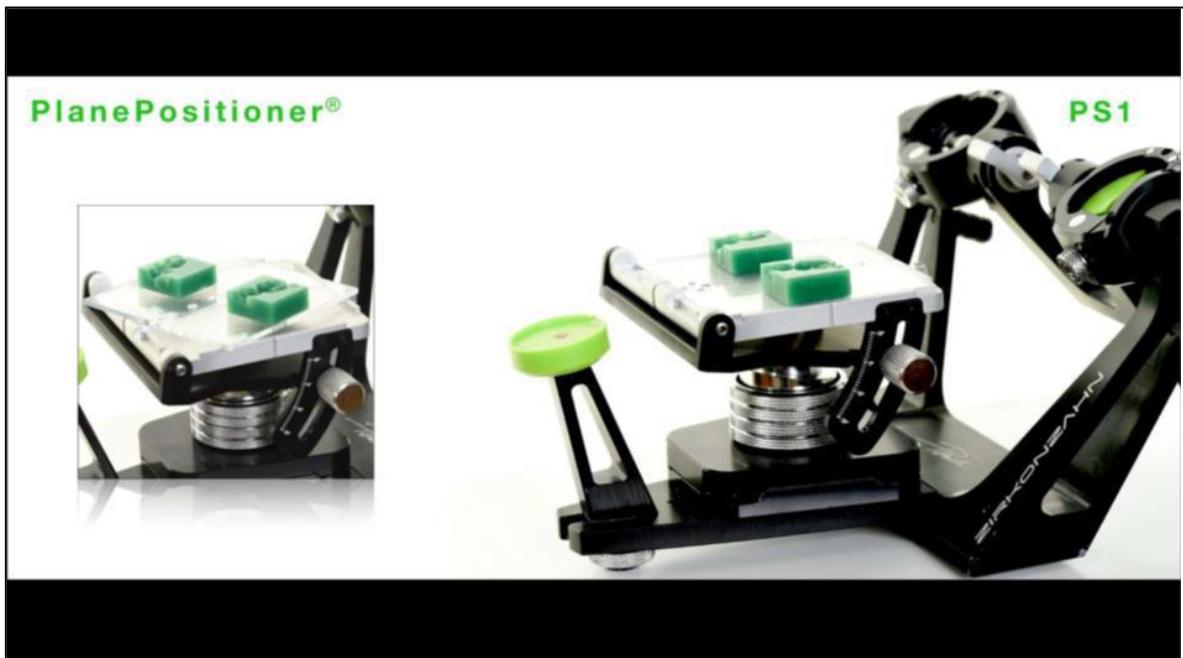


Figure 63 : « Mounting Bloc » sur le « Plane Positionner » (photo Zirkozahn®).

3.2.1.3. Chirurgie implantaire guidée

La planification implantaire consiste à définir l'emplacement de l'implant en fonction des conditions anatomiques de la crête osseuse et du projet prothétique. Les logiciels de planification implantaire permettent de réaliser cela car en effet il est possible de combiner à la

fois les informations anatomiques osseuse et dentaire. Le programme informatique peut alors proposer un projet prothétique au niveau de la zone édentée qui sera superposé sur la modélisation radiographique permettant de visualiser la faisabilité du traitement et in fine sa validation ou alors sa modification (Figure 64). Enfin, le programme de planification implantaire peut permettre de réaliser d'une part, le guide chirurgical (Figure 65) en fonction du projet prothétique et peut permettre d'autre part la réalisation d'une couronne transitoire dans le cas de mise en charge immédiate [6,10,11,28,38,69].

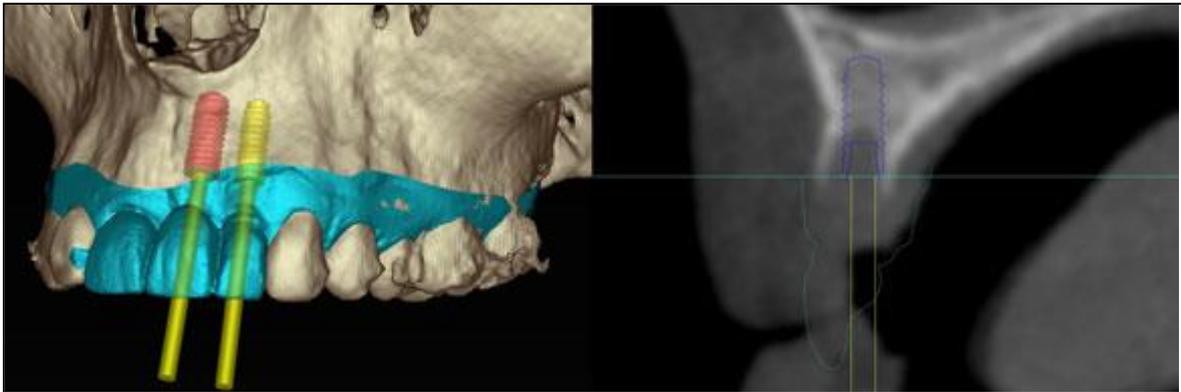


Figure 64 : Planification implantaire en vue de la réalisation de trois couronnes fixées supra implantaire du logiciel coDiagnostiX (Strauman®) [33].

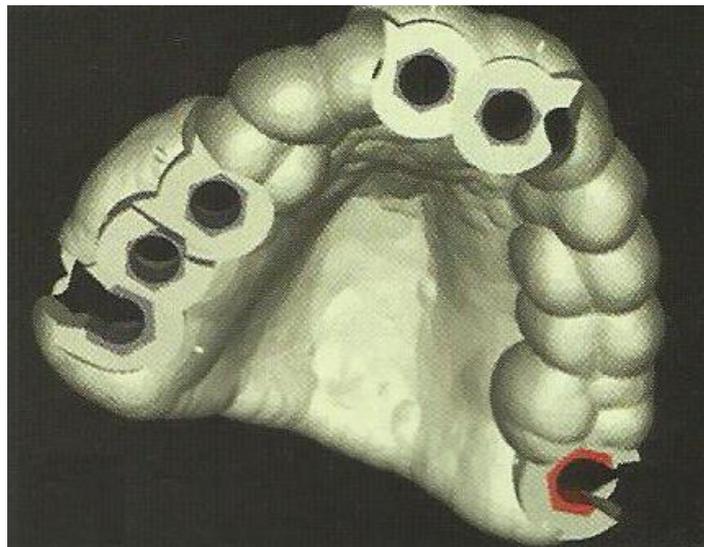


Figure 65 : Guide chirurgical en 3D à appuis dentaires obtenu avec le logiciel SIMIMPLANT (DENTSPLY®) [69].

Après le délai d'ostéointégration, il est possible de réaliser la/les couronne(s) d'usage entièrement par CFAO. En effet, une empreinte optique de la situation de l'implant à l'aide d'un "ScanBody®" permettra la réalisation par CFAO du pilier anatomique et de la prothèse d'usage (Figure 66 et 67) [28].

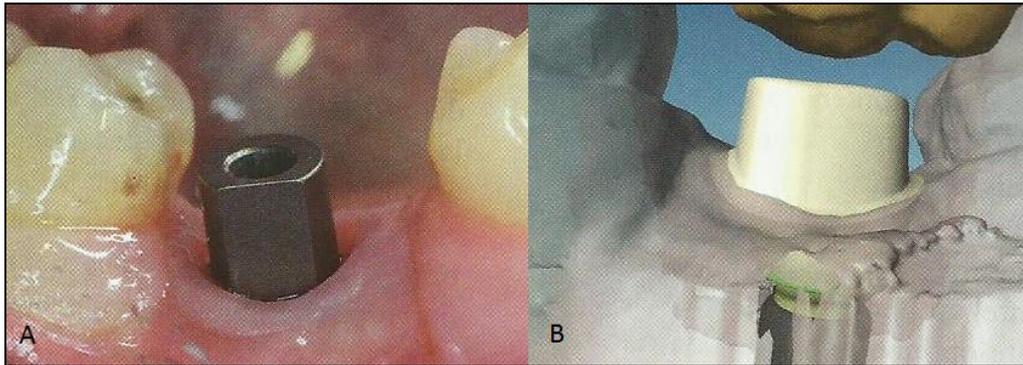


Figure 66 : Gestion du couronne supra-implantaire à l'aide du logiciel CEREC omnicaM (SIRONA) A: "ScanBody®" en place avant l'empreinte optique; B: Visualisation informatique du pilier implantaire anatomique [28].

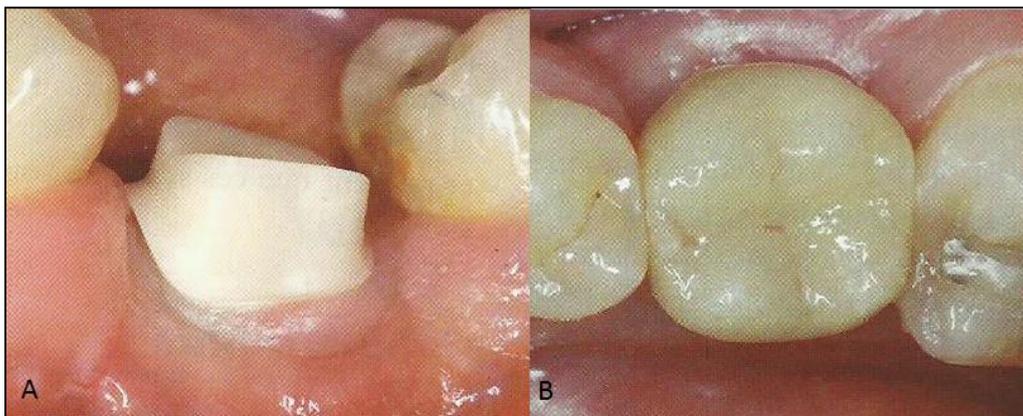


Figure 67 : Gestion de couronne supra-implantaire à l'aide du logiciel CEREC omnicaM (SIRONA) A: Pilier implantaire anatomique personnalisé en place sur l'implant; B: prothèse d'usage en place [28].

3.2.2. Apport diagnostique et thérapeutique des articulateurs virtuels totalement adaptables

La possibilité de pouvoir transférer directement le modèle virtuel dans son schéma squelettique, de localiser directement l'axe charnière terminal et d'améliorer la simulation des mouvements mandibulaire offre à la fois de nouvelles possibilités diagnostiques et thérapeutiques qui n'étaient pas directement accessible voire impossible sur les articulateurs virtuels mathématiques.

3.2.2.1. Apport visuel des articulateurs virtuels totalement adaptables

Une fois le jumelage des données réalisé, les programmes permettent d'afficher les différentes données à la même échelle et de manière synchrone. Ces programmes sont interactifs et donnent accès à différentes options d'affichage.

- Une fois les données tridimensionnelles acquises, les structures osseuses et dentaires sont restituées sous leur véritable forme et à l'échelle. Il est donc possible de générer une visualisation complète de la situation avec la possibilité de faire varier librement la perspective (Figure 68).



Figure 68 : Affichage selon différentes perspectives et différents zoom du logiciel "VIP project" de Neal Patel [65].

- Les systèmes d'enregistrement de la cinématique mandibulaire étant pour la plupart associés avec un système d'enregistrement de l'activité musculaire (exemple: le JMA), il est possible de choisir librement les différentes structures et données à afficher dans le pool de données précédemment acquis (Figure 69 et 70 modèles virtuels, données d'imagerie, trajectoires de la cinématique mandibulaire, etc...)[40].



Figure 69 : Affichage simultané des structures dentaires, osseuses, des trajectoires mandibulaires et d'une photo tridimensionnelle sur le logiciel "VIP project" de Neal Patel [65].

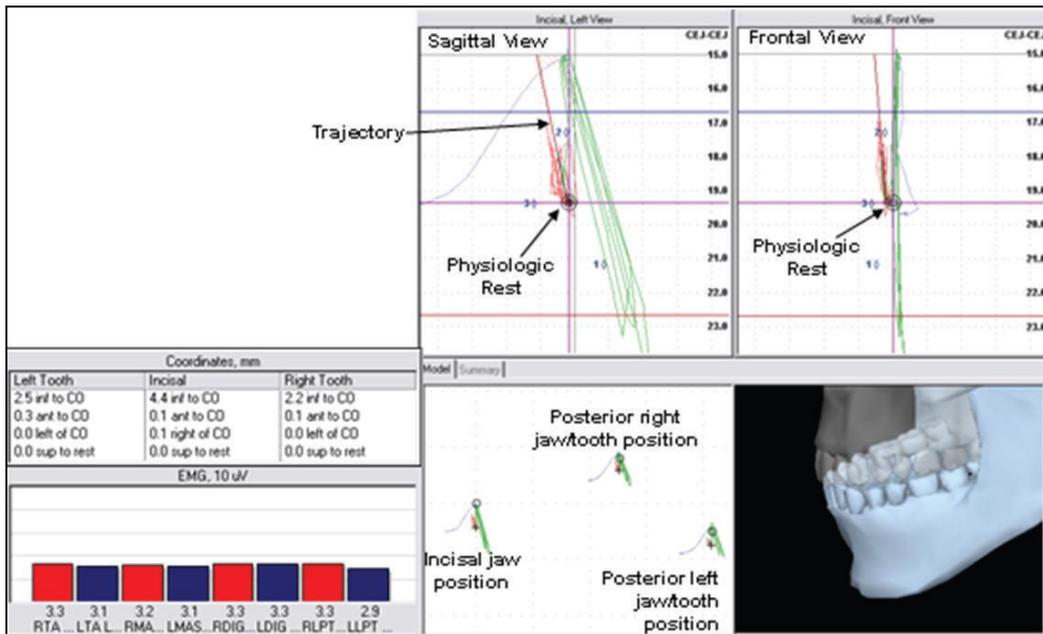


Figure 70 : Affichage uniquement des trajectoires condyliennes et de l'activité musculaire du logiciel WinJaw (Zebris medical, GmbH®) [77].

- Lorsque l'articulateur est en mode interactif animé, c'est-à-dire que les surfaces dentaires sont en mouvement et que les mouvements de l'articulation sont représentés grâce aux « fenêtres condyliennes » ou directement sur les structures osseuses, cela permet de visualiser à la fois le mouvement des arcades et des ATM et donc de réaliser un examen fonctionnel (Figure 71, 72 et 73). En principe, cette vue est la même que celle fournie par les articulateurs adaptables mécanique ou virtuel, cependant, avec les articulateurs virtuels totalement adaptables, ce sont les véritables mouvements du patient qui ont été enregistrés, et l'arcade mandibulaire se déplace selon une relation correcte et fonctionnelle. De plus, les articulateurs virtuels complètement adaptables ne nécessitent pas d'ajustement de paramètres ou de localisation de l'axe charnière terminal. Pour finir, il est possible de déplacer librement le curseur le long des trajectoires précédemment enregistrées afin de pouvoir visualiser le mouvement dans sa globalité ou de s'arrêter sur une séquence précise de la totalité du mouvement [34,45,46,67,71,72].

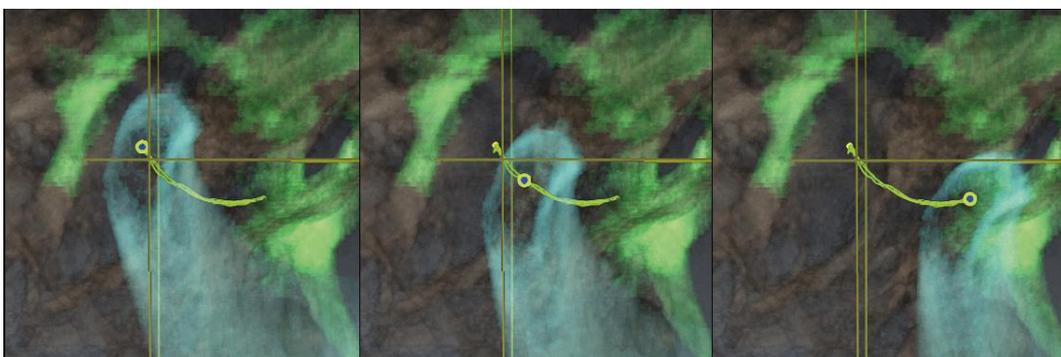


Figure 71 : Affichage simultané de la trajectoire d'ouverture, du condyle et de l'axe charnière terminal [45].

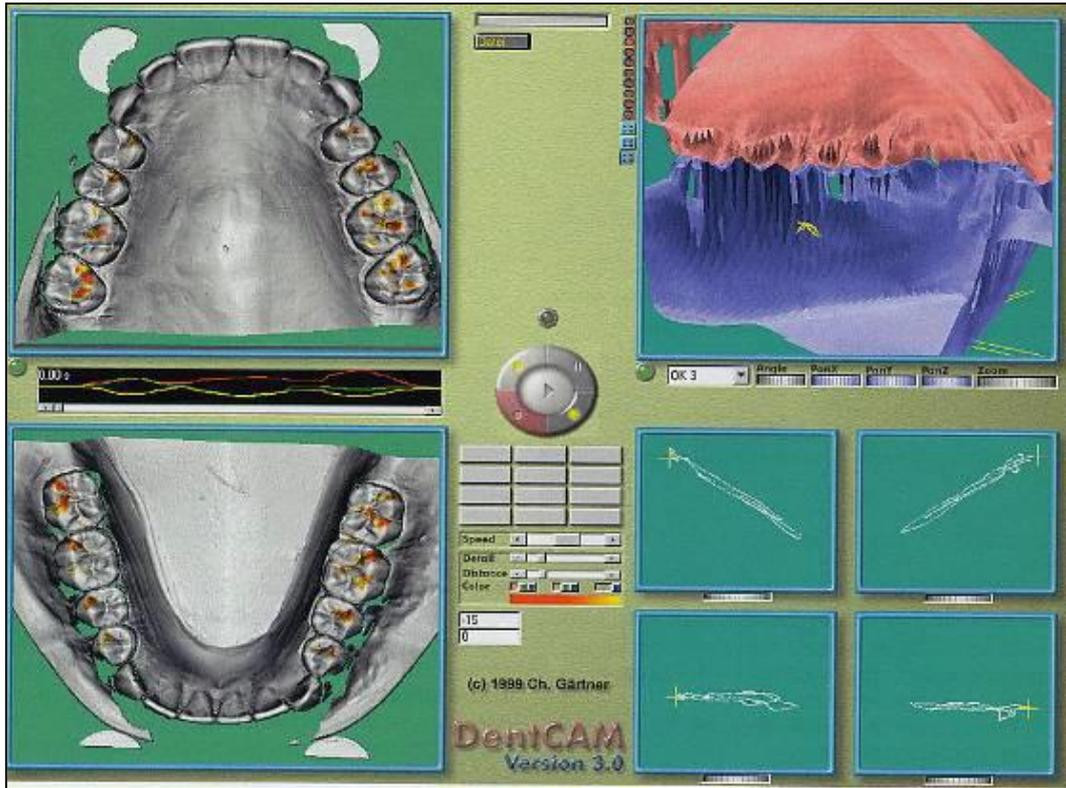


Figure 72 : Programme DentCAM (université de Greifswald, Allemagne) avec ces quatre fenêtres (arcade maxillaire, arcades mandibulaire, arcades en occlusion et cinématique condylienne) [81].



Figure 73 : Modélisation de l'ouverture buccale du logiciel "VIP project" Fonction avec la trajectoire du dentalé, le curseur blanc indique la position de la mandibule sur la trajectoire [65].

- La réalisation de coupe dynamique permet de suivre l'évolution d'une aire de contact en fonction du mouvement. Ces coupes verticales peuvent être librement positionnées sur les arcades dentaires et être déplacées en avant ou en arrière des arcades, permettant une visualisation de profil du point de contact. Il est ainsi possible d'observer une aire de contact dans sa globalité et de suivre sa migration le long de d'une cuspside tell que cela se produit en bouche (Figure 74) [71,72,73].

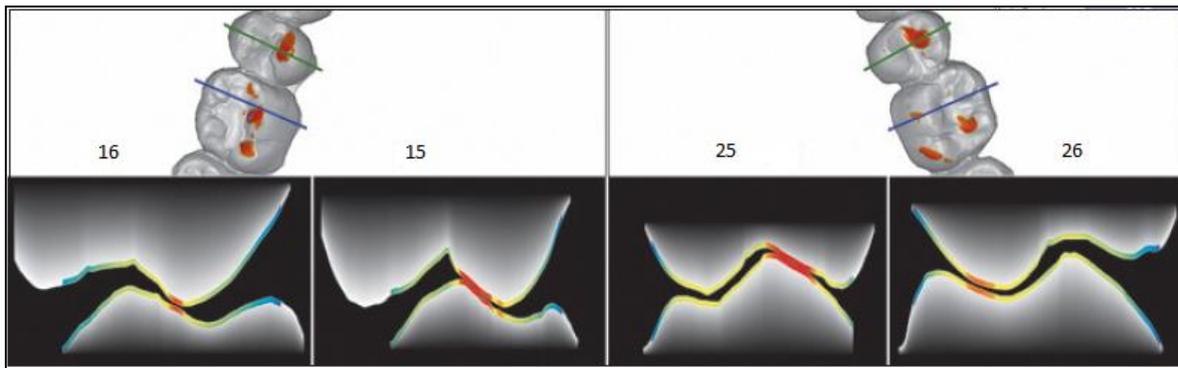


Figure 74 : Exemple de coupe au niveau des aires de contacts occlusaux du logiciel "3D Virtuel Articulator System" (Zebris medical, GmbH®) [72].

3.2.2.2. Détection des surfaces de contact

3.2.2.2.1. Seuil de tolérance et contacts

Le déplacement de la mandibule dans l'espace virtuel est calculé à partir des mouvements enregistrés ou réalisés en temps réel ce qui permet dans un second temps de calculer la distance entre la totalité des surfaces maxillaires et mandibulaires, par le biais du système de coordonnées cartésiennes de l'articulateur virtuel. Ce calcul est réalisé par l'algorithme informatique propre au programme de l'articulateur virtuel. Cette distance est calculée sur la base de pixels perpendiculaires aux surfaces occlusales. Ainsi, un pixel est détecté comme une aire de contact à partir du moment où la distance entre les deux modèles virtuels est inférieure à un seuil de tolérance. Il est possible de faire varier cette "distance seuil" ce qui peut permettre de contrebalancer l'immobilité des dents sur l'arcade virtuelle. Les points de contacts sont donc détectés à l'aide de l'axe de cote (abscisse x: mésial/distal; ordonné y: vestibulaire/palatin et cote z: occlusal/cervical) et peuvent être affichés en couleur sur les modèles virtuels (Figure 75). Une fois le mode animé activé, les contacts dynamiques sont calculés de la même façon et affichés sur l'articulateur virtuel totalement adaptable [71].

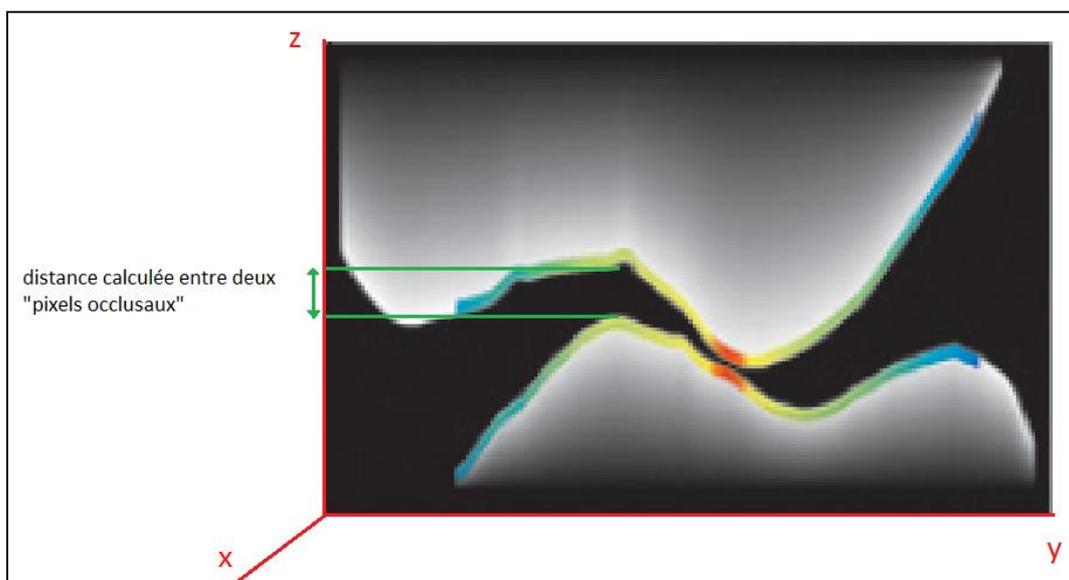


Figure 75: Schéma représentatif du calcul de la distance entre les surfaces occlusales maxillaire et mandibulaire.

3.2.2.2. Soustraction des modèles et espace libre d'inocclusion

Il est possible de réaliser une analyse occlusale volumétrique en étudiant le volume d'un "mordu occlusal virtuel"(Figure 76).

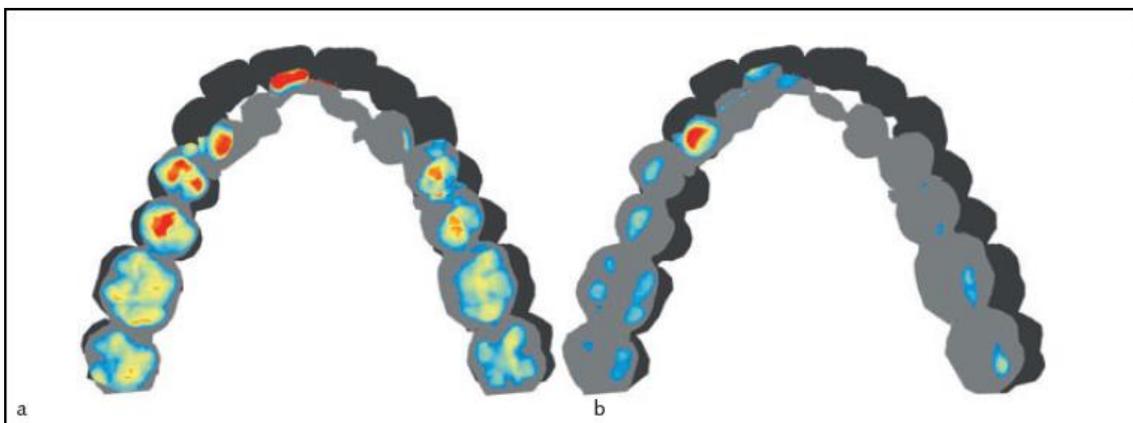


Figure 76 : Mordu occlusal virtuel du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].

De cette manière il est possible d'afficher à la fois les contacts dentaires mais aussi l'espace libre d'inocclusion. Le calcul de cette espace libre d'inocclusion se réalise de la même manière que le calcul des contacts. En effet la valeur seuil de contact permet de définir la présence ou l'absence de contact, de plus il est possible de quantifier toutes les surfaces occlusales n'entrant pas en contact et de calculer le volume d'espace libre (Figure 77). Ainsi l'utilisateur obtient non seulement des informations sur la relation entre les aires de contact, mais aussi sur l'espace libre d'inocclusion des surfaces occlusales à proximité immédiate des points de contact ce qui peut être intéressant pour quantifier le degré "d'interpénétration", lors de la conception d'onlay, par exemple[73].

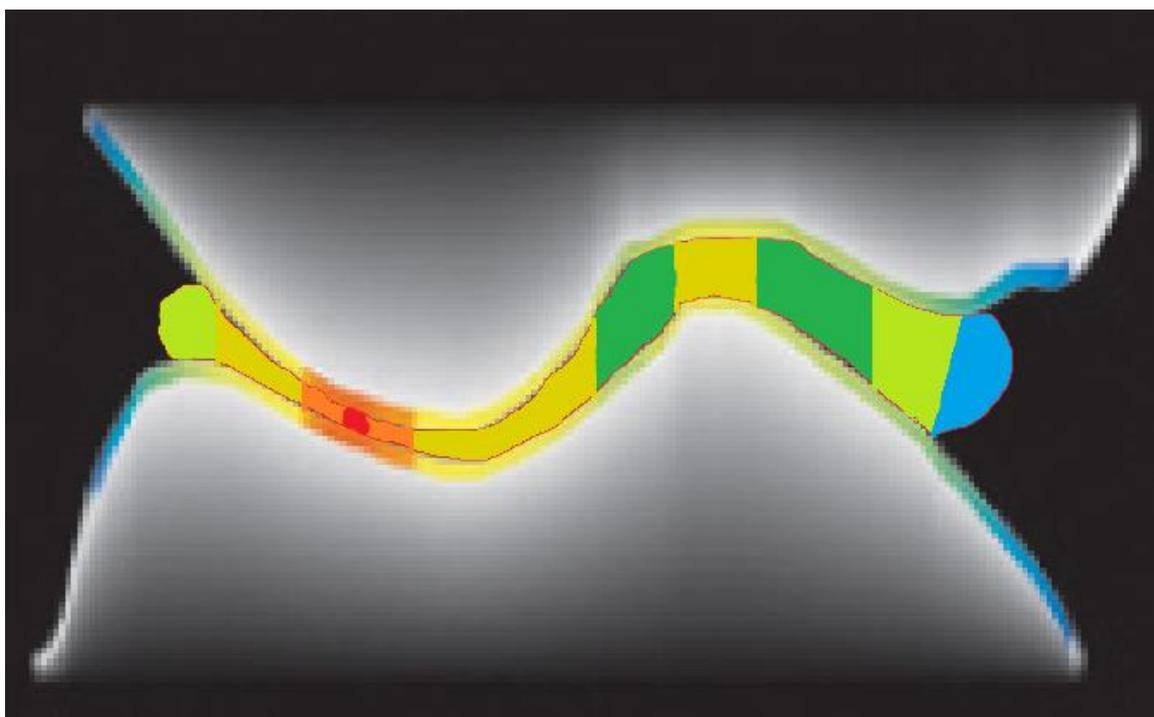


Figure 77 : Schéma représentatif du volume d'espace libre.

En fonction de l'analyse volumétrique de l'espace libre, il est possible de définir un gradient d'intensité du contact et des surfaces dentaires adjacentes (Figure 78).

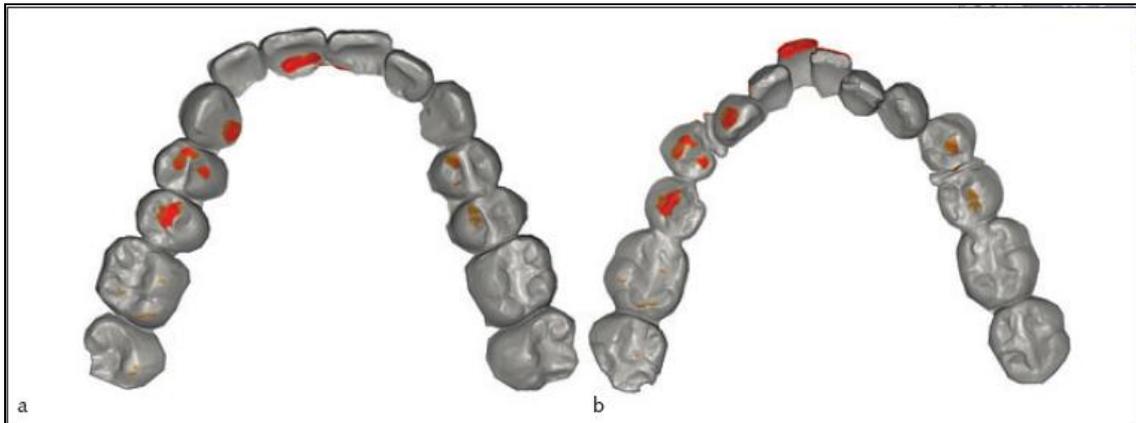


Figure 78: Affichage différentiel des contacts en fonction de leur intensité; le gradient de couleur varie du rouge, (contact fort) à l'orange (contact faible), le gris représente l'absence de contact, le maxillaire est en vue caudale, logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®). [73]

3.2.2.2.3. Codage couleur

De la même manière que l'analyse occlusale sur articulateur mécanique ou sur le patient, il est possible d'utiliser un codage couleur mais ce codage couleur est plus complet. Ainsi, en plus du codage couleur qualitatif permettant de différencier le contact en fonction du mouvement mandibulaire réalisé, il existe des gradients de couleur permettant de définir l'intensité, la fréquence, la direction qui a engendré le contact ou encore la quantité d'espace libre. De plus le codage couleur étant graduel, il permet une quantification des différents points à explorer [71,72,73].

3.2.2.3. Apports diagnostiques

3.2.2.3.1. Sur l'analyse axiographique

3.2.2.3.1.1. Déterminations des trajectoires mandibulaires

L'avantage de l'analyse axiographique associée à un articulateur virtuel complètement adaptable est qu'il est possible d'observer à la fois les trajectoires mandibulaires (dentalé, condyle droit et gauche), le déplacement de la mandibule dans son ensemble (surtout le déplacement des condyles par rapport aux fosses temporales) et l'évolution de l'activité musculaire en fonction du déplacement mandibulaire. Il est nécessaire, pour cela d'enregistrer toutes les "positions et mouvements mandibulaires majeurs" (OIM, ORC, posture de repos; mouvements d'ouverture/fermeture, de latéralités, de protrusion, de l'enveloppe fonctionnelle et de la mastication). Ainsi, ces informations permettent d'affiner le diagnostic occluso-gnathofonctionnel (Figure 79) [21,34,45,46].

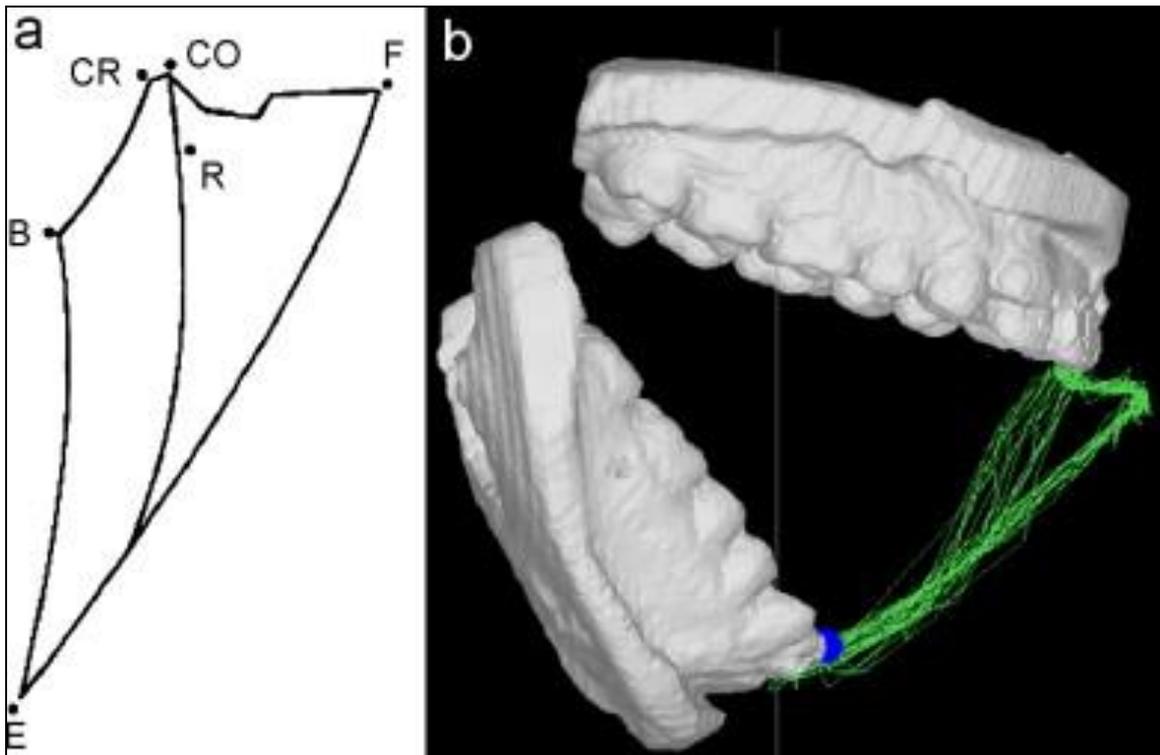


Figure 79 : Comparaison expérimental entre le diagramme de Posselt et l'enregistrement des trajectoires mandibulaires (CR: occlusion de relation centrée, CO: occlusion d'intercuspidie maximale, F: protrusion maximale, E: ouverture maximale, B ouverture maximale en relation centrée, R: position de repos) [21].

De plus, une fois les trajectoires mandibulaires acquises, le programme informatique peut calculer la trajectoire moyenne des différents mouvements mandibulaires (Figure 80) et ce sur n'importe quel point du modèle virtuel (Figure 81) [21,45,70].

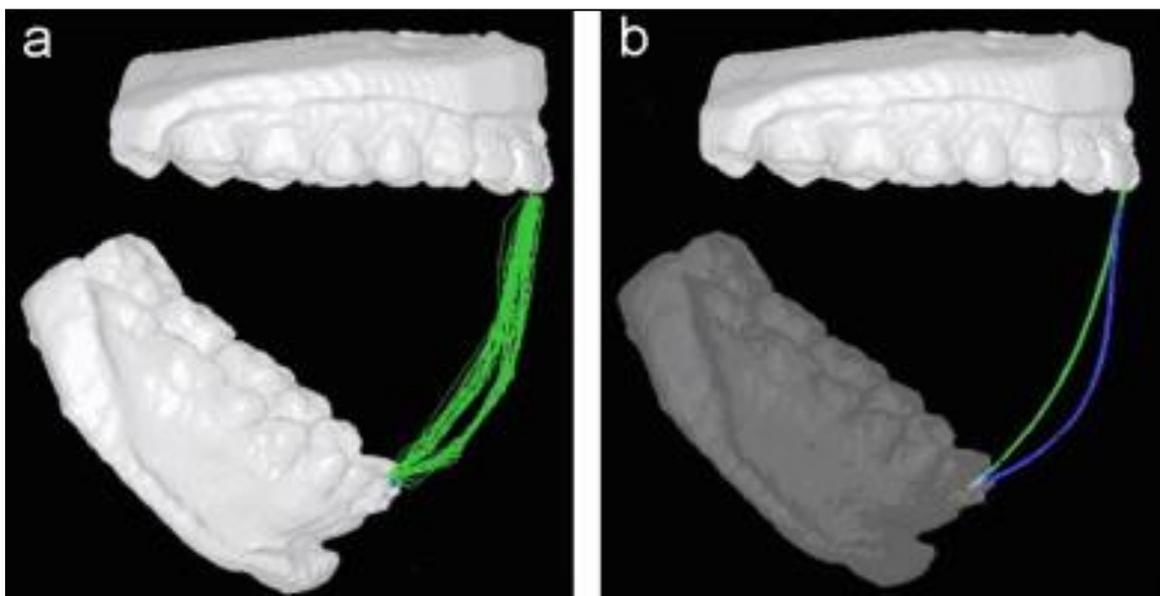


Figure 80 : Modélisation des trajectoires d'ouverture/fermeture (a : obtenue à partir de l'enregistrement de la cinématique mandibulaire, b : après calcul des trajectoires moyennes) [21].

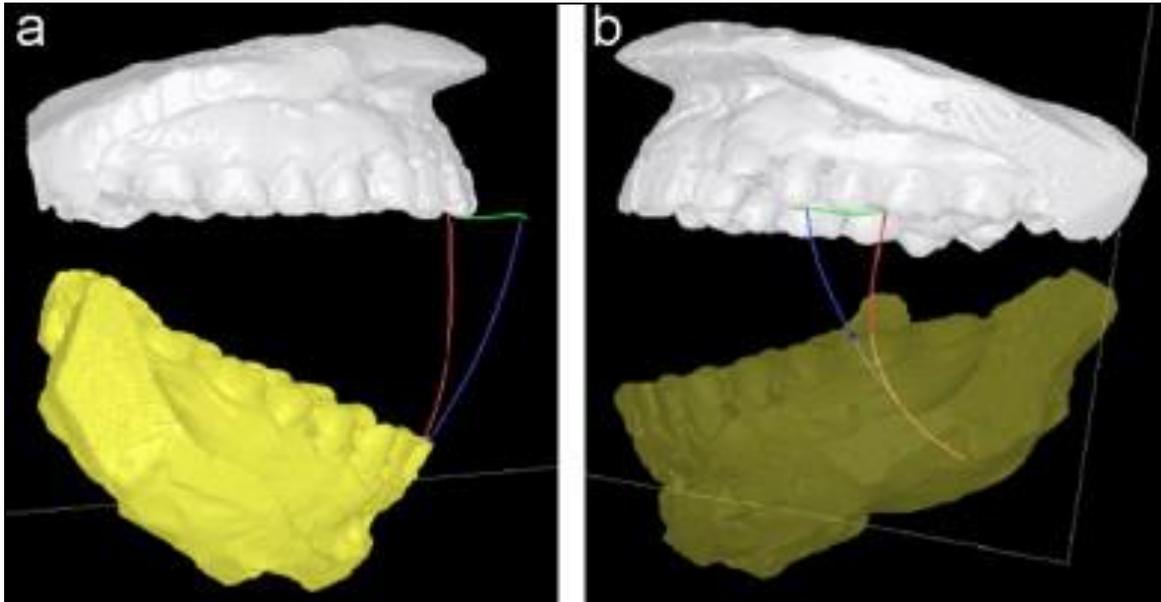


Figure 81 : Modélisation du diagramme de Posselt après calcul des trajectoires moyennes (a : au niveau du dentale, b : au niveau d'un point mandibulaire sélectionné aléatoirement) [21].

3.2.2.3.1.2. Aide à la localisation de la relation centrée

Il a été prouvé qu'il était possible de déterminer informatiquement à quel moment le mouvement de l'arcade mandibulaire était purement rotationnel. En effet, l'enregistrement et l'analyse de la cinématique mandibulaire se fait sur la base du mouvement de deux corps rigides (mandibule et maxillaire) qui se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ainsi le théorème de Chasles permet de redéfinir le mouvement sous la forme de deux séquences temporelles consécutives de translation et de rotation. Le programme informatique étant capable de différencier les deux types de mouvements mandibulaires fondamentaux, il lui est possible de localiser cet axe charnière terminal par une simple répétition par le patient du mouvement d'ouverture/fermeture laissant ainsi au système neuromusculaire, la possibilité de centrer l'ensemble condylo-discal. Une fois la localisation terminée, le programme informatique affiche la position de l'ensemble des "axes charnières terminaux" déterminés lors de la capture motion, afin de définir un "cylindre de possibilité" dans lequel, on peut situer l'axe charnière terminal virtuel par rapport aux arcades virtuelles(Figure 82) [19,21,45,56,63].

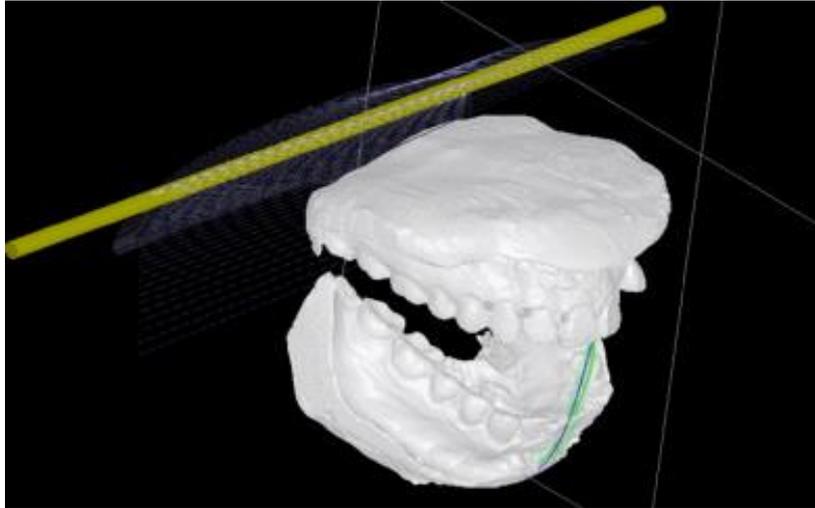


Figure 82 : Affichage expérimental des différents axes de rotation calculé à partir des mouvements d'ouverture (tracé bleu)/fermeture (tracé vert) ; le cylindre jaune représente le volume dans lequel peut se situer l'axe charnière terminal, les tracés gris représentent les axes de rotation instantanés [21].

3.2.2.3.1.3. Détection des pathologies articulaires

Les articulateurs virtuels entièrement adaptables permettent une visualisation des ATM en mouvement ce qui permet un meilleur diagnostic des luxations discales (Figure 83). En effet, lorsque l'articulateur virtuel est en mode animé, la modélisation crânio-faciale s'anime selon les mouvements individuels du patient, et permet donc de suivre les mouvements des condyles dans les ATM. Il est désormais possible d'analyser l'évolution tridimensionnelle de l'espace intra-articulaire lors des mouvements mandibulaires, de réaliser une étude volumétrique de l'espace intra-articulaire et donc de réaliser un diagnostic plus précis des luxations discales (luxation discale latérale par exemple) et des pincements articulaires (compression de la zone bilaminaire)[34,38,44,45,46,95].

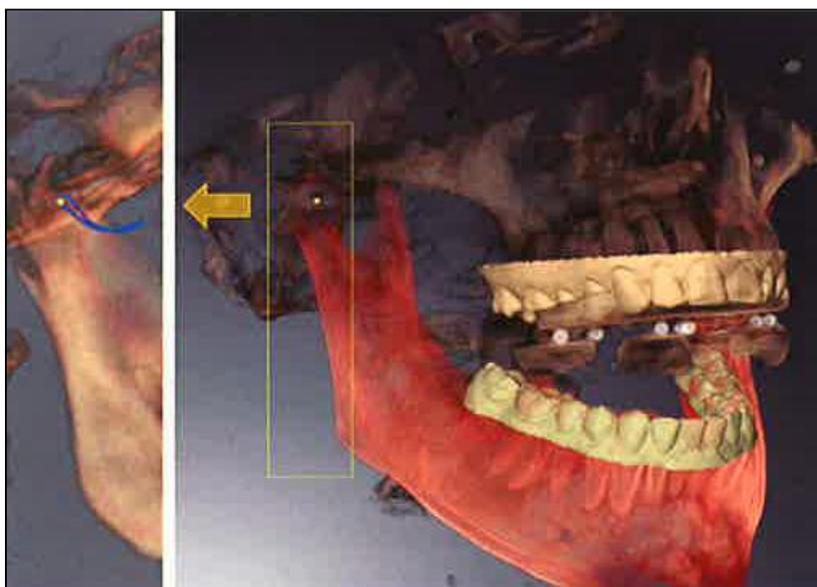


Figure 83 : Affichage simultané des mouvements de l'articulation temporo-mandibulaire et de l'arcade mandibulaire du logiciel SICAT Fonction (SICAT®) [42].

3.2.2.3.2. Sur l'analyse occlusale

3.2.2.3.2.1. Différenciation spatiale des contacts statique et dynamique

Les simulateurs virtuels sont capables de repositionner les modèles en intercuspidation maximale habituelle uniquement avec une empreinte optique vestibulaire. Les articulateurs virtuels totalement adaptables quant à eux, permettent de comparer les contacts dynamiques obtenus par l'enregistrement de la cinématique mandibulaire, aux contacts en OIM (Figure 84). La comparaison entre les contacts statique et dynamique donnent un aperçu du stress subi par les différents éléments dentaires [73].

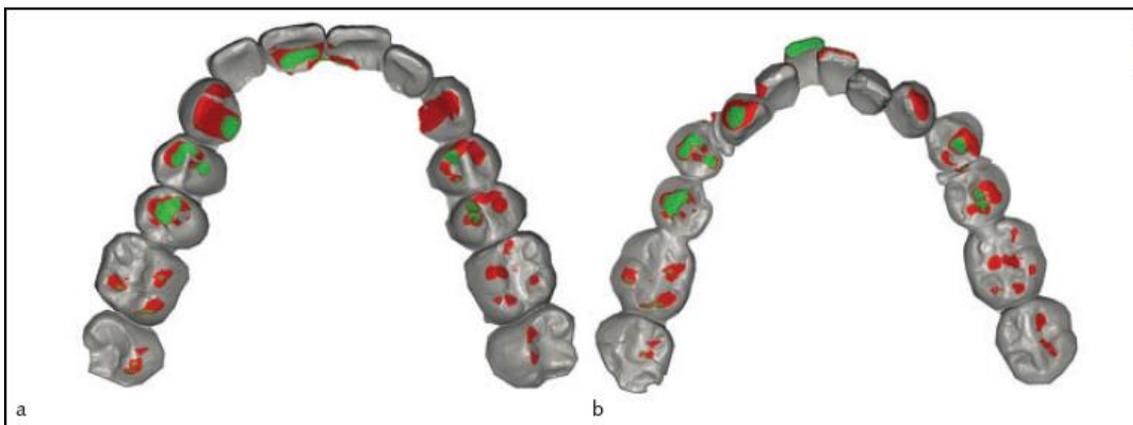


Figure 84 : Affichage différentiel entre les contacts statiques et dynamiques (maxillaire en vue caudale, vert: contact statique, rouge: contact dynamique) sur le logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].

3.2.2.3.2.2. Analyse vectorielle des contacts

Pour une courte séquence telle que l'entrée et la sortie de cycle, il peut être intéressant de savoir quelle direction du mouvement entraîne un contact. Cette évaluation utilise le même principe que le marquage des contacts occlusaux avec du papier occlusal de différentes couleurs. Il est ainsi possible de discriminer un type de contacts (contacts protrusifs) d'un autre type de contacts (contacts en latéralité) lors de mouvement complexe telle que la mastication. Même si aucune force n'est appliquée sur les modèles virtuels, il est possible d'en déduire les vecteurs de forces se produisant en intrabuccal (Figure 85et 86) [70,71,73].

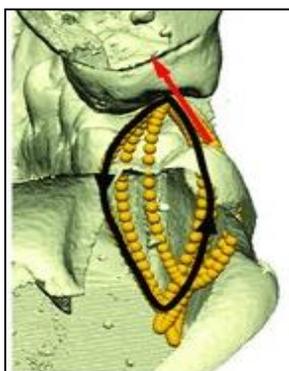


Figure 85 : Exemple de vecteur de force résultant de la mastication. (En pointillé, différents cycles masticatoires, en noir le cycle masticatoire engendrant le vecteur de force (flèche rouge)) [70].

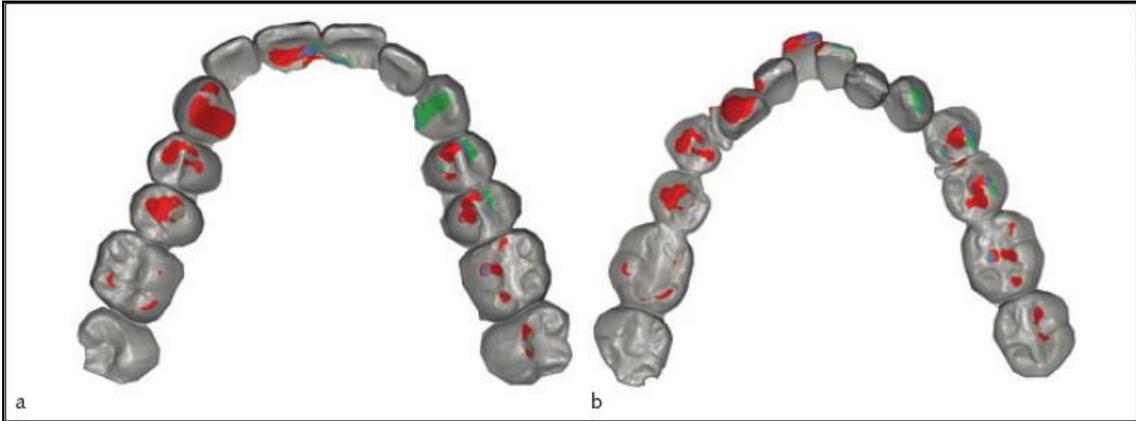


Figure 86: Affichage différentiel des contacts en fonction du mouvement mandibulaire (maxillaire en vue caudale, vert: contacts obtenus lors d'une latéralité gauche, rouge: latéralité droite et bleu : contacts communs aux deux latéralités) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].

3.2.2.3.2.3. Analyse temporelle des contacts

Lors de la fonction, la distribution spatiale des contacts ne peut pas réellement être reliée à la durée d'utilisation des dents. Cependant, il est possible de réaliser une analyse temporelle pour chaque point de contact représenté sur l'articulateur virtuel totalement adaptable par un gradient de couleur. Il en résulte donc un motif de couleur ayant la même topographie que l'analyse spatiale, mais le gradient de couleur nous donne des informations sur les charges subies par une dent en fonction du temps. Grâce à ces informations il est possible de déduire la charge subie par certaines aires et donc les surfaces dentaires subissant dans la durée, le plus grand stress occlusal. Cette information peut aussi être utilisée pour le contrôle qualité des restaurations dentaires et ainsi analyser l'usure des dents naturelles et artificielles (Figure 87) [71,73].

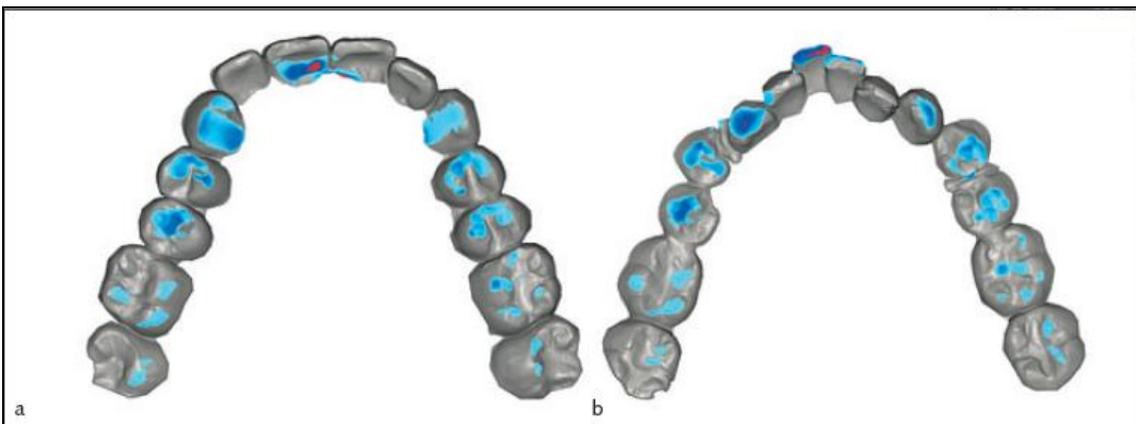


Figure 87 : Analyse temporelle du contact des aires occlusales (maxillaire en vue caudale, rouge: contacte fréquent, bleu: contact moins fréquent) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].

L'analyse occlusale obtenue à partir des figures 86 et 87 permet d'en déduire que le patient a de grande chance d'avoir deux interférences occlusales non travaillantes en latéralité droite et gauche sur les deux incisives centrales mandibulaires.

3.2.2.3.2.4. En relation centrée

A partir du moment où la position de l'axe charnière terminal par rapport aux surfaces dentaires est connue et que la position d'intercuspitation maximale est fixée, il devrait être possible de réaliser un mouvement de protrusion/rétrusion de la mandibule pour localiser d'éventuelles prématurités entre l'occlusion de relation centrée à l'occlusion d'intercuspitation maximale. De plus, la réalisation d'une analyse occlusale en vue d'une équilibration occlusale assistée par ordinateur de prothèses amovibles totales en relation centrée a déjà été réalisée à l'aide du logiciel DentCam (université de Greifswald, Allemagne; Figure 88) [43].

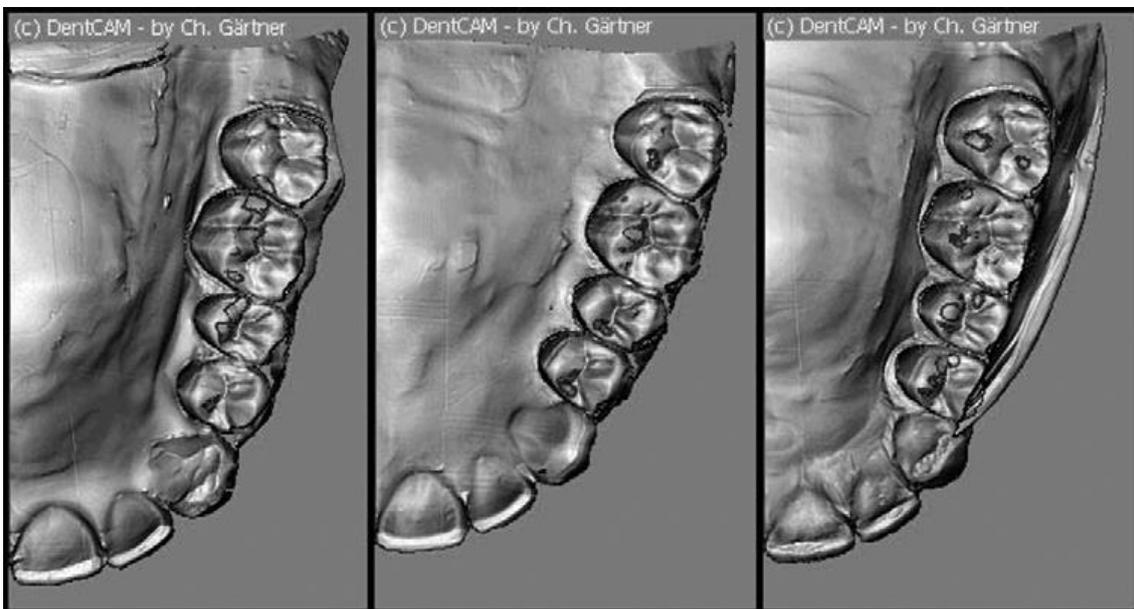


Figure 88 : Equilibration occlusale en RC assisté par ordinateur de prothèses amovibles totales sur le logiciel DentCam (université de Greifswald, Allemagne) [43].

3.2.2.3.3. Sur l'examen fonctionnel global

La pantographie numérisée étant libre, ne présentant pas d'interférence occlusale et fonctionnant dans les six degrés de liberté, rendent possible l'examen du comportement des structures dentaires et osseuses lors de mouvements fonctionnels tels que la mastication. De plus, un enregistrement de l'activité musculaire peut être réalisé de manière synchrone.

La possibilité d'animer les modèles virtuels en fonction des trajectoires masticatoires (Figure 89 et 90) et donc de réaliser une enveloppe fonctionnelle lors de la mastication (Figure 91 et 92) rend possible la détection d'interférences travaillant ou non à la mastication. Les différentes couleurs utilisées pour les contacts statiques et dynamiques, font apparaître différents motifs dépendant de la mastication, donnant ainsi un aperçu intéressant des aires masticatoires. Cela est intéressant pour l'évaluation du comportement masticatoire. De grandes différences peuvent être observées entre le côté gauche et le côté droit des arcades, en particulier si le

patient préfère un côté à l'autre. Les effets d'un dysfonctionnement peuvent ainsi être observés et on peut donc en déduire les effets sur l'efficacité du système masticoire. D'un côté, le regard peut être porté sur les aires de contacts et leur variabilité; d'un autre côté on peut en déduire quelles aires ne sont pas utilisées [72].

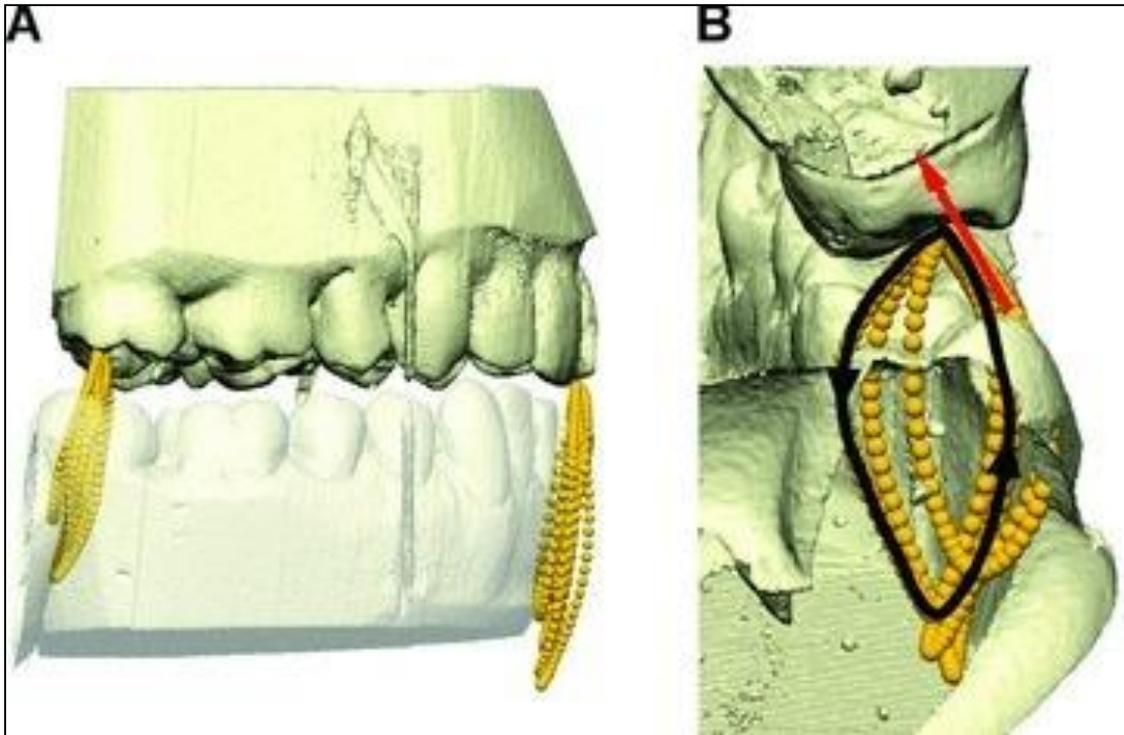


Figure 89 : (A) Trajectoires de la deuxième molaire mandibulaire droite et du point interincisif mandibulaire lors de trois cycles masticatoires. (B) Affichage postérieur des trajectoires de la deuxième molaire mandibulaire droite, la flèche noire représente la trajectoire de la molaire vers la fin du premier cycle masticatoire; sur le logiciel CMGUI (Firefox®) [70].

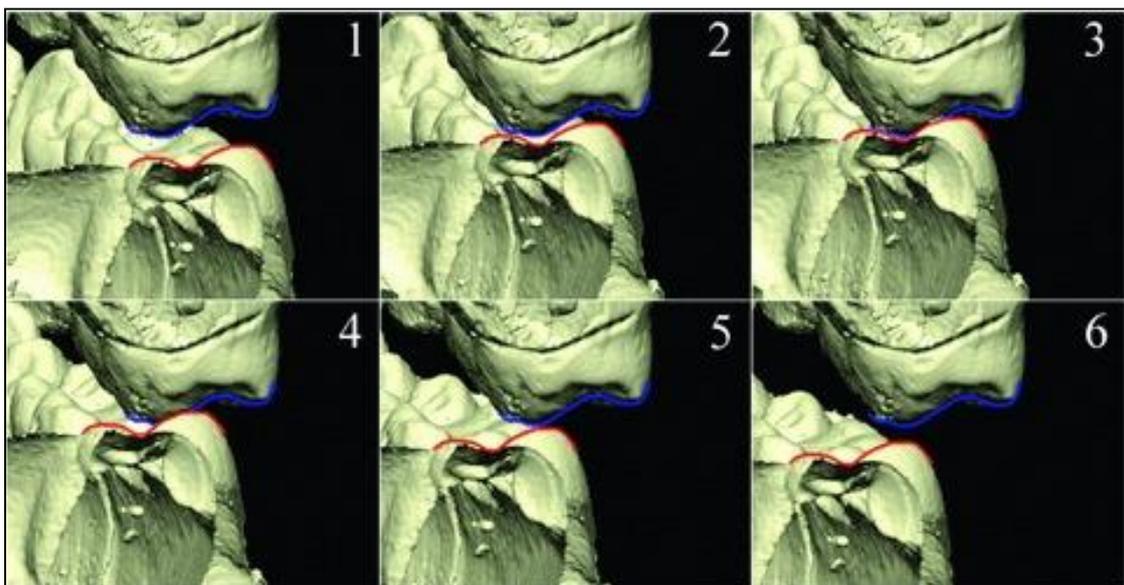


Figure 90 : Affichage de différentes séquences consécutives représentant les deuxièmes molaires mandibulaire et maxillaire du début de cycle jusqu'à la fin du cycle masticatoire; sur le logiciel CMGUI (Firefox®) [70].

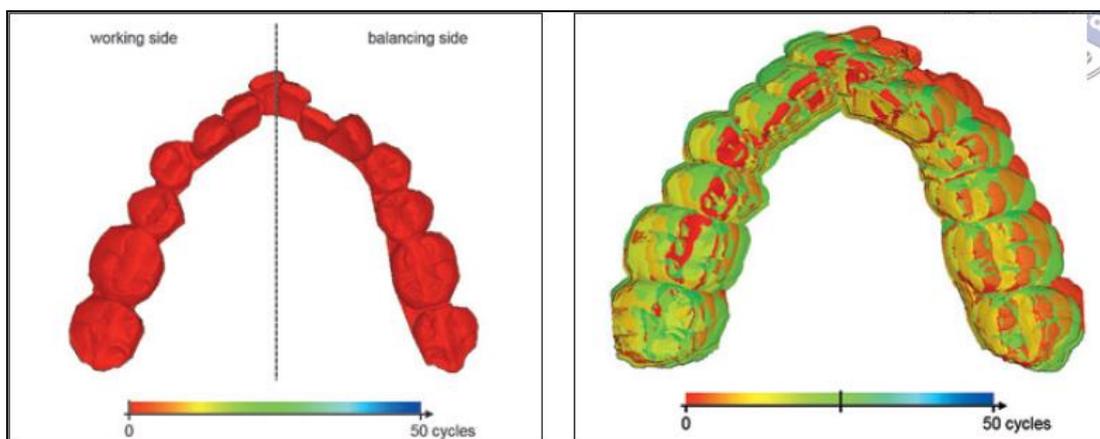


Figure 91 : FGP de l'arcade mandibulaire lors de la mastication unilatérale gauche (schéma de gauche: stade initial, schéma de droite: état après 25 cycles) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [72].

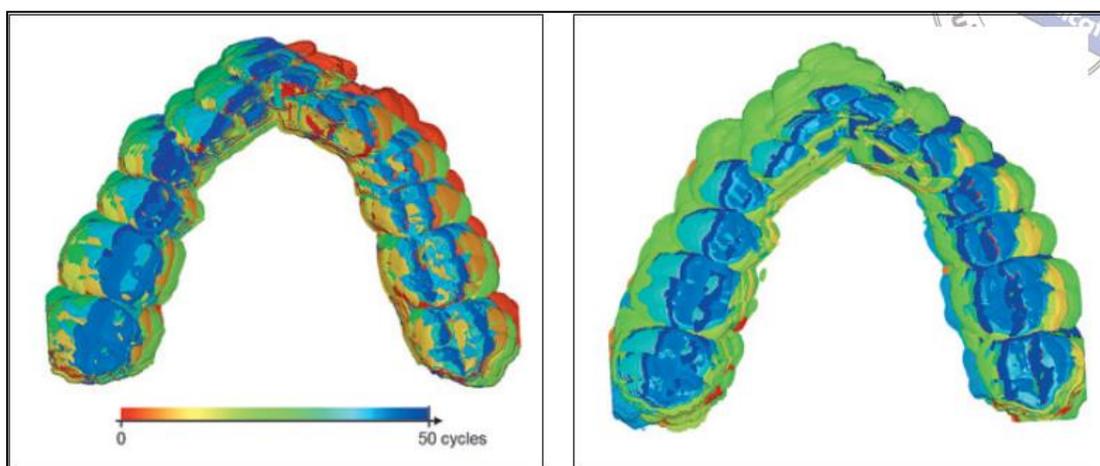


Figure 92: FGP de l'arcade mandibulaire (schéma de gauche: état à la fin de la mastication unilatérale gauche; schéma de droite FGP lors de la mastication bilatérale) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [72].

La réalisation d'un examen aussi complet permettra une meilleure compréhension de la mastication et donc de meilleurs examens fonctionnels. Ainsi, il sera peut-être possible de réaliser une comparaison entre le motif occlusal en OIM et ceux produits par la mastication. De plus, il peut être un appui lors de l'évaluation de nos thérapeutiques et de l'usure des dents prothétiques et naturelles [41,70,71,72,73].

3.2.2.4. Apports thérapeutiques

3.2.2.4.1. Sur les thérapeutiques articulaires

3.2.2.4.1.1. Détermination d'une position physiologique de repos

Dans le cas par exemple, de syndrome algo-dysfonctionnel de l'appareil manducateur alliant des troubles articulaires, le but du clinicien est de trouver la position dans laquelle les symptômes des patients disparaissent ou décroissent de manière significative. Un système informatique

alliant une localisation tridimensionnelle de la position mandibulaire, un enregistrement de l'activité musculaire et un système de déprogrammation musculaire par neurostimulation électrique transcutanée (TENS: transcutaneous electrical nerve stimulation) permettent à la fois d'aider à la localisation correcte de la position mandibulaire de repos (où les muscles masticateurs sont en équilibre), et à la détermination de la trajectoire d'ouverture et fermeture physiologique (c'est à dire sans feed-back des propriocepteurs dentaires); tout en transférant ces informations directement à l'articulateur virtuel (ne nécessitant pas la prise de mesure sur le patient). Ainsi, le TENS stimule les nerfs crâniens trijumeaux (V) et faciaux (VII) pour remédier à l'hypertonie des muscles masticateurs élévateurs et des muscles crâniens, restaure donc une circulation sanguine normale et nettoie les muscles de l'acide lactique et des toxines présents. Les muscles étant déprogrammés, il est possible de contrôler sur l'articulateur virtuel la relaxation musculaire (Figure 93 et 94) et enregistrer la posture de repos physiologique, la fermeture physiologique maximale et la protrusion physiologique maximale des patients de manière scientifique et prévisible sans aucune "manipulation" du patient [14,26,72,77].

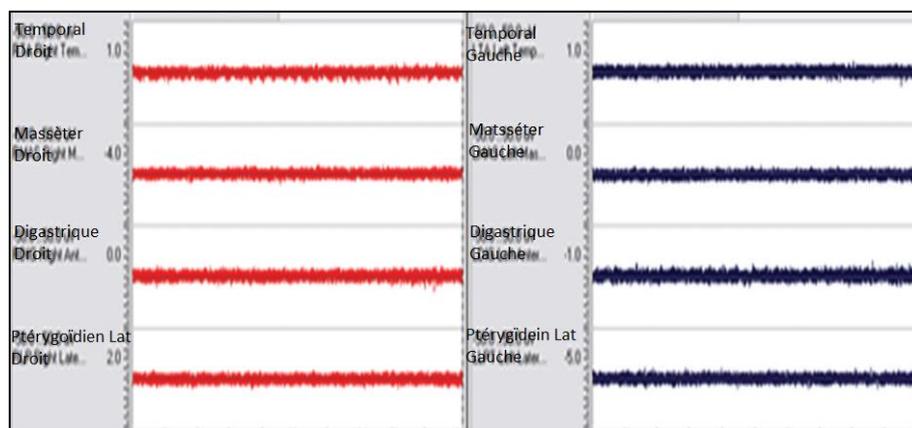


Figure 93 : Affichage de l'activité musculaire après application du TENS, Figure à comparer avec la Figure 49 [77].

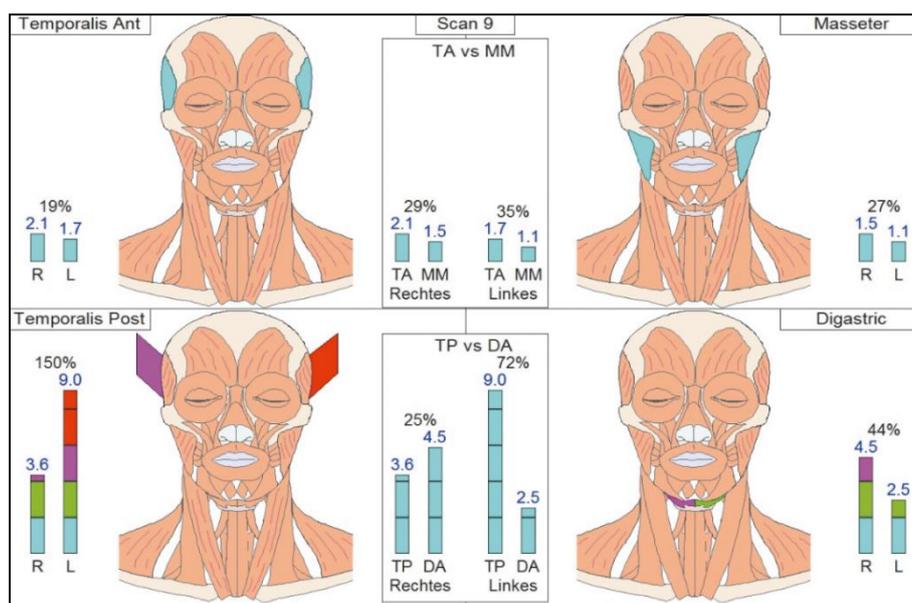


Figure 94 : Affichage de la capacité de décontraction des muscles masséters, temporaux antérieurs, digastriques et cervicaux [76].

La détermination des postures physiologiques (dans le sens vertical et antéropostérieur) permet de définir l'espace thérapeutique qui est délimité d'une part dans le sens vertical par la position de repos et la fermeture physiologique maximale, d'autre part dans le sens horizontal par la protrusion maximale physiologique et la relation centrée. Une fois cet espace défini, l'enregistrement de la position thérapeutique myocentree se fait par fermeture non guidée du patient (environ 1,5 à 2mm à partir de la position de repos) avec un contrôle en temps réel de l'activité musculaire (Figure 95). Ainsi ce type de système permet de localiser la position physiologique de repos et de la transférer directement à l'articulateur virtuel entièrement adaptable pour en déduire la position thérapeutique [26,55,56,76,77].

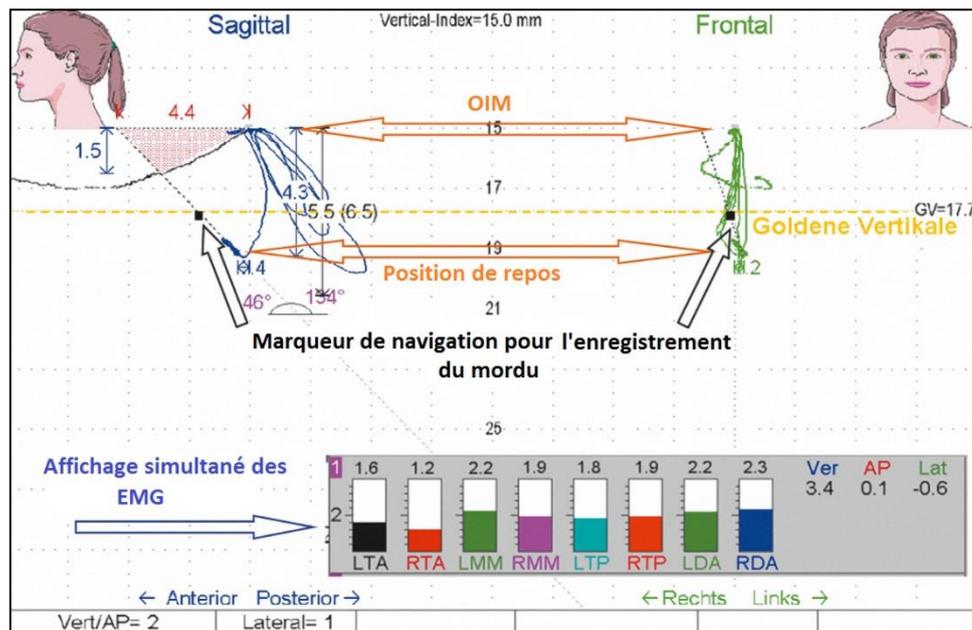


Figure 95 : Affichage simultané de l'électromyographie et de la kinésiographie sur le logiciel SinfoMed k7 (Myotronics-Noromed Inc.), détermination de la position physiologique de repos et de la position d'occlusion myocentree [76].

De plus, dans le cas où la relation centrée n'est pas stable (pincement articulaire, luxation discale), il est nécessaire de redéfinir l'espace intra-articulaire. Les techniques conventionnelles sur articulateur mécanique préconisaient de positionner une cale au niveau du boîtier condylien du condyle atteint, alors qu'avec un articulateur virtuel complètement adaptable, il sera possible de redéfinir précisément l'espace intra-articulaire et donc de positionner la mandibule en fonction de cet espace [14,34,36,56,76,77].

3.2.2.4.1.2. Réalisation de gouttières

Dans le cas de la réalisation d'une gouttière de traitement des dysfonctions craniomandibulaires ou de positionnement préprothétique (orthotic amovible), la position mandibulaire thérapeutique ayant été précédemment déterminée, l'articulateur virtuel reproduit cette position permettant ainsi la conception du wax-up virtuel de l'orthotic selon cette position. Dans le cas de protection intra buccale, il est nécessaire que la position mandibulaire réponde à certains impératifs antérieur et postérieur, comme laisser suffisamment d'espace interbord libre pour permettre une ventilation buccale à l'effort ou encore de positionner les condyles sur la

penne antérieure des tubercules articulaires. Ces impératifs peuvent être paramétrés directement sur l'articulateur virtuel ou sur le patient ce qui nécessitera dans un deuxième temps l'enregistrement tridimensionnel de la position mandibulaire.

Une fois la position mandibulaire connue, le programme informatique réalise le wax-up qui permettra à la machine outil, de réaliser la gouttière.

3.2.2.4.2. Sur les thérapeutiques occlusales

3.2.2.4.2.1. Equilibration occlusale

L'apport des articulateurs virtuels complètement adaptables permet de réaliser un diagnostic occlusal plus complet et plus intuitif pour la réalisation d'une équilibration occlusale soustractive.

3.2.2.4.2.2. Réalisation de "Functionally Generated Path" (FGP)

Les articulateurs adaptables sont de par l'enregistrement de la cinématique mandibulaire et le jumelage de ces données avec les modèles virtuels, capables de réaliser directement cette technique. De plus, même si cela ne représente pas un intérêt clinique majeur, il est possible de choisir le maxillaire en mouvement, il est donc possible de réaliser un FGP mandibulaire ou maxillaire (Figure 96 et 97). Ce qui peut être intéressant lors de la conception d'élément prothétique. Pour finir, il est possible de réaliser un FGP "fonctionnel" lors de la mastication (Figure 83 et 84) [21,47,51,72].

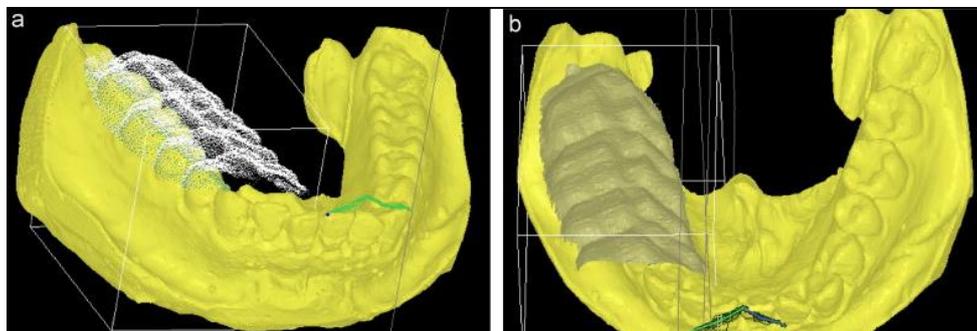


Figure 96 : Modélisation d'un FGP mandibulaire en fonction de trajectoires mandibulaires affichées en vert (a: lors de sa création, b: état final) [21].

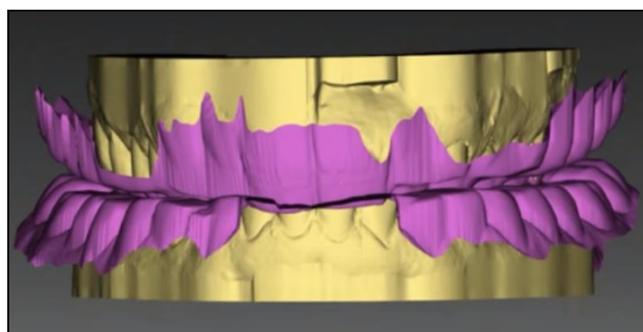


Figure 97: Affichage différentiel entre les modèles (beige), et le FGP maxillaire et mandibulaire (Violet) sur le logiciel SICAT Function (SICAT®) [103].

3.2.2.4.2.3. Détection des parafunctions

Certains logiciels ont la capacité de réaliser une détection semi-automatique, d'une éventuelle pathologie fonctionnelle telle que le bruxisme. En effet, le praticien sélectionne une couronne dentaire et l'algorithme de segmentation informatique peut rechercher d'éventuelles facettes d'usure qui seront démarquées des surfaces dentaires avoisinantes (Figure 98). Ceci peut être utile lors d'une équilibration occlusale par addition [43].

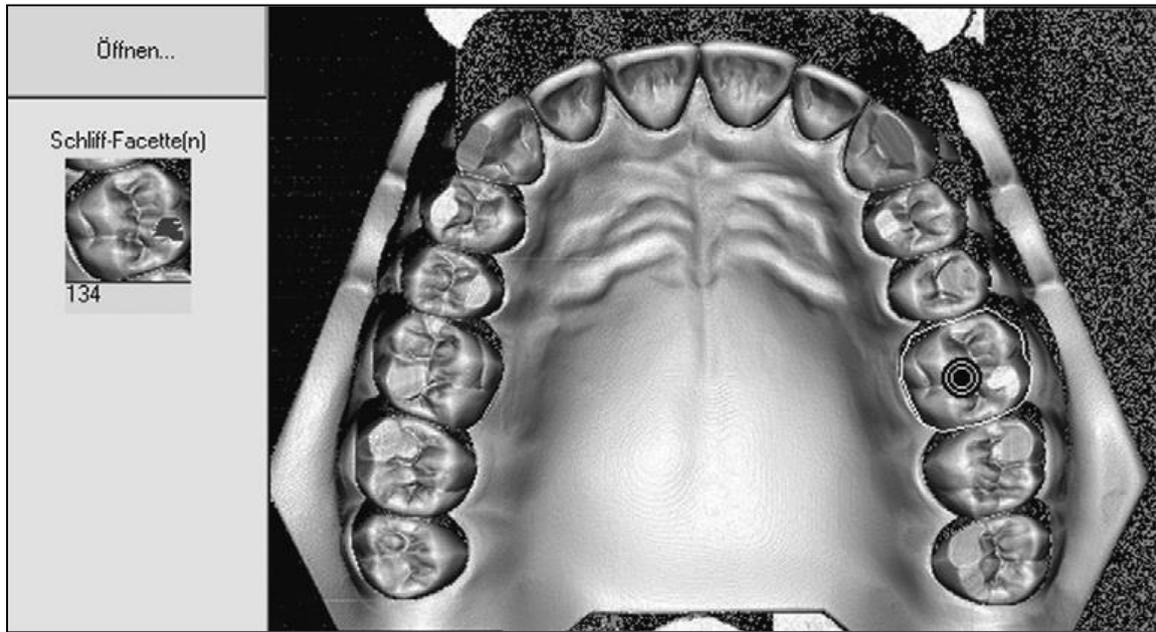


Figure 98 : Module de détection automatique des facettes d'usure du logiciel DentCam (université de Greifswald, Allemagne) [43].

3.2.2.4.2.4. Sur la planification chirurgicale

L'avantage des articulateurs virtuels totalement adaptables pour la planification implantaire est la capacité qu'ont ces articulateurs, de pouvoir animer une modélisation (squelette crânio-facial), ce qui pourrait permettre "d'axialiser" le plus possible les forces occlusales par rapport à l'axe implantaire que ce soit en OIM mais aussi lors de l'occlusion dynamique. De plus pour la planification des chirurgies orthognatiques, ils déjà possible de prévisualiser l'acte chirurgical par l'intermédiaire d'un logiciel l'Osteoplan™ (Harvard Surgical Planning Laboratory). Il sera ainsi possible de prévoir le résultat postopératoire afin de le comparer à l'état préopératoire, mais dans un futur proche, il sera peut être aussi possible d'animer la mandibule en fonction des anciennes trajectoires mandibulaires afin de visualiser l'impact de la chirurgie sur la fonction (Figure 99, 100 et 101) [93].

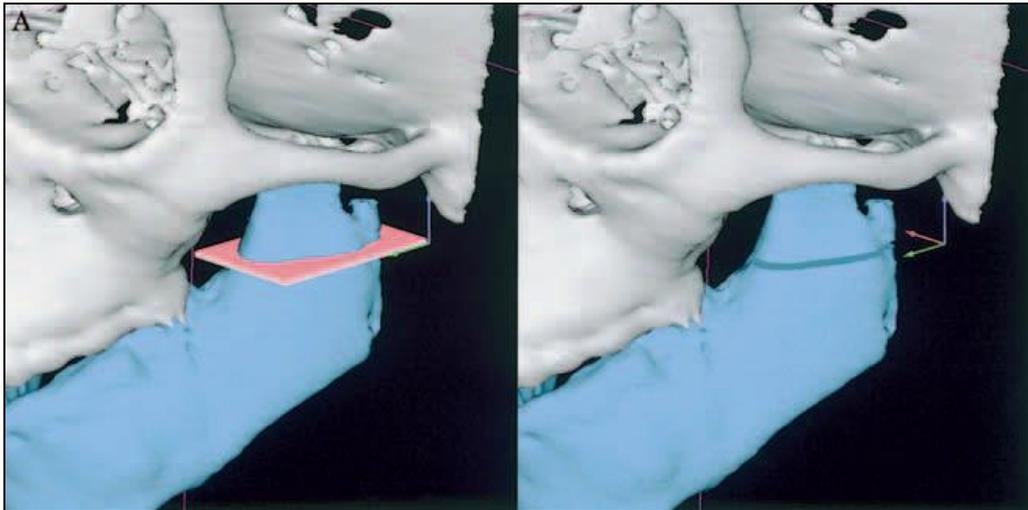


Figure 99 : Prévisualisation de l'acte opératoire grâce positionnement de "l'outil de découpe informatique" sur le logiciel Osteoplan™ [93].

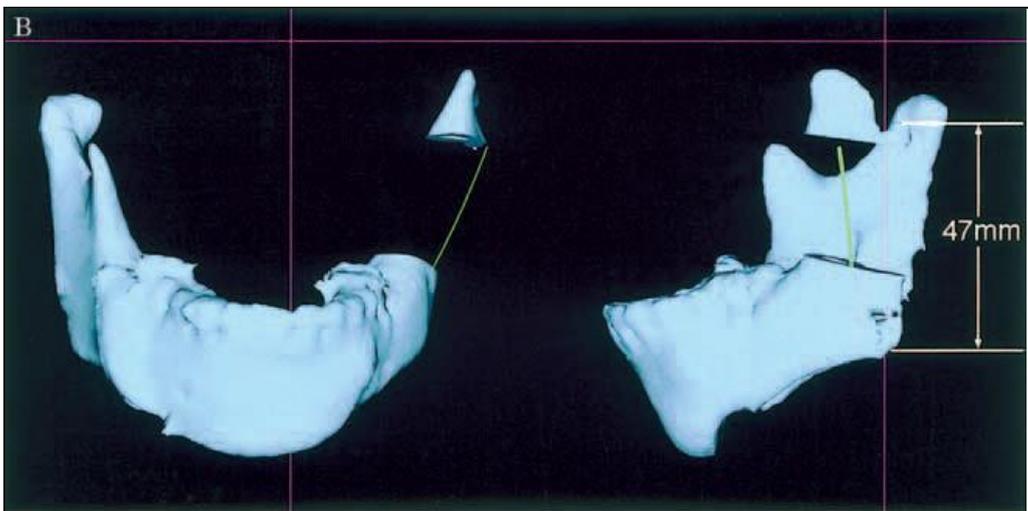


Figure 100 : Prévisualisation de l'acte opératoire, repositionnement automatique de la mandibule calculé par ordinateursur le logiciel Osteoplan™ [93].

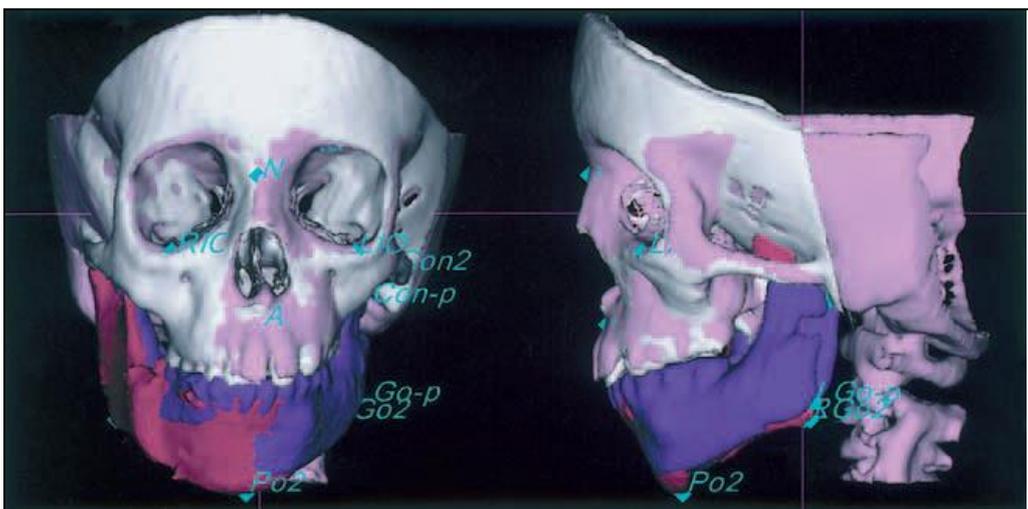


Figure101 : Affichage simultané entre la position mandibulaire préopératoire en rose et post opératoire en violet sur le logiciel Osteoplan™ [93].

4. Discussions

4.1. Gestion entièrement virtuelle d'un cas complexe

Lors de réhabilitations prothétiques complexes, il est nécessaire de rassembler un nombre important d'informations afin de guider la réflexion en vue de la réalisation du projet prothétique. Des exemples de cas complexes dont le projet prothétique a été réalisé à l'aide d'un articulateur virtuel associé à la modélisation cranio-faciale existent déjà. Pour ce faire, l'articulateur virtuel calcule la relation intermaxillaire et l'orientation du plan d'occlusion par rapport au plan de référence en fonction de la typologie squelettique. Mais les auteurs n'ont pas précisé d'une part comment leur articulateur virtuel simule les déplacements mandibulaires, et d'autre part comment le logiciel conçoit le projet prothétique à partir de la typologie squelettique, ce qui est préjudiciable à la validité de leur article. D'un autre côté, il doit être possible d'utiliser les articulateurs virtuels totalement adaptables pour concevoir un projet prothétique complexe par CAO sans nécessiter de double montage. Même si l'indication majeure de ces articulateurs est l'évaluation des structures osseuses des ATM chez les patients atteints de DAM et ayant des symptômes persistants, ils permettent d'enregistrer un nombre important d'information nécessaire à la réalisation de ce type de projet prothétique [46,60].

En effet, lors de la réhabilitation prothétique de cas complexes, il est nécessaire d'acquérir un nombre important d'informations que les articulateurs virtuels totalement adaptables sont capables d'acquérir et de mettre en commun, ce qui n'était pas directement possible avec les articulateurs mécanique et virtuel mathématique:

- Modèles virtuels,
- Modélisation squelettique,
- Coupes céphalométriques,
- Cinématique mandibulaire,
- Activité musculaire,
- Photographies.

De plus, l'enregistrement de la cinématique mandibulaire permet d'établir l'enveloppe fonctionnelle mandibulaire et donc la programmation des déplacements de la mandibule, ce qui permet de concevoir une architecture occlusale la plus individualisée possible.

Même si aucun programme informatique n'a encore été développé à cet effet, il est possible "d'imaginer" un programme capable d'effectuer cette tâche en s'appuyant sur un rationnel de construction occluso-architecturale tel que le concept de l'Octa développé par le Dr Orthlieb. Ainsi, le praticien recueille les informations nécessaires, l'articulateur virtuel totalement adaptable met ces informations en commun et le programme informatique sous la direction du praticien réalise une version virtuelle du projet prothétique. On peut donc imaginer que le praticien paramètre les différents points du rationnel, ce qui guide le programme informatique pour modéliser à partir des tissus dentaires résiduels (corrélation) et de la base de données, le projet prothétique [61,64].

- OCTA1:** L'Octa 1 est la première étape qui consiste à définir un plan horizontal de référence, qui est matérialisé par le positionnement de l'arc facial de transfert permettant le positionnement du moulage maxillaire sur l'articulateur [61,68].
 Dans le cas d'un articulateur virtuel totalement adaptable, ce plan de référence est matérialisé par le plan du support d'enregistrement maxillaire qu'il soit fixé sur le crâne du patient (correspondance avec le PAO) ou qu'il soit fixé directement sur l'arcade maxillaire (plan arbitraire). La possibilité de jumeler les données d'enregistrement cinématique aux données d'imagerie permet de passer d'un plan de référence, à une structure de référence, et dans ce cas là, la modélisation virtuelle du squelette crânio-facial. Ainsi toutes les données céphalométriques sont directement transférées dans l'articulateur virtuel et associées aux données pantographiques de la cinématique mandibulaire (Figure 102).

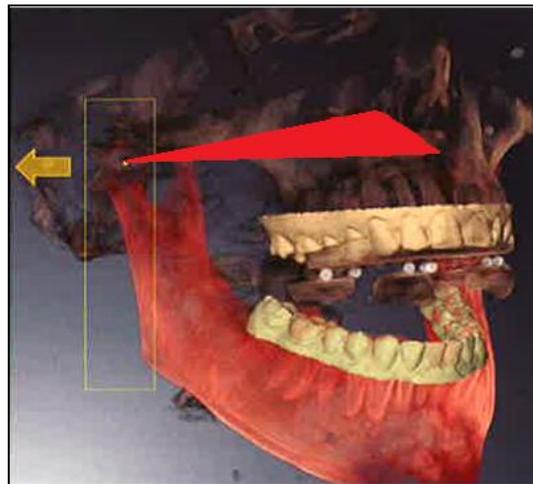


Figure 102 : Matérialisation du plan de référence du support d'enregistrement.

- OCTA2 et 3 :** Ces deux étapes consistent à déterminer la position mandibulaire de référence puis la position thérapeutique [61,68].
 Lors de la gestion de cas complexe, la position de référence est la RC, il est donc nécessaire de déterminer la position de l'axe charnière terminal par rapport à la position du maxillaire et de la mandibule. Les articulateurs virtuels complètement adaptables permettent de localiser (semi)automatiquement cet axe charnière terminal et donc de positionner la mandibule en relation centrée sans qu'il soit nécessaire de réaliser un double montage (Figure 103).

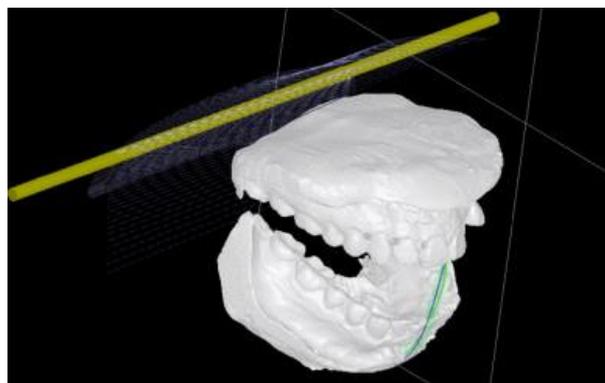


Figure 103 : Localisation de l'axe charnière terminal par rapport aux arcades [21].

Une fois la position de référence déterminée, il est nécessaire de déterminer la position thérapeutique. Dans le cas de reconstructions prothétiques, la position de référence est la RC qui ne peut pas être simulée directement par les articulateurs virtuels mathématiques. A partir de cette position qui est reproduite par les articulateurs virtuels totalement adaptables, le praticien peut positionner la mandibule en fonction du contexte ostéo-articulaire et musculaire afin d'obtenir la position physiologique de repos et par extension la position thérapeutique (Figure 104) [34,45,46].

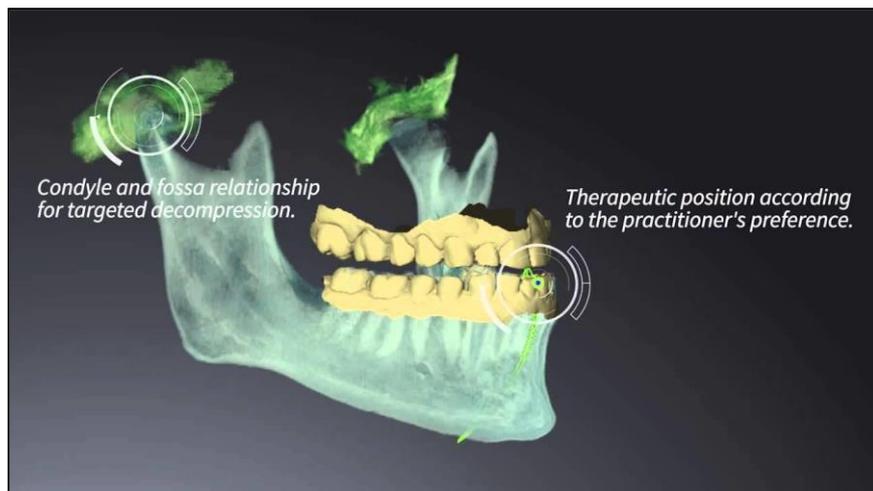


Figure 104 : Choix de la position thérapeutique en fonction des préférences du praticien et du rapport inter maxillaire [34].

- **OCTA4** : Cette étape consiste à positionner le groupe incisivo-canin en fonction de deux facteurs:
 - les "normes" céphalométriques (ligne commissure labiale/point Xi, ligne A/pogonion),
 - l'axialisation des forces occlusales selon le principe d'orthogonalité ou loi de la tangente [61,64].

Il doit pouvoir être possible d'afficher directement sur l'articulateur virtuel ces informations (figure 93). En effet, d'une part il est possible de faire varier le gradient de couleur afin de faire apparaître les tissus mous et d'autre part il est possible de réaliser une analyse céphalométrique sur la modélisation du scanner (Figure 105) [17,18,37,88].

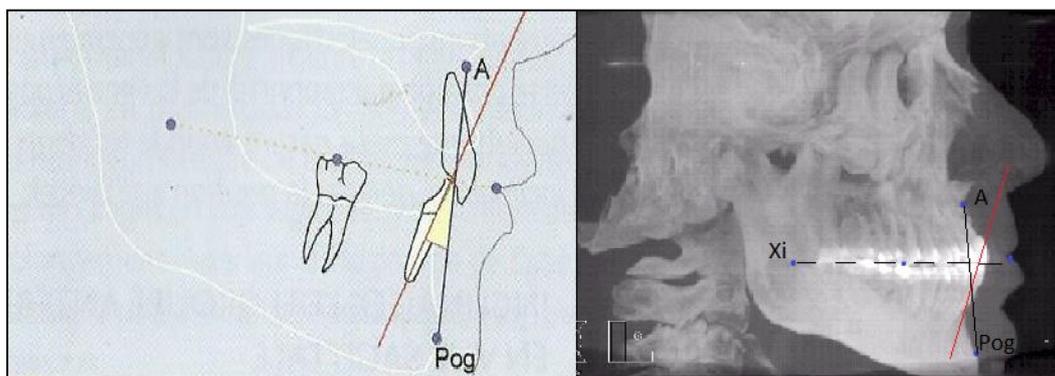


Figure 105 : Tracé céphalométrique pour les incisives mandibulaires et sa représentation sur l'articulateur virtuel [64].

L'articulateur virtuel complètement adaptable ayant la capacité de restituer l'axe charnière terminal, il doit être possible d'appliquer la loi de la tangente afin d'axialiser les pressions occlusales du wax-up virtuel selon l'axe de fermeture propre au patient (Figure 106) [61,64].

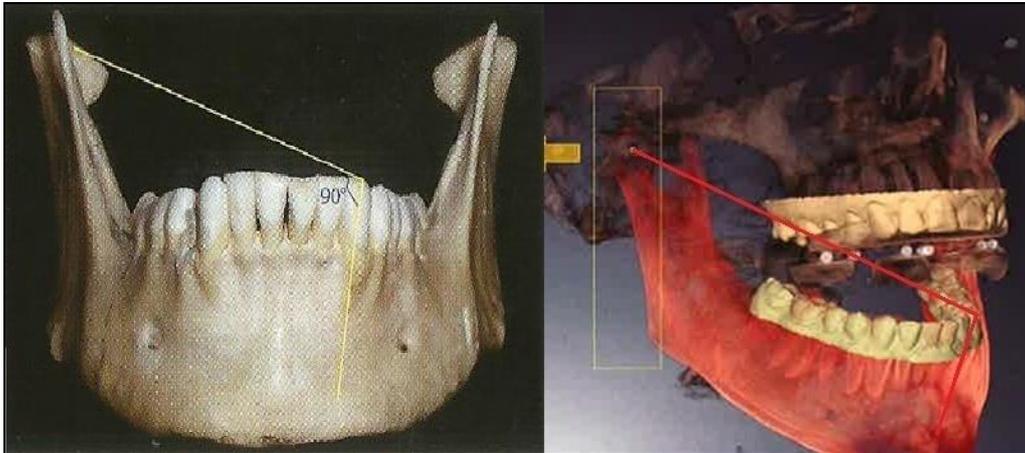


Figure 106 : Matérialisation du principe d'orthogonalité sur la 33 [64].

- **OCTA5:** Une fois le groupe incisivo-canin mandibulaire en place, les critères de positionnement des faces vestibulaires (partie esthétique) du groupe incisivo-canin maxillaire sont fondés essentiellement sur des références esthétiques. Les trois points critiques à préciser sont la situation des bords cervicaux (ligne des collets), la situation de l'angle vestibulaire du bord libre (courbe esthétique), et la situation du bombé vestibulaire [61,64].

Pour cette étape il est déjà possible d'utiliser la/les photos qui ont été jumelées avec les structures ostéo-dentaires afin d'assurer l'intégration esthétique des faces vestibulaire du groupe incisivo-canin en fonction des lignes bipupillaire et parasagittale d'une part et de la courbe esthétique d'autre part (Figure 107).



Figure 107 : Affichage d'une photo tridimensionnelle sur l'articulateur virtuel du CEREC [100].

- **OCTA6:** Cette étape consiste à déterminer la courbe de Spee en fonction de deux éléments:
 - la typologie squelettique (hypo ou hyper divergent),
 - et de la position des arcades par rapport aux condyles (surtout l'axe charnière terminal).

Ces deux éléments permettent à l'aide d'un gabarit, de matérialiser sur une téléradiographie de profil, le rayon de la courbe de Spee afin qu'elle respecte le principe d'orthogonalité [61,64].

Pour cette étape l'apport de la 3D doit pouvoir permettre d'inscrire les courbes droite et gauche au sein d'une sphère dont le rayon et le centre sont définis en fonction de la morphologie squelettique. De plus, lors de cette étape, la modélisation de la courbe de Spee doit pouvoir être positionnée suivant l'axe charnière terminal virtuel et le wax-up virtuel des incisives mandibulaires (Figure 108). Sa matérialisation à l'aide d'un gabarit sur une téléradiographie de profil doit pouvoir être reproduite directement sur l'articulateur virtuel.



Figure 108: Schéma de matérialisation du rayon et de la courbe de Spee.

- **OCTA7:** Cette étape consiste à établir les pentes de guidage (antérieur et postérieur) en fonction des déterminants postérieurs et donc du réglage de la table antérieure (principe homothétique du "twin-stage") [61,64].

Les déterminants postérieurs ayant été calculés lors de la pantographie numérisée, il doit être possible grâce au quadrilatère de Vienne de régler la table antérieure virtuelle pour déterminer les pentes de guidage antérieures. De plus il est possible de vérifier l'efficacité des guides antirétroposition sur la cinématique condylienne (Figure 109).

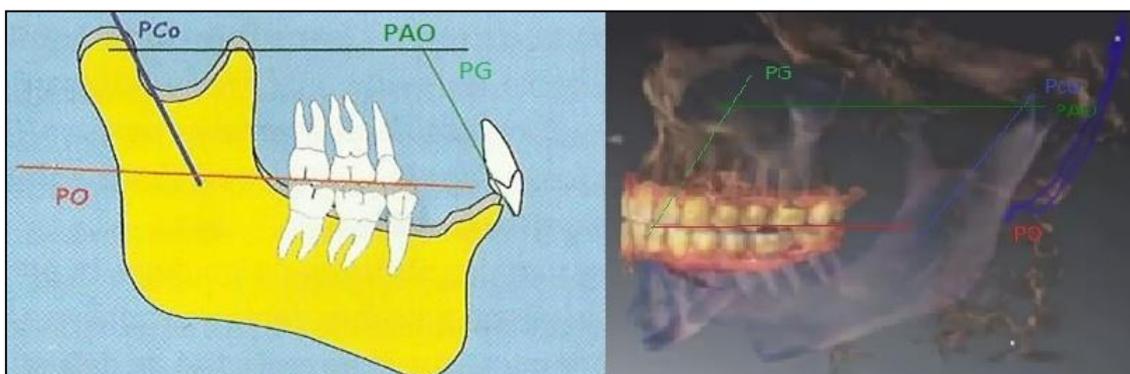


Figure 109 : Quadrilatère de Vienne (PAO: plan axio-orbitaire, Pco: pente condylienne, PO: plan d'occlusion, PG: pente de guidage) [64].

- OCTA8:** La dernière étape consiste à déterminer les courbes de Wilson qui varient en fonction de chaque doublet de paire de dents. Pour le moment, l'utilisation de gabarits qui matérialisent les différentes courbures de chaque paire de dents est obligatoire, mais certains auteurs soulignent l'absence de données à ce sujet. Ils ont donc exprimé leur intérêt pour les techniques numériques, ainsi l'apport de la 3D animée qui devrait permettre le calcul informatique des différentes courbes de Wilson en fonction de la typologie squelettique et de l'emplacement de l'ACT (Figure 99). D'autres auteurs quant à eux, se sont intéressés au rapport entre la puissance masticatrice et les courbures occlusales. Ils ont ainsi défini une sphère englobant sans superposition stricte les courbes de Willson et Spee, ce qui devrait permettre, à un programme informatique (de manière inversée), la modélisation de ces courbures (Figure 110) [41,61,64].

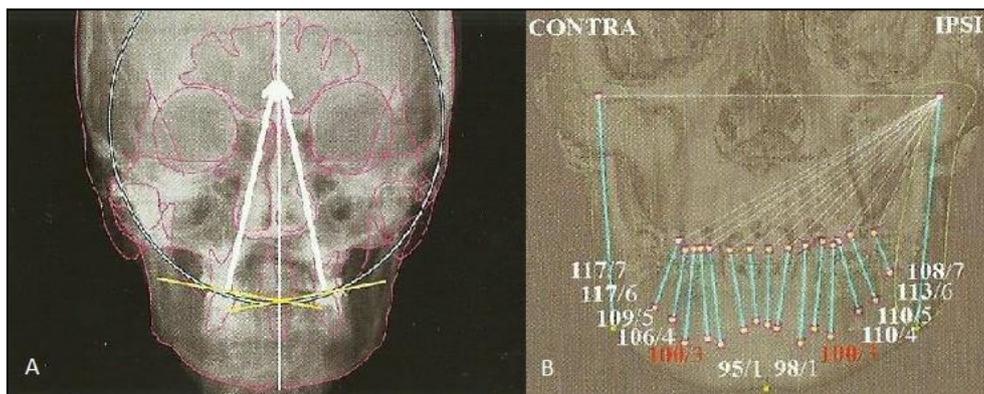


Figure 110 : Les images tomographiques permettent de disposer de critères de construction des courbes de Wilson (A: matérialisation de la courbe de Wilson sur une coupe frontale, B: matérialisation des angles radicaire/dentaire en fonction de l'ACT) [64].

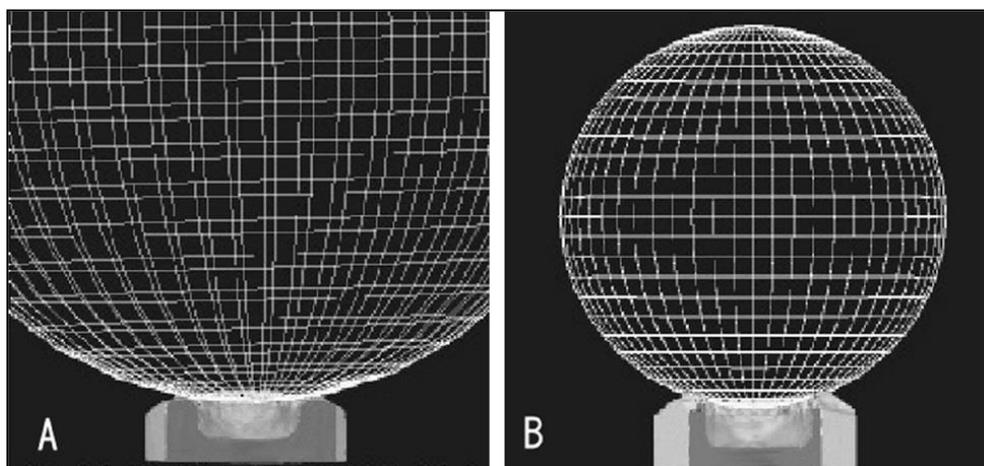


Figure 111: Matérialisation sur un modèle virtuel de la sphère englobant à la fois la courbe de Spee et de Willson (A: sphère "occlusale" d'un sujet ayant des courbes faiblement marquées; B: sphère "occlusale" d'un sujet avec des courbes fortement marquées) [41].

- Evaluation à long terme:** La possibilité de réaliser un projet prothétique sur un articulateur virtuel totalement adaptable devrait permettre de réaliser une évaluation fonctionnelle à l'aide des enregistrements cinématiques du patient [71].

4.2. Validation

Plusieurs études ont été réalisées pour valider la précision des simulateurs virtuels. Ainsi, un nombre équivalent de points de contact a été trouvé entre l'articulateur virtuel DentCAM (articulateur virtuel complètement adaptable) et l'articulateur mécanique Comp. (KaVo, DLeutkirch), lors de mouvements de latéralité (contacts occlusaux sur articulateur virtuel: 92; sur articulateur mécanique: 90). De plus, une correspondance a pu être établie pour la visualisation du nombre et de la position des points de contacts [57].

D'autre part, une étude comparative entre les techniques conventionnelle et virtuelle, visant à évaluer le positionnement des maxillaires lors de la planification chirurgicale et les gouttières chirurgicales orthognatiques obtenues par les deux techniques, conclut que le repositionnement par technique virtuelle est plus précis, mais ils n'ont pas trouvé de différence significative entre les deux gouttières. Dans le même sens, une autre étude visant à comparer les techniques sur articulateur mécanique et sur articulateur virtuel sans double montage, conclut que, d'une part la technique virtuelle est aussi précise que la technique conventionnelle et d'autre part que la technique virtuelle permet à un chirurgien maxillo-facial inexpérimenté d'obtenir de bons résultats (Figure 101) [27,57].

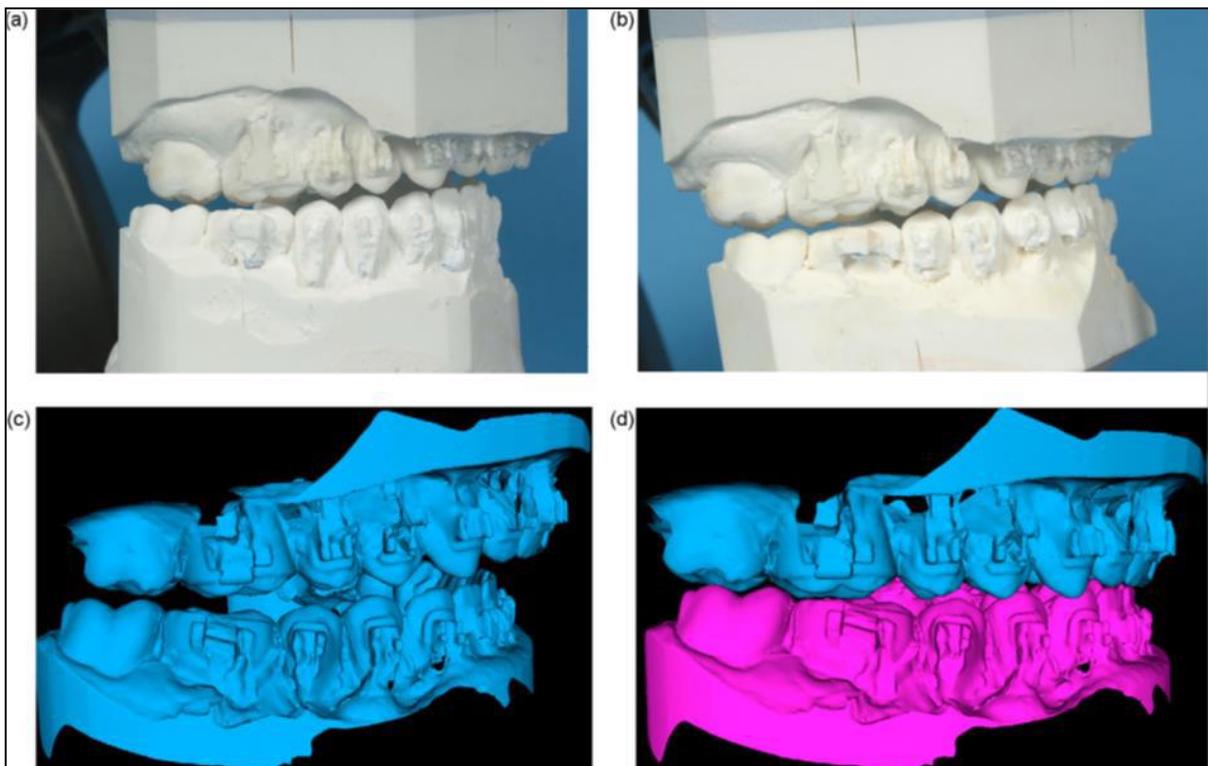


Figure 112 : Comparaison entre les méthodes conventionnelle et virtuelle [27].

De plus, la capacité de reproduction des contacts en OIM des simulateurs virtuels mathématique est considérée comme bonne mais de la même manière que les articulateurs mécaniques, ils sont incapables de simuler les mouvements fonctionnels. A l'inverse, les articulateurs virtuels complètement adaptables ont une bonne capacité de reproduction des mouvements fonctionnels, en contre partie, la reproduction des contacts dépend directement de la précision des enregistrements qui varient en fonction des systèmes de pantographie numérisée. En effet,

les systèmes d'enregistrement de la cinématique mandibulaire ont une marge d'erreur variable allant de $1\mu\text{m}$ à $100\mu\text{m}$ (données constructeur: 0.1mm axe y, 0.2mm axe x et z pour une amplitude de mouvement de 15mm; 2° de précision des paramètres articulaires pour le JMA ou le JMT⁺ du SICAT Function). A cela, il faut ajouter la marge d'erreur des empreintes optiques de l'ordre d'une dizaine/vingtaine de μm , et le risque d'erreur dû au jumelage des données (légère mobilité du port empreinte de jumelage, mobilité du support d'enregistrement).

Pour finir, la différence majeure entre les articulateurs virtuelles mathématiques et les articulateurs virtuels complètement adaptable réside dans le fait que les premiers réalisent par l'intermédiaire de trajectoires standardisées mais paramétrables, une simulation plus ou moins réaliste ; alors que les derniers reproduisent les mouvements mandibulaires en fonction d'un enregistrement cinétique plus ou moins précis.

4.3. Avantages

Les simulateurs virtuels, en particulier les articulateurs virtuels totalement adaptables, sont capables de simuler l'OIM, l'occlusion dynamique et le comportement des ATM. De plus la visualisation 3D permet une nouvelle approche des contacts occlusaux [32,34,45,46,49,52,72,75,82].

Il à été montré qu'il était plus simple et plus précis de déterminer les paramètres articulaires à l'aide d'un système d'enregistrement extra-buccal qu'avec des cires occlusales. Mais les problèmes majeur des systèmes axiographiques conventionnels (ou numérique mais utilisé en technique conventionnelle) sont d'une part la nécessité de déterminer précisément le plan axio-orbitaire (donc l'axe charnière terminal et le point sous-orbitaire) et d'autre part le risque de décalage de l'axe de l'axiographe sans possibilité de corriger ce décalage. En effet, les repères déterminés arbitrairement ou selon des critères anatomiques à la surface de la peau ne se projettent que dans 46,1 % des cas sur le condyle ou sur les bords de celui-ci, et que dans le reste des cas la projection se situe en dehors des contours condyliens. Ce problème peut être illustré par un nuage de points groupés autour d'un centre de rotation supposé donnant une cinématique totalement différente en fonction du centre de rotation sélectionné (Figure 113 et 114). A contrario, les systèmes axiographiques/pantographique/kinésiographique informatisés optiques ou ultrasonores sont sans contacts et lorsqu'ils sont utilisés avec un programme d'articulateur virtuel complètement adaptable, il n'est plus nécessaire de définir le PAO ou de localiser l'ACT car d'une part les mouvements de la mandibule sont enregistrés en fonction du maxillaire et d'autre par l'ACT est déduit des mouvements enregistrés [21,34,45,63].

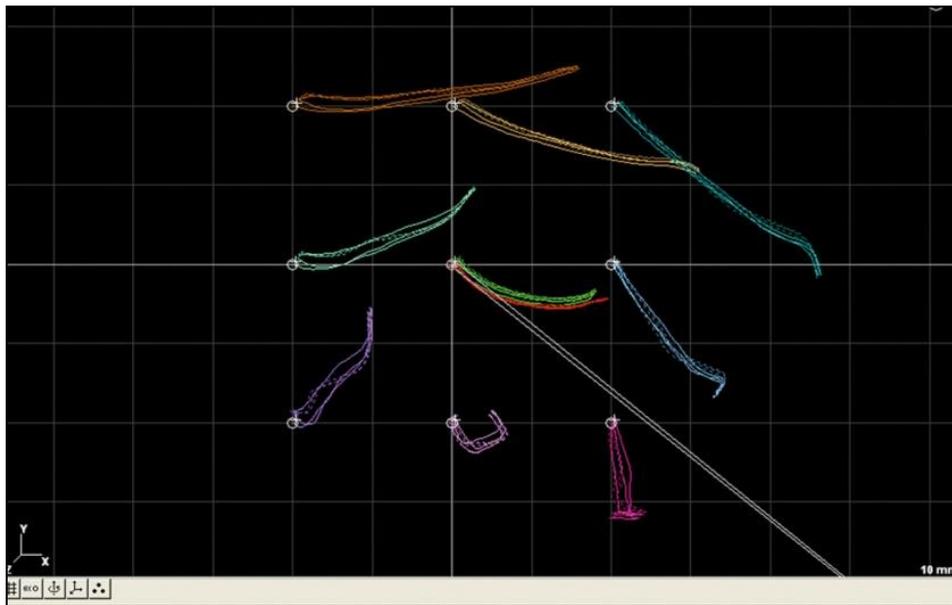


Figure 113 : Affichage des différentes trajectoires du condyle en fonction du "centre de rotation sélectionné" sur un même patient [45].

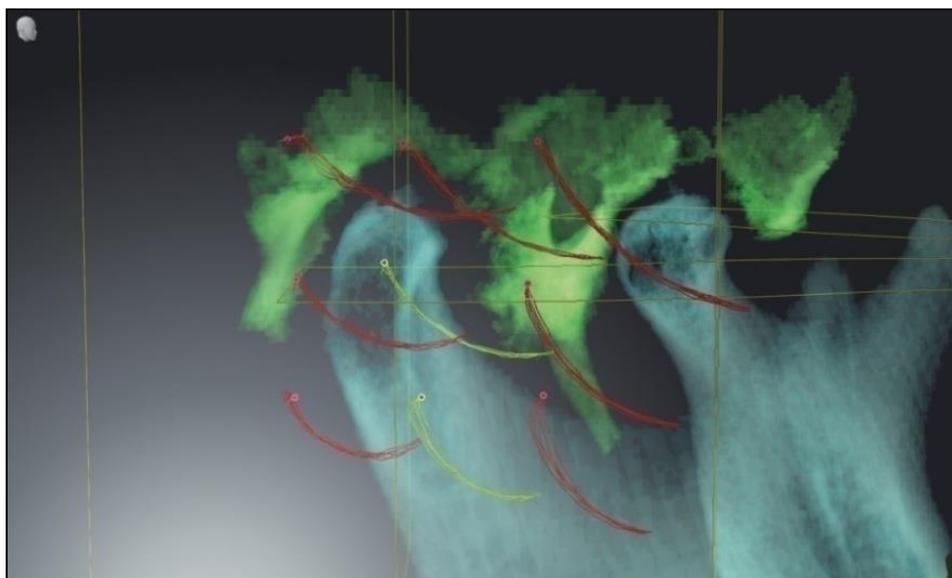


Figure 114 : Affichage et superposition de ces mêmes trajectoires aux données d'imagerie [45].

De la même manière que les articulateurs mécaniques, les articulateurs virtuels nécessitent un respect de la chaîne de précision (procédures standardisées) afin qu'ils puissent simuler correctement les positions mandibulaires et l'occlusion. A cet effet, certaines étapes peuvent être validées par le praticien mais aussi par le programme informatique. Ainsi, le programme d'empreinte optique du CEREC valide automatiquement l'empreinte [50].

Les articulateurs virtuels sont des outils relativement flexibles et versatiles. Ainsi le praticien peut passer rapidement d'un simulateur à un autre, à condition qu'il ait recueilli les informations nécessaires [77].

Il est possible de faire le pont entre l'articulateur virtuel et sa proposition thérapeutique virtuelle, soit par l'intermédiaire de machines outils lors de la phase de FAO ou d'un articulateur mécanique spécial (SP1 de Zirkozahn®) lorsque l'élément prothétique nécessite l'intervention du technicien de laboratoire (montage du cosmétique). Il est important de noter que pour le moment, la conception d'élément prothétique (couronnes, bridge, prothèse amovible...) n'est possible qu'avec les simulateurs virtuels mathématiques à l'exception des orthotics amovibles qui peuvent être conçus à l'aide d'un articulateur adaptable [22,47,52,66,75,81,82].

Ce type d'instrument, permet une meilleure communication de la triade patient-patricien-prothésiste, que se soit pour le temps nécessaire au montage des modèles (montage en "complet" sur articulateur mécanique: 2h, montage complet sur articulateur virtuel totalement adaptable: 15min), l'information du patient ou la conception au laboratoire du wax-up virtuel d'un élément prothétique (Figure 115). En effet, le fichier (informatique) patient peut être envoyé instantanément par internet. D'un point de vue pédagogique, ces outils peuvent donner une vision détaillée de l'occlusodontie, en montrant en même temps l'évolution occlusale et articulaire [4,7,17,18].

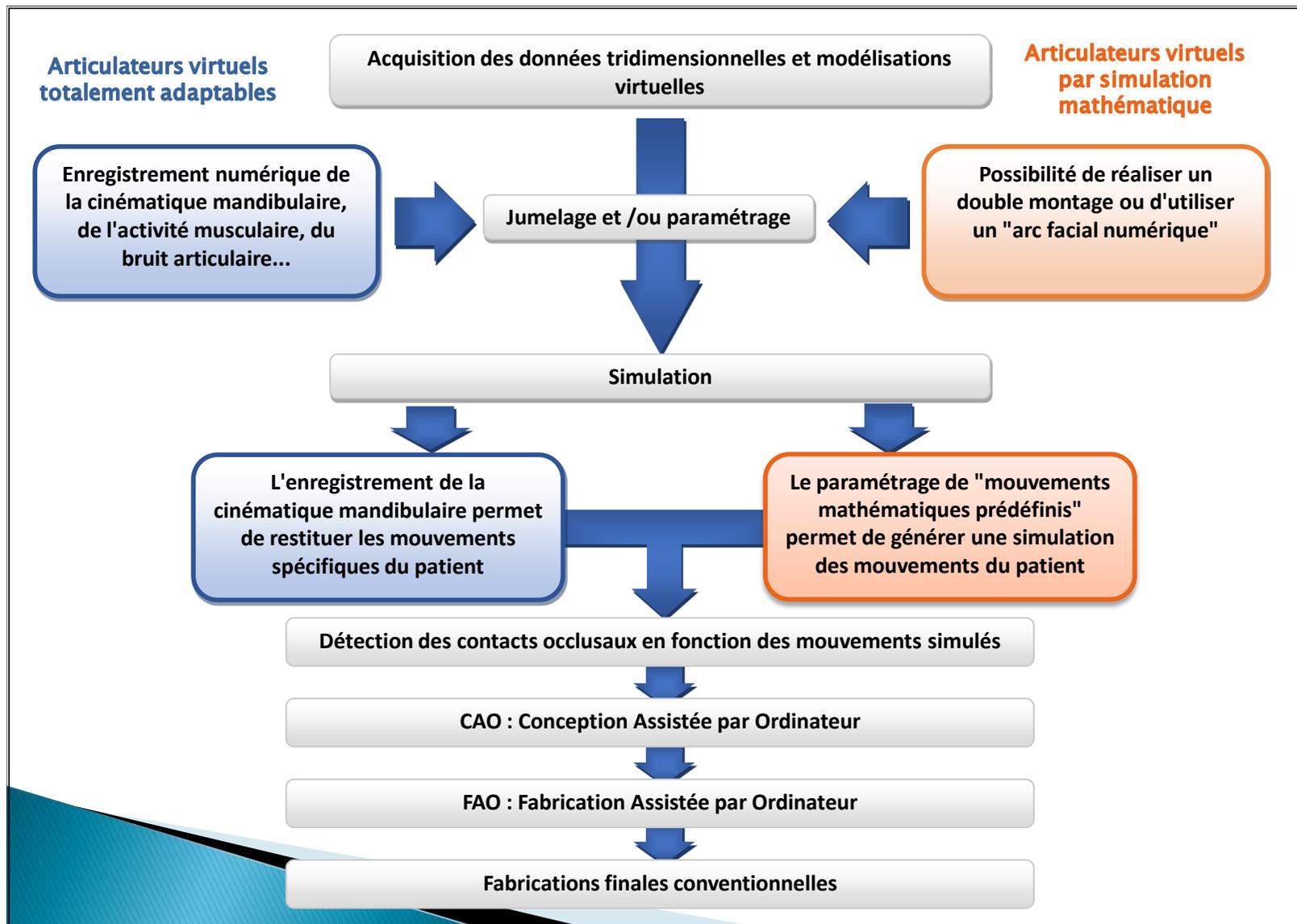


Figure 115 : Schéma récapitulatif du fonctionnement des articulateurs virtuels [42, 78].

4.3.1. Limites

Lors de la réalisation d'une pantographie numérisée, il est nécessaire de pouvoir fixer le support d'enregistrement sur la/les arcades mais dans le cas des patient édentés, il est impossible de fixer le support d'enregistrement sur les arcades édentées hormis dans le cas de patients implantés où les implants doivent pouvoir être solidarités de manière fixe avec les supports d'enregistrement.

Les articulateurs virtuels complètement adaptables sont capables d'enregistrer la direction des mouvements mandibulaires et donc d'en déduire les vecteurs de force, mais ces vecteurs de force ne sont que qualitatifs (en mouvement ou non) ; ils n'indiquent en rien la force exercée par les muscles pour permettre le déplacement de la mandibule et donc la force exercée par les dents mandibulaires sur les faces occlusales maxillaires [71,72,73].

La numérisation d'un objet, restitue l'objet dans le monde virtuel sous la forme d'un "block solide", donc, tout comme les empreintes classiques, les empreintes optiques fournissent des modèles virtuels qui ne sont pas capables de reproduire la dépressibilité desmodontale et la mobilité de la symphyse mandibulaire. Certains articulateurs virtuels totalement adaptables sont équipés d'un paramètre permettant de faire varier la distance entre les surfaces occlusales maxillaires et mandibulaires (offset), ce qui permet de simuler d'une certaine manière la dépressibilité desmodontale. De la même manière, les photographies superposées ne peuvent pas être animées [39,71].

Le support d'enregistrement extrabuccal de par son poids et son encombrement, peut provoquer un inconfort ou un changement du comportement salivaire ce qui peut influencer et fausser la cinématique mandibulaire, surtout lors de la fonction masticatoire. A contrario, certains émetteurs passifs (aiment du système SinfoMed K7, Myotronics-Noromed Inc.) n'ont de par l'absence de liaison électrique ou d'encombrement, aucune influence sur la posture et/ou la cinématique mandibulaire [26,70,76].

Les articulateurs virtuels complètement adaptables ont un certain coût, que se soit biologique de part l'exposition au rayonnement X lors de la réalisation du scanner ou économique pour l'obtention des différents éléments et programme nécessaire à son fonctionnement (1000\$ pour un articulateur mécanique adaptable et son dispositif de paramétrage contre 30000\$ pour son équivalent virtuel). En effet, les indications de Sicat Function dans la pratique clinique de routine sont en cours de définition par les réglementations et directives relatives à l'utilisation du CBCT pour le diagnostic des troubles de l'ATM. Sicat Function n'est pas indiqué en première intention pour le diagnostic et le traitement de ces troubles. Comme d'autres techniques d'imagerie, le CBCT complète les procédures de diagnostic. De plus il est nécessaire de connaître le fonctionnement de base des simulateurs virtuels pour pouvoir se servir correctement des articulateurs virtuels complètement adaptables [4,40,45].

Les articulateurs virtuels mathématiques ne peuvent être utilisés tout au long de la "chaîne de production" d'une prothèse, lors d'une reconstruction prothétique. En effet, il est nécessaire d'utiliser des techniques conventionnelles comme le montage en relation centrée sur articulateur physique afin de monter les modèles virtuels selon le même rapport intermaxillaire

ou encore le montage de la céramique cosmétique. A contrario, si l'élément prothétique est usiné, il n'est pas nécessaire de réaliser de double montage, mais la qualité esthétique de l'élément prothétique dépendra du monobloc. Ainsi, si le choix se porte sur un bloc monochromatique, la restauration sera aussi monochromatique; ou si le choix se porte sur un bloc polychromatique, l'intégration esthétique dépendra directement de la capacité d'usinage de l'élément prothétique en fonction des différentes teintes du bloc et de l'adéquation entre toutes les teintes du bloc et celles de l'élément prothétique. Une fois l'élément prothétique usiné, il est toujours possible de réaliser un maquillage des surfaces prothétiques afin d'obtenir une meilleure intégration esthétique.

Quant aux articulateurs virtuels totalement adaptables, ils sont encore en développement, ils ont été utilisés pour la création d'orthotics, mais ils n'ont pas encore été adaptés à la conception de prothèse, il n'existe donc aucun programme permettant de le réaliser. De plus, certains éléments nécessaires à l'utilisation d'un articulateur tels qu'une butée et une table antérieure virtuelle n'ont pas encore été ajoutés. De plus, peu d'études comparatives entre le virtuel et l'in vivo, ont été réalisées permettant de valider l'analyse fonctionnelle qu'ils apportent. Une étude réalisée en 2012 montrant que les systèmes d'enregistrement de la cinématique mandibulaire était peu fiable mais des progrès ont sûrement été réalisés depuis [4].

4.4. Perspectives

Les articulateurs virtuels, sont en constante évolution. Ils suivent à la fois le développement du matériel informatique et l'évolution des concepts. Ainsi, certaines lacunes, comme l'absence d'arc facial numérique commercialisé pour les articulateurs virtuels mathématiques pourront être comblées. De plus, il sera peut-être possible de s'affranchir de l'étape de stratification de la céramique cosmétique, soit en réalisant des blocs polychromatiques individualisés, ou alors grâce au développement de nouvelle technique comme le frittage sélectif par laser de la céramique, par exemple.

Il est possible d'imaginer que dans un futur proche le développement des simulateurs virtuels et en particulier des articulateurs virtuels complètement adaptables permettra grâce à des programmes permettant la réalisation de planification prothétique selon un concept occluso-architectural précis, de s'affranchir des articulateurs mécaniques.

De plus, il doit être possible d'améliorer les techniques de jumelage et ainsi de s'affranchir du scanner RX (dans le cas du SICAT Function) ou de l'empreinte classique surfacique (dans le cas du 3D VAS) afin de diminuer le risque d'erreurs dû au nombre d'étapes intermédiaires. En effet, il doit être possible de réaliser un jumelage direct par l'intermédiaire d'une empreinte optique, entre les surfaces dentaires et le support du pantographe numérique.

En outre, à partir de la superposition des enregistrements pantographiques et myographiques sur les structures tridimensionnelles, il doit être possible pour un algorithme informatique de calculer les forces musculaires mises en œuvre afin de déterminer les forces occlusales subies par les surfaces dentaires. De plus, lors de la planification chirurgicale orthognatique, il devrait aussi être possible de prévisualiser par calcul informatique, les changements fonctionnels et musculaires provoqués par la chirurgie (Figure 1165) [89,94].

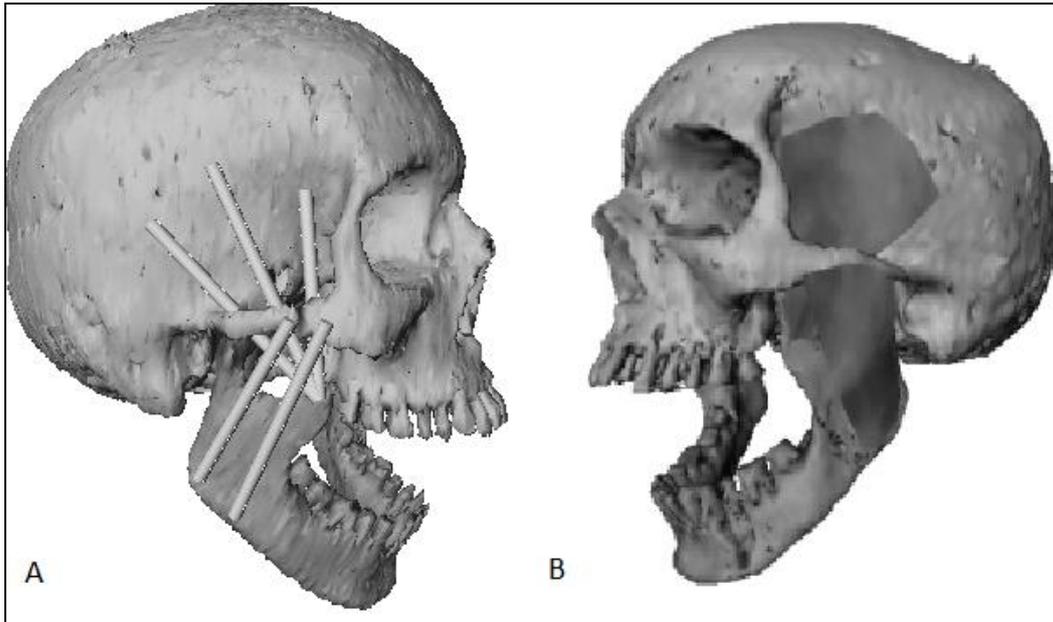


Figure 116: Modélisation musculaire du logiciel IDCS (A: modélisation des vecteurs de force musculaire des trois chefs temporaux et des deux chefs massétéris, B: modélisation des entités musculaires du temporal et du masséter) [94].

De plus, de la même manière que les articulateurs virtuels mathématiques ont bénéficié de la création d'une banque de donnée "dentaire" afin de leur permettre d'affiner leur conception prothétique, ils pourront bénéficier de la création d'une banque de données "cinématique" afin d'affiner leur simulation et donc leur conception prothétique. En outre, cette banque de données "cinématique mandibulaire" associée aux enregistrements devrait permettre d'approfondir nos connaissances sur les fonctions physiologiques et pathologiques mandibulaires.

Pour finir, il sera peut-être possible de résoudre le problème de dépressibilité desmodontale et de mobilité symphysaire en utilisant soit un algorithme spécifique qui les simulera, ou alors un système tiers qui sera capable d'enregistrer ces différentes mobilités ou encore en réalisant des modèles virtuels "d'arcades dentaires articulées" [90].

Conclusion

Les articulateurs sont des outils diagnostiques et thérapeutiques indispensables à la réalisation d'un projet prothétique. De par le développement de la CFAO, il a donc été nécessaire de créer un équivalent numérique pour combler à la fois les lacunes des articulateurs mécaniques et des premiers systèmes de CFAO: Les articulateurs virtuels. De par leur dématérialisation, ces articulateurs virtuels sont capables d'emmagasiner un nombre important d'informations. La possibilité de combiner toutes les informations nécessaires à la réalisation d'un diagnostic occluso-gnathologique fonctionnel complet assisté par ordinateur, va permettre de préciser et de simplifier les protocoles actuels de montage sur articulateur. De plus ces systèmes vont fournir les informations manquantes aux protocoles actuels de conception et fabrication assistées par ordinateur afin de s'affranchir des étapes obligatoires de montage sur articulateur physique. Ainsi, il sera possible de réaliser un plus grand nombre d'étapes de laboratoire par informatique, ce qui représente un gain de temps, une diminution des coûts et donc une amélioration de la triade patient-praticien-prothésiste. Néanmoins, les systèmes actuels, qu'ils soient encore en développement ou déjà commercialisés, nécessitent une amélioration tant sur le plan de la précision, que sur le plan de la programmation informatique, pour pouvoir un jour supplanter les articulateurs mécaniques. De plus, ces systèmes, tout comme les protocoles classiques, utilisant des modèles en plâtre montés sur articulateurs mécaniques, ne prennent pas en compte la dépressibilité desmodontale et la mobilité réduite de la symphyse mandibulaire.

Bibliographie

1. **Ahlers MO.** *The attachment of paraocclusal tray adapter to the lower arch for axiography.* Journal of craniomandibular function 2009;1(3):241-250.
2. **Aubert H, Pieaud J.** *Démystification de la pratique occlusale. Une approche raisonnée et simplifiée pour une utilisation quotidienne.* Paris: MED'COM; 2012.
3. **Baker E W, Schuenke M, Schulte E et Col.** *Anatomie tête et cou en odontostomatologie.* Paris: Médecine science publication/Lavoisier; 2012.
4. **Balch J. H.** *Verification of the accuracy of electronic mandibular movement recording devices: An in vitro investigation [A thesis presented for the graduate studies council, in partial fulfillment of the requirements for degree master of dental science].* Memphis: University of Tennessee Health Science Center; 2012.
5. **Bias F, Kordass B.** *Comparative examination of the localisation of the terminal hinge axis, Jaw Motion Analyser® and CADIAX® diagnostic.* Journal of craniomandibular function 2009;1(3):193-213.
6. **Bindl A, Ritter L, Mehl A.** *Digital 3-D implant planning: Cerec meets Galileos.* Int J Comput Dent 2010;13:221-231.
7. **Bushm M, Kordass B.** *Concept and development of a computerized positioning of prosthetic teeth for complete dentures.* Int J Comput Dent 2006;9:113-120.
8. **Civel P.** *L'endocronne en technique CFAO directe.* Dentoscope novembre 2009; n°56.
9. **Darthez A.** *Les articulateurs.* [contrendu] Collège National d'Occlusodontie Midi-Pyrénées 2014.
10. **Davarpanah M, Jakubowicz-Kohen B, Caraman M, Kebir M.** *Les implants en odontologie.* Reuil-Malmaison: CdP; 2010.
11. **Davarpanah M, Szmukler-Moncler S.** *Manuel d'implantologie clinique. Concepts, intégration des protocoles et esquisse de nouveaux paradigmes.* 3^e éd. Reuil-Malmaison: CdP; 2012.
12. **Descamp F.** *Pratique de l'empreinte en prothèse fixée.* Reuil-Malmaison: CdP; 2012.
13. **Duminil G, Carlier J-F, Laplanche O et al.** *L'occlusion: tout simplement.* Paris: Espace I. d. 2013.
14. **DUPAS P H.** *Le dysfonctionnement cranio-mandibulaire: Comment le diagnostiquer et le traiter?* Paris: CdP; 2011.
15. **DUPAS P-H.** *L'articulateur au quotidien.* Paris: CdP; 2012.

16. **Duret F, Duret B, Pelissier B.** *Le temps des pionniers.* Information Dentaire, 2007; 89(29):1659.
17. **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.
18. **Enciso R, Memon A, Neumann U.** *The Virtual Cranio-facial Patient Project/Le Projet De Patient Virtuel Dans Le Domaine Cranio-facial.*[En ligne] www.semanticscholar.org.
19. **Etz E, Hellmann D, Giannakopoulos NN et al.** *The variability of centric jaw relations in the process chain of prosthetic restorations and their neuromuscular effects.* Journal of craniomandibular function 2012; 4(2):141-156.
20. **Fages M, Felenc S, Rayanal J, Lethuillier J, Margerit J.** *Inlays - Onlays céramiques: évolution des concepts de préparation.* Alternatives n°35:15-24.
21. **Fang JJ, Kuo TH.** *Modelling of mandibular movement.* Computers in biology and medicine 2008 Nov-Dec; 38(11-12):1152-1162.
22. **Fonseca M, Plaster U, Strauss M.** *PlaneSystem®-Partie 2.* [En ligne]. Le mercredi 20 avril 2016 : www.edigidental.com.
23. [fr.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A2ne_\(anatomie_humaine\)#/media/File:Crane_humain_de_face.png](http://fr.wikipedia.org/wiki/Cr%C3%A2ne_(anatomie_humaine)#/media/File:Crane_humain_de_face.png).
24. **Frank S, Frank F.** *Bite registration in CEREC and inLab.* International Journal Of Computerized dentistry, 2012; 15:149-158.
25. **Furtado DA, Pereira AA, de Andrade A et Col.** *A specialized motion capture system for real-time analysis of mandibular movements using infrared cameras.* BioMedical Eng [OnLine]<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3636046/>2013 Fev 22; 12:17.
26. **Gaillard C.** *Protocoles et matériels pour la gestion de l'occlusion des réhabilitations complexes.* Stratégie prothétique 2011 Sept-Oct; 11(4):59-68.
27. **Ghanai S, Marmulla R, Wiechnik J, Mühling J, Kotrikova B.** *Computer-assisted three-dimensional surgical planning: 3D virtual articulator: technical note.* Int J Oral Maxillofac Surge 2010; 39:75-82.
28. **Ghrenassia C, Esclassan R, Chabreron O, Galibourg A, Champion J.** *Méthode classique et méthode par CFAO pour une couronne sur implant : que préfère le patient? Information dentaire,* 2014; 29:68-72.
29. **Giancotti A, Germano F, Muzzi F, Greco M.** *A miniscrew-supported intrusion auxiliary for open-bite treatment with invisalign* Journal of clinical orthodontics, 2014 June; 48(6):348-58.

30. **Girault G, Contrepois M, Soenen A.** *L'articulateur virtuel, données actuelles.* Information Dentaire, novembre. 2015; 39(97):66-70.
31. **Gugward RS, Basavakumar M, Abhijeet K et al.** *Virtual articulators in prosthodontics.* International journal of dental clinics 2011; 3(4):39-41.
32. **Han BJ, Kang H, Liu LK, Yi XZ, Li XQ.** *Comparisons of condylar movements with the functional occlusal clutch and tray clutch recording methods in CADIAX® system.* Int J Oral Sci 2010; 2(4):208-214.
33. **Hans Muller C.** *Registration of occlusion by buccal scan in CEREC software version 3.80.* International Journal Of Computerized dentistry, 2010; 13(3):265-273.
34. **Hanssen N, Ruge S, Kordass B.** *SICAT Function: Anatomical real-dynamic articulation by merging Cone Beam Computed Tomography and jaw motion tracking data.* Int J Comput Dent 2014; 17(1):65-74.
35. **Hayashi T, Saitoh A, Ishioka K, Miyakawa M.** *A computerized system for analyzing occlusal relations during mandibular movements.* Int J Prosthodont. 1994 Mar-Apr; 7(2):108-14.
36. **Ikeda K, Kawamura A, Ikeda R.** *Assessment of optimal condylar position in the coronal and axial planes with limited Cone-Beam computed tomography.* Journal of Prosthodontics 2011; 20:432-438.
37. **Jaisson M, Felenc S, Nocent O.** *La gestion de l'occlusion par les systèmes de CFAO, les critères de choix.* Cahier de Prothèse, 2013; 161:39-51.
38. **Jaisson M, Felenc S.** *Occlusion et CFAO.* Information dentaire. 2014; 20:48-56.
39. **Joda T, Gallucci GO.** *The virtual patient in dental medicine.* Clin. Oral Impl. 2014mars; 26(6):725-726.
40. **John D, Ruge S, Kordass B.** *Analysis of jaw movements and muscle activity during mastication with JawReports software.* Int J Comput Dent 2011; 14:227-231.
41. **Sakaguchi K, Uehara S, Yagi T et col.** *Relationship between occlusal curvatures and bite force in humans.* Arch Oral Biol. 2013 Apr;58(4):377-83.
42. **Koralakunta PR, Aljanakh M.** *The role of virtual articulator in prosthetic and restorative dentistry.* Journal of clinical and diagnostic research 2014 Jul; 8(7):25-28.
43. **Kordass B, Gärtner C, Söhnel A et al.** *The virtual articulator in dentistry: concept and development.* Dent Clin N Am. 2002; 46:493-506.

44. **Kordass B, Ruge S, Ratzmann A, Hugger.** *Electronic measurement systems for functional analysis in dentistry - impressions from the International Dental Show (IDS) in Cologne.* Journal of craniomandibular function 2013; 5(2):207-212.
45. **Kordass B, Ruge S.** *Comparaison de l'analyse du trajet condylien et du mouvement réel de l'articulation tempo-romandibulaire : possibilités d'application de Sicat Function.* [En ligne] www.edigital.com, Le mercredi 6 janvier 2016.
46. **Kordass B, Ruge S.** *On the analysis of condylar path versus real motion of the temporomandibular joint: application for Sicat Function.* Int J Comput Dent. 2015; 18(3):225-35.
47. **Kordass B, Ruge S.** *Praxisorientierte analyse des funktionellen okklusion.* Digital dentistry 2014; 2:28-32.
48. **Kordass B.** *Analysis of the variability of occlusal function patterns in masticatory movement - use of the GEMAS Software.* Int J Comput Dent 2006; 9:143-152.
49. **Kordass B.** *Virtual occlusion Undreamed of possibilities.* Int J Comput Dent 2006; 9:91-93.
50. **Kravitz N D, Groth C, Jones PE, Graham JW, Redmond WR.** *Intraoral digital scanners.* Journal of clinical orthodontics 2014; 48(6):337-347.
51. **Küppers A.** *FGP-Functionally Generated Path.* Journal of craniomandibular function 2010; 2(4):345-351.
52. **Lahori M, Siddharth, Chakraborty DS.** *Virtual articulators: changing trends in prosthodontics.* Guident 2013 jan; 6(2):10.
53. **Lalet P.** *Quand le biogénérique envahit le programme.* Dentoscope 2010; 67:6p.
54. **Laviole O, Soenen A, Barsby-El Khoder A.** *CFAO et prothèse amovible partielle.* Information Dentaire, 2014; 96(29):40-46.
55. **Linsen SS, Stark H, Klitzschmüller M.** *Reproductibility of condyle position and influence of splint therapy on different registration techniques in asymptomatic volunteers.* Journal of craniomandibular & sleep practice 2013 jan; 31(1):32-38.
56. **Linsen SS, Stark H, Samai A.** *The influence of different registration techniques on condyle displacement and electromyographic activity in stomatognathically healthy subjects : a prospective study.* J Prosthet Dent. 2012 Jan; 107(1):47-54.
57. **Maestre-Ferrin L, Romero-Millan J, Peñarrocha-Oltra D, Peñarrocha-Diago M.** *Virtual articulator for the analysis of dental occlusion: an update.* Med Oral Patol Cir Bucal. 2012 Jan; 17(1):160-163.

58. **Le Gall MG, Lauret JF.** *La fonction occlusale: implications cliniques.* 3^e ed. Paris : CdP; 2007.
59. **Mehl A.** *A New Concept for the Integration of Dynamic Occlusion in the Digital Construction Process.* International journal of computerized dentistry, 2012; 15:109-123.
60. **Ogawa T, Ikawa T, Shigeta Y et al.** *Virtual reality image applications for treatment planning in prosthodontic dentistry.* Stud Health Technol Inform. 2011; 163: p 422-4.
61. **Orthlieb JD, Bezzina S, Preckel EB.** *Le plan de traitement et les 8 critères occlusaux de reconstruction (OCTA).* Synergie prothétique 2001 Avril; 3(2):87-96.
62. **Orthlieb JD, Manière-Ezvan A.** *L'occlusion d'intercuspidie maximale.* inf dent 2006; 88(15):865-867.
63. **Orthlieb JD.** *Gnathologie fonctionnelle Volume 1: occlusion et restauration prothétique.* CdP, 2010.
64. **Orthlieb JD.** *Gnathologie fonctionnelle Volume 2: Occlusion et reconstruction prothétique.* Paris : CdP; 2011.
65. **Patel N.** *The VIP Project – FaceScan, CEREC Omnicam Integration, Articulation, Digital Appliance Tx.* [en ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=jQKlqPTs2D4>. You Tube.
66. **Plaster U, Strauss M.** *PlaneSystem®-Partie 1.* [En ligne] <http://www.edigital.com/> Le mercredi 20 avril 2016.
67. **Ratzmann A, Mundt T, Schwahn C et al.** *Comparative clinical investigation of horizontal condylar inclination using the JMA® electronic recording system and protrusive wax record for setting articulators.* Int J Comput Dent 2007; 10:265-284.
68. **Raynal J.** *Reconstruction d'un angle incisif apport d'un CEREC 3-3D.* Stratégie prothétique avril 2006; 6(15):97-106.
69. **Riester P, Felhin L.** *L'implantologie guidée en aide aux patients sous biphosphonates oraux.* L'information dentaire 2014; 29:74-80.
70. **Röhrle O, Waddell JN, Foster KD, Saini H, Paullan AJ.** *Using a motion-capture system to record dynamic articulation for application in CAD/CAM software.* Journal of prosthodontics 2009; 18:703-710.
71. **Ruge S, Kordass B.** *3D-VAS- Initial results from computerized visualisation of dynamic occlusion.* Int J Comput Dent 2008; 11:9-19.
72. **Ruge S, Quooss A, Kordass B.** *Variability of closing movements, dynamic occlusion, and occlusal contact patterns during mastication.* Int J Comput Dent 2011; 14:119-127.

73. **Ruge S, Quooss A, KordassB.** *Visual analysis of dynamic occlusion in a virtual articulator.* Journal of craniomandibular function 2009; 1(3):215-228.
74. santecheznous.com/channel_section_details.asp?text_id=1639&channel_id=1029&relation_id=87088.
75. **Shadakshari S, Nandeeshward DB, Saritha MK.** *Virtual articulators : a future oriented technology.* Asian journal of medical and clinical sciences 2012 may-aug; 1(2):98-101.
76. **Shelle R.** *Enregistrement numérique de la fonction mandibulaire avec le système K7.* Qunitessence international. 2011; 41(11):1410-1420.
77. **Shewman T.** *3-dimensional physiologic postural range of the mandible: a computerized-assisted technique-a case study.* [en ligne] Case Rep Med. 2013; Article ID 698397, 11pages.
78. **Shinjo T, Kinami R.** *Dental diagnosis and dental care system.* [en ligne] <http://www.freepatentsonline.com/y2011/0218426.html>.
79. **Singh N, Dandekeri S, Shenoy K, Bhat V.** *Digital articulators : a promising technology of the future.* International journal of dental and medical research 2014; 1(2):98-102.
80. slideplayer.fr/slide/2490563.
81. **Solaberrieta E, Arias A, Barrenetxea L et al.** *A virtual dental prostheses design method using a virtual articulator.* [Contrendu] International design conference DESIGN 2010 Dubrovnik, Croatia, mai 17-20, 2010; 443-452.
82. **Solaberrieta E, Etxaniz O, Minguez R et Col.** *Design of a virtual articulator for the simulation and analysis of mandibular movements in dental CAD/CAM.*[Contrendu] Proceedings of the 19th CIRP design conference - Competitive design, Cranfield University, 30-31 March 2009.
83. **Solaberrieta E, Minguez R, Barrenetxea L, Etxaniz O.** *Direct transfer of the position of digitized casts to a virtual articulator.* Journal of Prosthetic Dentistry 2013; 109(6):411–414.
84. **Solaberrieta E, Minguez R, Barrenetxea L, Otegi JR, Szentpétery A.** *Comparison of the accuracy of a 3-dimensional virtual method and the conventional methode for transferring the maxillary cast to virtual articulator.* The journal of prosthetic dentistry 2015; 113(3):191-197.
85. **Solaberrieta E, Otegi JR, Minguez R, Etxaniz O.** *Improved digital transfer of the maxillary cast to a virtual articulator.* Journal of Prosthetic Dentistry 2014; 112(4):921-924.

86. **Song KG, Baek SH.** *Comparison of the accuracy of the three-dimensional virtual method and the conventional manual method for model surgery and intermediate wafer fabrication.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2009 Jan; 107(1):13-21.
87. **Spath C, Kordass B.** *Optimization of the static occlusion by “occlusal surface settling” in the CEREC 3 D software.* International Journal Of Computerized dentistry, 2006; 9:121 - 126.
88. **Spector L.** *Computer-aided dental implant planning.* Dent Clin N Am 2008; 52(4):761-775.
89. **Srikanth K.** *Quantitative analysis of masticatory performance in vertebrates.* [A thesis submitted to the faculty of the Graduate School for a master of science] Buffalo: State University of New York; August 2008.
90. **Tanaka Y, Hattori Y.** *Dimensional and occlusal accuracy of novel three-dimensional digital model of articulated dental arches.* The international journal of prosthodontics 2013; 26(3):282-287.
91. **Terajima M, Endo M, Aoki Y et al.** *Four-dimensional analysis of stomatognathic function.* Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2008 Aug; 134(2):276-87.
92. **Toubol JP, Duret F.** *De l'articulaire au neuromusculaire, de la mécanique à l'électronique.* Cahier de prothèse. 1989; 143:43-52.
93. **Troulis MJ, Evrett P, Seldin EB, Kikinis R, Kaban LB.** *Development of a three-dimensional treatment planning system based on computed tomographic data.* Int J Oral Maxillofac Surg 2002; 31(4):349-357.
94. **Weingärtner T, Hassfeld S, Dillmann R.** *Virtual jaw: a 3D simulation for computer assisted surgery and education.* Stud Health Technol Inform. 1998; 50:329-35.
95. **White SC, Pharoah MJ.** *The evolution and application of dental maxillofacial imaging modalities.* Dent Clin Am 2008; 52(4):689-705.
96. www.3Shape.com
97. www.dentalwings.com/de/demo-cases/
98. www.eidparis.com/radio/implants-dentaires.htm
99. www.freecorder.de
100. www.sirona.fr/
101. www.sop.asso.fr/les-journees/comptes-rendus/les-empreintes-optiques-en-2014/1
102. www.youtube.com/watch?v=d7VJ3ori4ac

103. www.youtube.com/watch?v=rDbab8MDWN4

104. www.zirkonzahn.com

105. **Yuuda K, Terajima M, Aoki Y, Hayasaki H, Nakasima A.** *Four-dimensional visualization of mandibular movement using an individual's head model reconstructed from cephalograms.* Orthognathic Waves 2007; 66(4):113-121.

Table des illustrations

Figure 1 : Le squelette du crâne [23].....	6
Figure 2 : Les principaux muscles masticateurs [74].....	7
Figure 3 : Le plan d'occlusion[15].....	10
Figure 4 : La courbe de Spee [15].....	10
Figure 5 : La courbe de Wilson [15].....	11
Figure 6 : Les plans de référence [64].	11
Figure 7 : La relation centrée[63].....	13
Figure 8 : Rationnel de décision pour l'établissement de la position thérapeutique[63,64].....	14
Figure 9 : Le diagramme de Posselt (RT: rétrusion terminale, OM: ouverture maximale, BB: Bout à bout incisif, DM: diduction maximale, PM: protrusion maximale)[80].	16
Figure 10 : Trajets condyliens et terminologie au cours d'une diduction droite (mouvement centrifuge)[58].	17
Figure 11 : Cinématique condylienne lors d'une entrée de cycle (mouvement centripète)[58].....	17
Figure 12 : Exemples d'occluseurs [63].	18
Figure 13 : exemples d'articulateurs (à gauche : Quick Master, à droite : SAM) [15].	19
Figure 14 : Description de l'articulateur Quick Master	20
Figure 15 : Montage du modèle maxillaire à l'aide d'une table de montage[15].....	21
Figure 16 : Arc facial en place sur le patient puis sur l'articulateur [15].....	22
Figure 17 : Cires de latéralités en place sur le patient puis sur l'articulateur D5A (DENAR®)[58].	23
Figure 18 : Enregistrement de la cinématique mandibulaire et programmation de l'articulateur Combi (DENAR®) [15].	24
Figure 19 : Calcul de la pente condylienne à l'aide d'une radiographie panoramique [15].	24
Figure 20 : Axiographe (quick axis) sur le patient [15].....	25
Figure 21 : Pentographe (Panatronic) en place sur le patient [15].	25
Figure 22 : Exemple d'occluseur virtuel de dentalwings[97].	29
Figure 23 : Articulateur de Szenpétery obtenu à partir d'un algorithme informatique[81].....	30
Figure 24 : Prototypage de l'articulateur virtuel à partir d'un articulateur mécanique[81].....	31
Figure 25 : Articulateur virtuel avec table de montage orientée de 10° par rapport au plan de Francfort [30].	32
Figure 26 : Articulateur virtuel du logiciel CEREC ® 4.2. [100].	32
Figure 27 : Montage du modèle maxillaire virtuel à l'aide d'un montage standard sur articulateur mécanique[84].	33
Figure 28 : Scannage des deux modèles séparément avec le scan 3Shape ® (photos du Dr Contrepoiset de Christophe Sireix)	33

Figure 29 : Modèles sur articulateur virtuel 3SHAPE [®] (image du Dr Contrepoiset de Christophe Sireix).....	33
Figure 30 : Localisation sur le patient du plan de référence et de la position du maxillaire par rapport à ce plan à, à l'aide de l'arc facial numérique[83].....	34
Figure 31: Transfert virtuel des points de référence et positionnement du maxillaire[83].	34
Figure 32 : Schéma de transfert de la position du maxillaire au sein de l'articulateur PS1 de Zirkonzahn [®] [104].	34
Figure 33 : Patient positionné en NHP au sein du "Plane Finder [®] " de Zirkonzahn [®] , avec les plans rectilignes d'orientation en place [104].	35
Figure 34 : Enregistrement de la position du maxillaire au sein du "Plane Finder" [66].	35
Figure 35 : Enregistrement de la hauteur labiale et positionnement de la cale sur la plaque d'enregistrement de l'occlusion [66].	35
Figure 36 : Support d'enregistrement de la cinématique mandibulaire du Réplicator[58].....	36
Figure 36 : Schéma de fonctionnement de l'empreinte optique[101].	37
Figure 37 : Principe de fonctionnement du cone beam[98].	38
Figure 38 : Ensemble de données tridimensionnelles (STL, DICOM, OBJ)[39].....	38
Figure 39 : Modèle maxillaire numérique positionné suivant les données de "Plane Finder" et le scan du "Face Hunter" (photo Zirkonzahn).....	39
Figure 40 : Support d'enregistrement optique de la cinématique mandibulaire passif à gauche le "Freecorder [®] BlueFox" GmbH [®] et actif à droite "TRI-MET" Tokyo-Shizaisha [®] [99,105].	39
Figure 41 : Support d'enregistrement ultrasonore à gauche le "Jaw Motion Analyser" (Zebris Medical GmbH [®]), à droite le "Arcus Digma II" (KaVo [®]) [44].....	40
Figure 42 : Positionnement des différents éléments du Sirognatographe [®] (SIEMENS A.G.): à gauche émetteur magnétique, à droite support d'enregistrement magnétique [58].	41
Figure 43 : Fourchette paraocclusale individualisée au laboratoire [32].....	42
Figure 44 : Préparation de la fourchette para occlusale et protection des surfaces occlusales [1].	43
Figure 45 : Vérification de l'absence d'interférences entre la fourchette para occlusale et les surfaces occlusales [1].....	43
Figure 46 : Induction de la fourchette et fourchette en place [1].....	44
Figure 47 : Fixation intrabuccale des deux appareillages d'enregistrement et des électrodes d'enregistrement de l'activité musculaire[19].....	44
Figure 48 : Affichage des trajectoires condyliennes et du diagramme de Posselt dans les trois plans de l'espace du programme du logiciel "WinJaw" Zebris Medical GmbH [®] [48].	45
Figure 49 : Affichage de l'enregistrement simultané de l'activité électromyographique (Pré-TENS) du logiciel WinJaw [®] (Zebris Medical GmbH) [77].	46
Figure 50 : Jumelage des arcades avec deux téléradiographies (face et profil) du logiciel "RapideForm2006"(INUS Technology [®])[27].	47

Figure 51 : Schéma récapitulatif représentant le porte empreinte de couplage, les systèmes d'acquisition tridimensionnelle scanner (GALILEOS, Sirona®) avec le logiciel de traitement (SICAT Function, SICAT®) et optique de cabinet et de laboratoire, le pantographe numérique (JMT+, SICAT®) et l'articulateur mécanique PS1 (Zirkonzahn®) [47].	48
Figure 52 : Détection du porte empreinte analogique lors de l'examen d'imagerie, logiciel SICAT Function(SICAT®) [34].	49
Figure 53 : Localisation du porte empreinte analogique pour le système du JMT+ (SICAT®)[103].	50
Figure 54 : Affichage simultané des trajectoires mandibulaires et des données d'imagerie [45].	51
Figure 55 : Logiciel « Ortho-Analyzer » 3SHAPE® [96].	52
Figure 56 : Set-up virtuel de l'arcade maxillaire, logiciel "ClinCheck" ALIGNTECH® [29].	52
Figure 57 : Affichage comparatif entre la position préopératoire (bleu) et postopératoire (rose)[27].	52
Figure 58: Affichage du programme ORAPIX® (A: modèles virtuels, B modèles virtuels montés sur l'articulateur virtuel à l'aide d'un double montage, C: après repositionnement du modèle maxillaire, D: gouttière chirurgicale obtenue par stéréolithographie) [86].	53
Figure 59 : Tableau récapitulatif pour le choix du simulateur virtuel.	54
Figure 60 : Exemple restauration unitaire par prothèse fixée; A: empreinte optique de la préparation sur 46, des dents antagonistes et du rapport inter maxillaire; B: modèles virtuels en occlusion [8].	55
Figure 61 :Exemple restauration unitaire par prothèse fixée; C : détection des points de contact sur les dents adjacentes à la préparation; D : simulation de forme et mise en occlusion automatique [8].	55
Figure 62 : Exemple de reconstruction prothétique par prothèse amovible totale à l'aide du logiciel 3SHAPE®; A: Base d'occlusion scannées RIM virtuel; B: set-up virtuel des dents prothétiques en fonction du rapport intermaxillaire; C: Plaque de résine avec l'emplacement des dents en négatif (photo du Dr Contrepois et de Christophe Sireix).	56
Figure 63 : « Mounting Bloc » sur le « Plane Positionner » (photo Zirkonzahn®).	56
Figure 64 : Planification implantaire en vue de la réalisation de trois couronnes fixées supra implantaire du logiciel coDiagnostiX (Strauman®) [33].	57
Figure 65 : Guide chirurgical en 3D à appuis dentaires obtenu avec le logiciel SIMIMPLANT (DENTSPLY®) [69].	57
Figure 66 : Gestion du couronne supra-implantaire à l'aide du logiciel Cerec omnicam (SIRONA) A: "ScanBody®" en place avant l'empreinte optique; B: Visualisation informatique du pilier implantaire anatomique [28].	58
Figure 67 : Gestion de couronne supra-implantaire à l'aide du logiciel Cerec omnicam (SIRONA) A: Pilier implantaire anatomique personnalisé en place sur l'implant; B: prothèse d'usage en place [28].	58
Figure 68 : Affichage selon différentes perspectives et différents zoom du logiciel "VIP project" de Neal Patel [65].	59

Figure 69 : Affichage simultané des structures dentaires, osseuses, des trajectoires mandibulaires et d'une photo tridimensionnelle sur le logiciel "VIP project" de Neal Patel[65].	59
Figure 70 : Affichage uniquement des trajectoires condyliennes et de l'activité musculaire du logiciel WinJaw (Zebris medical, GmbH®)[77].	60
Figure 71 : Affichage simultané de la trajectoire d'ouverture, du condyle et de l'axe charnière terminal [45].	60
Figure 72 : Programme DentCAM (université de Greifswald,Allemagne) avec ces quatre fenêtres (arcade maxillaire, arcades mandibulaire, arcades en occlusion et cinématique condylienne) [81].	61
Figure 73 : Modélisation de l'ouverture buccale du logiciel "VIP project" Fonction avec la trajectoire du dentalé, le curseur blanc indique la position de la mandibule sur la trajectoire [65].	61
Figure 74 : Exemple de coupe au niveau des aires de contacts occlusaux du logiciel "3D Virtuel Articulator System" (Zebris medical, GmbH®)[72].	62
Figure 75: Schéma représentatif du calcul de la distance entre les surfaces occlusales maxillaire et mandibulaire.	62
Figure 76 : Mordu occlusal virtuel du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].	63
Figure 77 : Schéma représentatif du volume d'espace libre.	63
Figure 78: Affichage différentiel des contacts en fonction de leur intensité; le gradient de couleur varie du rouge, (contact fort) à l'orange (contact faible), le gris représente l'absence de contact, le maxillaire est en vue caudale, logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®). [73]	64
Figure 79 : Comparaison expérimental entre le diagramme de Posselt et l'enregistrement des trajectoires mandibulaires (CR: occlusion de relation centrée, CO: occlusion d'intercuspidie maximale, F: protrusion maximale, E: ouverture maximale, B ouverture maximale en relation centrée, R: position de repos) [21].	65
Figure 80 : Modélisation des trajectoires d'ouverture/fermeture (a : obtenue à partir de l'enregistrement de la cinématique mandibulaire, b : après calcul des trajectoires moyennes)[21].	65
Figure 81 : Modélisation du diagramme de Posselt après calcul des trajectoires moyennes (a : au niveau du dentalé, b : au niveau d'un point mandibulaire sélectionné aléatoirement) [21].	66
Figure 82 : Affichage expérimental des différents axes de rotation calculé à partir des mouvements d'ouverture(tracé bleu)/fermeture(tracé vert) ; le cylindre jaune représente le volume dans lequel peut se situer l'axe charnière terminal, les tracés gris représentent les axes de rotation instantanés[21].	67
Figure 83 : Affichage simultané des mouvements de l'articulation temporo-mandibulaire et de l'arcade mandibulaire du logiciel SICAT Function(SICAT®)[42].	67
Figure 84 : Affichage différentiel entre les contacts statiques et dynamiques (maxillaire en vue caudale, vert: contact statique, rouge: contact dynamique) sur le logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73].	68
Figure 85 : Exemple de vecteur de force résultant de la mastication. (En pointillé, différents cycles masticatoires, en noir le cycle masticatoire engendrant le vecteur de force (flèche rouge)) [70].	68

Figure 86: Affichage différentiel des contacts en fonction du mouvement mandibulaire (maxillaire en vue caudale, vert: contacts obtenus lors d'une latéralité gauche, rouge: latéralité droite et bleu: contacts communs aux deux latéralités) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [73]...	69
Figure 87 : Analyse temporelle du contact des aires occlusales (maxillaire en vue caudale, rouge: contacte fréquent, bleu: contact moins fréquent) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®)[73].	69
Figure 88 : Equilibration occlusale en RC assisté par ordinateur de prothèses amovibles totales sur le logiciel DentCam (université de Greifswald, Allemagne) [43].	70
Figure 89 : (A) Trajectoires de la deuxième molaire mandibulaire droite et du point interincisif mandibulaire lors de trois cycles masticatoires. (B) Affichage postérieur des trajectoires de la deuxième molaire mandibulaire droite, la flèche noire représente la trajectoire de la molaire vers la fin du premier cycle masticatoire; sur le logiciel CMGUI (Firefox®) [70].	71
Figure 90 : Affichage de différentes séquences consécutives représentant les deuxièmes molaires mandibulaire et maxillaire du début de cycle jusqu'à la fin du cycle masticatoire; sur le logiciel CMGUI (Firefox®) [70].	71
Figure 91 : FGP de l'arcade mandibulaire lors de la mastication unilatérale gauche (schéma de gauche: stade initial, schéma de droite: état après 25 cycles) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [72].	72
Figure 92: FGP de l'arcade mandibulaire (schéma de gauche: état à la fin de la mastication unilatérale gauche; schéma de droite FGP lors de la mastication bilatérale) du logiciel 3D-VAS (Zebris medical, GmbH®) [72].	72
Figure 93 : Affichage de l'activité musculaire après application du TENS, Figure à comparer avec la Figure 49 [77].	73
Figure 94 : Affichage de la capacité de décontraction des muscles masséters, temporaux antérieurs, digastriques et cervicaux [76].	73
Figure 95 : Affichage simultané de l'électromyographie et de la kinésiographie sur le logiciel SinfoMed k7 (Myotronics-Noromed Inc.), détermination de la position physiologique de repos et de la position d'occlusion myocentrée [76].	74
Figure 96 : Modélisation d'un FGP mandibulaire en fonction de trajectoires mandibulaires affichées en vert (a: lors de sa création, b: état final) [21].	75
Figure 97: Affichage différentiel entre les modèles (beige), et le FGP maxillaire et mandibulaire (Violet) sur le logiciel SICAT Function(SICAT®) [103].	75
Figure 98 : Module de détection automatique des facettes d'usure du logiciel DentCam (université de Greifswald, Allemagne) [43].	76
Figure 99 : Prévisualisation de l'acte opératoire grâce positionnement de "l'outil de découpe informatique" sur le logiciel Osteoplan™ [93].	77
Figure 100 : Prévisualisation de l'acte opératoire, repositionnement automatique de la mandibule calculé par ordinateurs sur le logiciel Osteoplan™ [93].	77
Figure 101 : Affichage simultané entre la position mandibulaire préopératoire en rose et post opératoire en violet sur le logiciel Osteoplan™ [93].	77

Figure 102 : Matérialisation du plan de référence du support d'enregistrement.	79
Figure 103 : Localisation de l'axe charnière terminal par rapport aux arcades [21].....	79
Figure 104 : Choix de la position thérapeutique en fonction des préférences du praticien et du rapport inter maxillaire [34].....	80
Figure 105 : Tracé céphalométrique pour les incisives mandibulaires et sa représentation sur l'articulateur virtuel [64].	80
Figure 106 : Matérialisation du principe d'orthogonalité sur la 33 [64].	81
Figure 107 : Affichage d'une photo tridimensionnelle sur l'articulateur virtuel du CEREC [100].	81
Figure 108: Schéma de matérialisation du rayon et de la courbe de Spee.....	82
Figure 109 : Quadrilatère de Vienne (PAO: plan axio-orbitaire, Pco: pente condylienne, PO: plan d'occlusion, PG: pente de guidage) [64].	82
Figure 110 : Les images tomodensitométriques permettent de disposer de critères de construction des courbes de Wilson (A: matérialisation de la courbe de Wilson sur une coupe frontale, B: matérialisation des angles radiculaire/dentaire en fonction de l'ACT)[64].	83
Figure 111: Matérialisation sur un modèle virtuel de la sphère englobant à la fois la courbe de Spee et de Willson (A: sphère "occlusale" d'un sujet ayant des courbes faiblement marquées; B: sphère "occlusale" d'un sujet avec des courbes fortement marquées) [41].	83
Figure 112 : Comparaison entre les méthodes conventionnelle et virtuelle [27].	84
Figure 113 : Affichage des différentes trajectoires du condyle en fonction du "centre de rotation sélectionné" sur un même patient [45].	86
Figure 114 : Affichage et superposition de ces mêmes trajectoires aux données d'imagerie [45].	86
Figure 115 : Schéma récapitulatif du fonctionnement des articulateurs virtuels [42, 78].	88
Figure 116: Modélisation musculaire du logiciel IDCS (A: modélisation des vecteurs de force musculaire des trois chefs temporaux et des deux chefs massétéris, B: modélisation des entités musculaires du temporal et du masséter) [94].	91

Demandes d'autorisation de reproductions d'illustrations

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

Objet : demande d'autorisation de reproduction de schémas.

Monsieur,

Je m'appelle Regnaudin de BELLEVILLE, je suis étudiant dans l'UFR des Sciences Odontologiques de l'université de Bordeaux. Je prépare actuellement ma thèse en chirurgie dentaire portant sur la simulation virtuelle de l'occlusion dynamique: possibilités actuelles et perspectives.

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

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

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

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

Object : Authorization of pictures reproduction

My name Regnaudin of BELLEVILLE, I am a student in the Odontological Faculty of the University of Bordeaux. I am currently preparing my thesis in dental surgery on "the virtual simulation of the dynamic occlusion: current possibilities and prospects".

During my bibliographical research, I met many articles and documents, some of your edits. I would therefore ask you permission to reproduce certain pictures that would allow me to illustrate this work.

My thesis is restricted to a strictly academic printing as part of earning my Doctor of state degree in Dental Surgery.

Awaiting a favorable response from you, please believe in my most respectful greetings.

Herewith the list of reference and pictures.

Reponses:



jdo amu (jean-daniel.orthlieb@univ-amu.fr) [Ajouter aux cc](#)

À : regnaudin de belleville ↵

Bonjour,

tu as mon autorisation sans aucun problème, et je te remercie de cette délicatesse.

tu sais qu'il faut bien entendu citer ses sources

Du point de vue des droits aux images, ils appartiennent en fait à la maison d'édition, mais dans le cadre d'une thèse inutile de la contacter.

Par ailleurs, le titre de la thèse « ..simulation virtuelle de l'occlusion dynamique.. » me fait penser qu'il y a peut-être confusion entre le terme dynamique et le terme cinématique. Ce que tu veux simuler c'est probablement le mouvement c'est à dire la cinématique, la dynamique (=force) peut être statique comme dans le serrement en OIM. Ce serait dommage, déjà dans le titre, de faire une erreur lexicologique.

cordialement

JD Orthlieb



Oliver Ahlers (oliver.ahlers@cmd-centrum.de) [Ajouter aux contacts](#) 10/07/2016

À : 'regnaudin de belleville' ↵

Dear Regnaudin,

thank you very much for your kind inquiry.

It is a pleasure for me to grant you the use of the images.

Do you have an English summary of the thesis or will there be one?

Is so I could assess if the content would be suitable for publication in the Journal CMF.

Best regards and all the bet for the running match of le Bleues...

Oliver Ahlers



Jean Champion (jean.champion3@wanadoo.fr) [Ajouter aux contacts](#) 14:

À : regnaudin de belleville ✉

Bonjour Monsieur,

En ce qui me concerne, je ne vois pas de problème pour l'utilisation de ces documents dans votre Thèse de Second Cycle (Doctorat en Chirurgie Dentaire) en citant bien entendu les références bibliographiques.

Mes confères vous répondront pour leur part.

Bien cordialement

Jean Champion

Envoyé de mon iPhone

Le 9 juil. 2016 à 21:36, regnaudin de belleville <regnaudin.de.belleville@hotmail.fr> a écrit :



Troulis, Maria J.,D.D.S. (MTRoulis@mgh.harvard.edu) [Ajouter aux con](#)

À : 'regnaudin de belleville' Cc : Byrne, Suzanne M. ✉

It is OK with me...as long as you reference the source of the pictures appropriately. Also, you need to get the authorization from Elesivier— i think there is a online area on their website to do so.

Good luck with your thesis. I would love to read a final copy.

From: regnaudin de belleville [mailto:regnaudin.de.belleville@hotmail.fr]

Sent: Saturday, July 09, 2016 3:40 PM

To: Troulis, Maria J.,D.D.S.

Subject: Authorization for pictures reproduction



Eneko Solaberrieta (eneko.solaberrieta@ehu.es) [Ajouter aux contacts](#) 06

À : 'regnaudin de belleville' ▾

Dear Regnaudin

You have my acceptance to use these figures. In case you publish an article it would be interesting to cite my jobs. Thanks

Eneko

De: regnaudin de belleville [mailto:regnaudin.de.belleville@hotmail.fr]

Enviado el: sábado, 09 de julio de 2016 21:24

Para: eneko.solaberrieta@ehu.es

Asunto: Authorization for pictures reproduction



Oliver Röhrle (roehrle@simtech.uni-stuttgart.de) [Ajouter aux contacts](#) 1

À : 'regnaudin de belleville' ▾

I would not mind if you use it and appropriately reference it. However, I fear that you need to contact the journal to get the permission reproduce this figure. They have the copyright. But I am sure they give you the right to do so. Oliver

From: regnaudin de belleville [mailto:regnaudin.de.belleville@hotmail.fr]

Sent: Saturday, July 9, 2016 21:29

To: roehrle@simtech.uni-stuttgart.de

Subject: Authorization for pictures reproduction

Vu, Le Président du Jury,

Date, Signature :

Vu, le Directeur de l'UFR des Sciences Odontologiques,

Date, Signature :

Vu, le Président de l'Université de Bordeaux ,

Date, Signature :

Discipline :**Simulation virtuelle de l'occlusion dynamique : possibilités actuelles et perspectives.****Résumé :**

L'utilisation des simulateurs fait partie intégrante de la pratique quotidienne du chirurgien dentiste que ce soit pour la phase diagnostique, la phase thérapeutique ou lors de la conception de l'élément prothétique. De plus, depuis peu, les progrès technologiques qui ont été réalisés dans le domaine de la CFAO dentaire, ont nécessité la création de moyens de simulation de la cinématique mandibulaire. L'objectif principal de cette thèse a été, d'identifier les différents types de simulateurs virtuels en s'intéressant particulièrement aux articulateurs virtuels complètement adaptables, leurs fonctionnements et leurs indications. De par la conception de ces moyens de simulation virtuelle, ils peuvent présenter les mêmes défauts que les simulateurs physiques, ou à l'inverse, ils peuvent être développés d'une manière novatrice et incorporer la cinématique propre du patient. L'utilisation des simulateurs virtuels en particulier les articulateurs virtuels par simulation mathématique permettent déjà de traiter un grand nombre de cas cliniques. Mais le développement d'un nouveau type de simulateur virtuel: les articulateurs virtuels complètement adaptables, va permettre de traiter un plus grand nombre de cas.

Mots clés :

Articulateur virtuel, méthode d'enregistrement intermaxillaire, occlusion et CFAO, CBCT.

Virtual simulation of dynamic occlusion : current and potential prospect.**Summary :**

The use of simulators is an essential part of the daily practice of the dentist either for the diagnostic phase of the treatment phase or in the design of the prosthetic element. Moreover, recently, the technological advances that have been made in the field of dental CAD/CAM, required means to simulate the mandibular kinematics. The main purpose of this thesis was to identify the different types of virtual simulators with particular attention to virtual articulator fully adjustable, their work flow and their indications. Through their design, these virtual simulation means could present the same defects as the physical simulators, or on the contrary, they can be developed in an innovative way and they can incorporate the patient's own mandibular kinematics. The use of virtual simulators, in particular the virtual articulator by mathematical simulation, already used to treat a large number of clinical cases. But the development of a new type of virtual simulator: virtual articulator fully adjustable will help treat a greater number of cases.

Key-words :

Virtual articulator, jaw relation records/methods, occlusion and CAD/CAM, CBCT.

Université de Bordeaux – collège des sciences de la santé

UFR des sciences odontologiques

16 – 20 Cours de la Marne

33082 Bordeaux CEDEX