



**HAL**  
open science

# Nouveaux apports des technologies numériques en orthopédie dento-faciale

Élisa Chignoli

► **To cite this version:**

Élisa Chignoli. Nouveaux apports des technologies numériques en orthopédie dento-faciale . Médecine humaine et pathologie. 2016. dumas-01470987

**HAL Id: dumas-01470987**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01470987>**

Submitted on 21 Feb 2017

**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.

UNIVERSITE NICE SOPHIA ANTIPOLIS  
UFR ODONTOLOGIE - FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE  
24 Avenue des Diabes Bleus, 06357 Nice Cedex 04

**NOUVEAUX APPORTS DES TECHNOLOGIES  
NUMERIQUES  
EN ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

Année 2016

Thèse n° 42-57-16-32

**THESE**

Présentée et publiquement soutenue devant  
la Faculté de chirurgie dentaire de Nice

**Le 17 Novembre 2016**

Par

**Elisa CHIGNOLI**

Née le 1er Octobre 1990 à Nice (06)

Pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

**(Diplôme d'état)**

---

**Examineurs :**

Madame le Professeur	Armelle MANIÈRE-EZVAN	Présidente du jury
Madame le Professeur	Laurence LUPI-PEGURIER	Assesseur
Madame le Docteur	Clara JOSEPH	Assesseur
Madame le Docteur	<u>Arlette OUEISS</u>	<u>Directrice de thèse</u>

---



UNIVERSITE NICE SOPHIA ANTIPOLIS  
UFR ODONTOLOGIE - FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE  
24 Avenue des Diables Bleus, 06357 Nice Cedex 04

**NOUVEAUX APPORTS DES TECHNOLOGIES  
NUMERIQUES  
EN ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

Année 2016

Thèse n° 42-57-16-32

**THESE**

Présentée et publiquement soutenue devant  
la Faculté de chirurgie dentaire de Nice

**Le 17 Novembre 2016**

Par

**Elisa CHIGNOLI**

Née le 1er Octobre 1990 à Nice (06)

Pour obtenir le grade de :

**DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

**(Diplôme d'état)**

---

**Examineurs :**

Madame le Professeur	Armelle MANIÈRE-EZVAN	Présidente du jury
Madame le Professeur	Laurence LUPI-PEGURIER	Assesseur
Madame le Docteur	Clara JOSEPH	Assesseur
<u>Madame le Docteur</u>	<u>Arlette OUEISS</u>	<u>Directrice de thèse</u>

---

## CORPS ENSEIGNANT

### 56<sup>ème</sup> section : DEVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PREVENTION

#### **Sous-section 01 : ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE**

Professeur des Universités : Mme MULLER-BOLLA Michèle  
Maître de Conférences des Universités : Mme JOSEPH Clara  
Assistant Hospitalier Universitaire : Mme PIERRE Audrey

#### **Sous-section 02 : ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

Professeur des Universités : Mme MANIERE-EZVAN Armelle  
Assistante Associée-Praticien Associée : Mme OUEISS Arlette  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. BUSSON Floriant

#### **Sous-section 03 : PREVENTION, EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE, ODONTOLOGIE LEGALE**

Professeur des Universités : Mme LUPI-PEGURIER Laurence  
Assistant Hospitalier Universitaire : Mme SOSTHE Anne Laure  
Assistant Hospitalier Universitaire : Mme BORSA Leslie

### 57<sup>ème</sup> section : SCIENCES BIOLOGIQUES, MEDECINE ET CHIRURGIE BUCCALE

#### **Sous-section 01 : PARODONTOLOGIE**

Maître de Conférences des Universités : M. CHARBIT Yves  
Maître de Conférences des Universités : Mme VINCENT-BUGNAS Séverine  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. BORIE Gwenaël  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. RATHELOT Benjamin

#### **Sous-section 02 : CHIRURGIE BUCCALE, PATHOLOGIE ET THERAPEUTIQUE, ANESTHESIE ET REANIMATION**

Professeur des Universités Associées : Mme MERIGO Elisabetta  
Maître de Conférences des Universités : M. COCHAIS Patrice  
Maître de Conférences des Universités : M. SAVOLDELLI Charles  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. PAUL Adrien

#### **Sous-section 03 : SCIENCES BIOLOGIQUES**

Professeur des Universités : Mme PRECHEUR-SABLAYROLLES Isabelle  
Maître de Conférences des Universités : Mme RAYBAUD Héléne  
Maître de Conférences des Universités : Mme VOHA Christine

### 58<sup>ème</sup> section : SCIENCES PHYSIQUES ET PHYSIOLOGIQUES ENDODONTIQUES ET PROTHETIQUES

#### **Sous-section 01 : ODONTOLOGIE CONSERVATRICE, ENDODONTIE**

Professeur des Universités : Mme BERTRAND Marie-France  
Professeur des Universités : M. MEDIONI Etienne  
Professeur Emérite : M. ROCCA Jean-Paul  
Maître de Conférences des Universités : Mme BRULAT-BOUCHARD Nathalie  
Maître de Conférences Associé des Universités : M. CEINOS Romain  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. MORKOWSKI-GEMMI Thomas  
Assistant Hospitalier Universitaire : Mme DUVERNEUIL Laura  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. GANDJIZADEH GHOUCHANI Mir-Payam

#### **Sous-section 02 : PROTHESES**

Professeur des Universités : Mme LASSAUZAY Claire  
Maître de Conférences des Universités : M. ALLARD Yves  
Maître de Conférences des Universités : M. LAPLANCHE Olivier  
Maître de Conférences des Universités : Mme POUYSSEGUR-ROUGIER Valérie  
Assistant Hospitalier Universitaire : Mme CERETTI Léonor  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. OUDIN GENDREL Antoine  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. SABOT Jean-Guy  
Assistant Hospitalier Universitaire : M. SAMMUT Arnaud

#### **Sous-section 03 : SCIENCES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES**

Professeur des Universités : M. BOLLA Marc  
Professeur des Universités : M. MAHLER Patrick  
Maître de Conférences des Universités : Mme EHRMANN Elodie  
Maître de Conférences des Universités : M. LEFORESTIER Eric

# REMERCIEMENTS

## **A Madame le Professeur Armelle MANIERE-EZVAN**

Docteur en Chirurgie Dentaire Spécialiste Qualifiée en ODF  
Docteur de l'Université de Nice Sophia-Antipolis  
Professeur des Universités, Praticien Hospitalier  
Responsable de la sous-section Orthopédie Dento-Faciale  
Doyenne de la faculté de Chirurgie Dentaire de Nice

Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury de thèse. Votre disponibilité a su marquer toutes ces années d'études au cours desquelles j'ai pu, avec tous mes camarades, bénéficier de la richesse de vos enseignements en orthodontie. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de tout mon respect et de ma profonde estime.

## **A Madame le Professeur Laurence LUPI-PEGURIER**

Docteur en Chirurgie Dentaire  
Docteur de l'Université de Nice Sophia-Antipolis  
Professeur des Universités, Praticien Hospitalier  
Responsable de la sous-section Prévention, Epidémiologie, Economie de la santé, Odontologie légale

Vous compter parmi ce jury est un immense plaisir. Votre sourire dans les couloirs de l'hôpital, votre gentillesse et votre disponibilité m'ont accompagnée durant toutes ces années d'études. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de toute ma reconnaissance et de ma profonde considération.

**A Madame le Docteur Clara JOSEPH**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Nice Sophia-Antipolis

Maitre de conférences des Universités, Praticien Hospitalier

Responsable de la sous-section Odontologie pédiatrique

Je vous remercie d'avoir accepté de siéger dans mon jury de thèse. Votre disponibilité et vos connaissances en pédodontie m'ont été d'une grande aide en clinique et je vous remercie de nous avoir transmis votre savoir et votre énergie pour soigner des enfants. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de toute ma gratitude et de mon profond respect.

**A Madame le Docteur Arlette OUEISS**

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assistante associée des Universités

Praticien attaché hospitalier

Je vous suis très reconnaissante d'avoir accepté de me proposer un sujet et d'avoir dirigé ma thèse. Vos nombreux conseils pour l'élaboration de mon travail et votre disponibilité m'ont été d'une grande aide. Par vos connaissances sur le sujet, vous m'avez permis de découvrir de nombreuses notions sur le numérique et la 3D. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma reconnaissance et de tous mes remerciements.

# TABLE DES MATIERES

I. Introduction .....	3
II. Les nouveaux apports des technologies numériques en matière de diagnostic.....	5
<b>A. Pour les éléments dentaires.....</b>	<b>5</b>
1. L'imagerie photographique numérique.....	6
2. La numérisation des empreintes et des modèles en plâtre .....	8
3. Les empreintes numériques.....	10
4. Les études des moulages .....	12
<b>B. Pour le diagnostic céphalométrique.....</b>	<b>15</b>
1. Définition et historique .....	15
2. La céphalométrie paramétrique.....	17
<b>C. L'apport des données tridimensionnelles dans le diagnostic .....</b>	<b>25</b>
1. Les études d'acquisition tridimensionnelle.....	26
2. La superposition tridimensionnelle.....	29
3. La fusion .....	31
4. L'apport au niveau diagnostic.....	33
III. Les nouveaux apports des technologies numériques en matière de thérapeutique.....	36
<b>A. Pour les éléments dentaires.....</b>	<b>36</b>
1. Les aligneurs actifs.....	37
2. Les gouttières chirurgicales numérisées.....	41
3. L'orthodontie linguale et l'orthodontie vestibulaire numérique .....	<b>Erreur ! Le signet n'est pas défini.</b>

<b>B. Pour les moyens thérapeutiques et l'évaluation.....</b>	<b>50</b>
1. Les techniques en orthodontie.....	50
2. Les techniques en chirurgie maxillo-faciale .....	53
3. L'évaluation en thérapeutique orthodontique .....	58
4. L'évaluation en thérapeutique chirurgicale.....	63
<b>IV. Discussion .....</b>	<b>65</b>
<b>A. Un bilan en matière diagnostic .....</b>	<b>65</b>
<b>B. Un bilan en matière de thérapeutique et d'évaluation .....</b>	<b>66</b>
<b>V. Conclusion.....</b>	<b>68</b>
<b>VI. Bibliographie .....</b>	<b>69</b>
<b>VII. Iconographies.....</b>	<b>75</b>

## I. Introduction

L'orthopédie dento-faciale (ODF) est la spécialité de l'art dentaire qui se concentre sur les malpositions dentaires et les décalages des mâchoires. Son but est de rétablir un cadre harmonieux, fonctionnel et esthétique au sein de l'étage inférieur de la face. Cette définition générale ouvre un domaine d'intervention où se mêlent la correction de légères malocclusions, la correction de dysfonctions oro-faciales et la prise en charge de sévères dysmorphoses par la chirurgie orthognatique.

L'ODF serait née en France au siècle des lumières, lorsque Pierre Fauchard (1678-1761) publia en 1728 *Le Chirurgien dentiste ou Traité des dents*, décrivant pour la première fois des techniques permettant de « redresser les dents penchées ». Au fil du temps, se développent le concept d'expansion, la notion de rapports inter-arcades, *etc.* Au XXème siècle, Edward Angle (1855-1930) est le précurseur des appareils mutli-bagues et de 1936 à 1970 deux conceptions s'opposent. Aux Etats-Unis, Charles Tweed (1895-1970) stipule que ce sont les facteurs génétiques et non les stimulations fonctionnelles qui déterminent les formes d'arcades. Au même moment, l'Europe voit la naissance de la thérapeutique fonctionnelle initiée par Pierre Robin (1867-1950) et continue aussi de développer les travaux d'Angle. Les techniques orthodontiques se développent régulièrement sur ces bases jusqu'aux années 1970, période où les progrès de l'électronique et de l'informatique permettent l'expérimentation et l'utilisation de techniques très novatrices issues d'un concept central qui se résume de nos jours en un seul mot : *numérique*.

D'une façon générale, le terme *numérique* évoque le traitement automatisé d'informations à partir de techniques informatiques, techniques toujours fondées sur l'encodage des données (les informations) du monde réel sous forme de suites de valeurs dites binaires : vrai ou faux, un ou zéro. Tout nombre entier ou réel, tout mot, toute phrase, toute donnée donc, peut être traduite en binaire.

L'encodage en binaire marque ainsi la frontière entre les technologies *analogiques*, où l'électricité et l'électronique des appareillages produisent directement des résultats, et les technologies *numériques* où l'informatique est au cœur de tous les processus : analyser des données ou piloter un équipement consiste à utiliser un programme informatique – on dit aussi logiciel ou application - préalablement conçu.

L'ODF numérique s'est développée avec la science informatique dès l'apparition de la photographie numérique, nouveau support du bilan diagnostique. Puis l'augmentation de la puissance des ordinateurs et donc des logiciels ODF a permis d'utiliser le numérique pour calculer, construire et montrer des solutions thérapeutiques.

L'objet de cette thèse est de présenter un état de l'art des apports actuels des technologies numériques dans la démarche diagnostique et dans le traitement orthodontique.

De nos jours, le numérique est définitivement installé au cœur des technologies de l'ODF. Ainsi, l'utilisation de l'imagerie 2D numérique en temps réel (deux dimensions sans indication de volume) est désormais la norme dans les cabinets, alors que l'imagerie 3D (trois dimensions, largeur-hauteur-profondeur) se développe rapidement avec, par exemple, la visualisation en 3D du massif facial. L'apparition du *scanner* et celle du *cone beam computerized tomography* (CBCT) plus récemment ont placé l'orthodontiste dans un univers tridimensionnel. Plus tard, d'autres outils tridimensionnels sont apparus pour saisir avec une précision et un rendu remarquable les couleurs, les arcades dentaires et l'enveloppe cutanée.

La possibilité de manipuler des images 3D est entrée dans notre univers quotidien et l'utilisation d'une céphalométrie 3D est désormais disponible. Ainsi, dans une première partie, nous étudierons les nouveaux apports du numérique en matière de diagnostic céphalométrique et l'apport des données d'acquisitions tridimensionnelles, en traitant aussi des évolutions dans la prise d'empreinte, l'analyse et l'exploitation de celles-ci avec l'utilisation de scanners et de logiciels adaptés.

Dans une deuxième partie, nous explorerons le domaine de la thérapeutique *numérique* en examinant d'abord les méthodes issues du *prototypage rapide* (aligneurs et gouttières chirurgicales), ainsi que les techniques d'attaches linguales et d'attaches vestibulaires numériques : différentes de celles de l'orthodontie classique, ces techniques orthodontiques permettent de nouvelles manières de traiter. Puis, en matière de chirurgie, nous évoquerons de nouvelles ostéotomies et le développement de la chirurgie guidée. Pour terminer, nous parlerons de l'évaluation thérapeutique à l'aide des techniques de superposition.

Avant de conclure, dans une troisième partie, nous discuterons de réglementation, de santé publique et des avancées scientifiques annoncées en orthopédie dento-faciale.

## II. Les nouveaux apports des technologies numériques en matière de diagnostic

Le diagnostic est la clé du traitement en ODF, il doit être de qualité et être posé avec la plus grande précision. Il repose sur un examen clinique systématisé et standardisé et doit avoir abordé l'ensemble des éléments anatomiques et fonctionnels.

La démarche diagnostique s'articule autour de trois axes. Le bilan clinique classique, réalisé dans un premier temps, qui comprend l'anamnèse, l'examen clinique exo-buccal, l'examen clinique endo-buccal et un examen des relations inter-dentaires. A ceci s'ajoute un examen clinique fonctionnel des muscles et fonctions. Pour finir, des examens complémentaires précisent et complètent l'examen clinique et permettent de mesurer et de quantifier les différentes anomalies découvertes. La photographie, les empreintes et encore l'imagerie font partie des examens complémentaires.

L'essor du numérique dans cette discipline permet une évolution de ces examens, aboutissant à de nouvelles approches dans les domaines de l'examen dentaire et de l'imagerie.

A l'origine, le diagnostic à l'aide de technologies numériques était destiné à la recherche. De nos jours, son utilisation commence à se généraliser.

### A. Pour les éléments dentaires

Une analyse précise des relations dento-faciales du patient est essentielle pour la planification d'un traitement approprié. Les tissus mous du visage dictent la direction du plan de traitement orthodontique. L'appréciation de l'harmonie du visage, l'étude des arcades dentaires, des positions dentaires et squelettiques pour la pose du diagnostic subissent une révolution. Cette évolution est apparue avec la démocratisation du numérique au sein des cabinets dentaires.

## 1. L'imagerie photographique numérique

L'imagerie numérique à deux dimensions (2D) a vu le jour dans les années 1980, et c'est dans le courant des années 1990 qu'apparaissent les appareils photographiques numériques comme nous les connaissons aujourd'hui. Leur mécanisme de fonctionnement est le suivant : la lumière frappe un récepteur photosensible créant une image latente qui sera ensuite visualisable par l'être humain. La surface photosensible est un capteur électronique, dit *Charge Coupled Device* (CCD). Le *pixel* (px) est l'unité permettant de mesurer la définition d'une image numérique en nombre de point de l'image (Shorey R, 2009).

Les intérêts de la photographie numérique se définissent ainsi (Sandler J, 2002) :

- Instantanéité de l'évaluation des résultats de la photographie avec présence d'un écran LCD (*Liquid Crystal Display*)
- Possibilité de suppression immédiate ou différée du cliché
- Modification et amélioration via des logiciels de traitement d'image allant d'une simple rotation, à un recadrage ou encore à une modification de l'exposition de la photographie. De plus, (Kapoor P, 2015) expose les dangers potentiels de manipulation (au sens authenticité) d'une image et nous nous devons d'en tenir compte dans notre pratique
  - Sauvegarde des photographies et leur archivage facilité sur ordinateur
  - Transfert facilité vers les ordinateurs (connexion USB, lecture de la carte-mémoire ou encore liaison WIFI)
  - Impression sur différents supports
  - Modélisation de la face du patient avec possibilité de création d'un morphing et de son utilisation dans un logiciel de planification pour la gestion des tissus mous
  - Communication inter-praticiens dans le cas de collaborations mais aussi avec le patient avec un partage facilité des images
  - Prix accessible et facilité d'utilisation
  - Pas de dégradation dans le temps du cliché.

Le praticien constitue ainsi un dossier photographique à l'aide de différents clichés. Ces photographies devant être identifiées et numérotées. Ce bilan constitue une preuve médico-légale de l'état initial, il fait donc office d'état des lieux et est réalisé en même temps que l'examen clinique du visage et de la cavité buccale. Nous pouvons dire que la photographie

est une méthode de visualisation simple et commune, servant de référence pour le bilan esthétique du patient.

Le but de ce bilan est donc de visualiser, diagnostiquer et planifier les tâches à effectuer. Des clichés équivalents sont réalisés en fin de traitement permettant un point de comparaison en pré et post opératoire. Ce sont des photos standardisées qui permettent une certaine reproductibilité.

Le dossier comprend différents clichés qui sont au minimum :

- Trois clichés exo-buccaux



*Figure 1 : Vue de face - harmonie du visage*



*Figure 2 : Vue de profil - recherche de dysmorphoses*



*Figure 3 : Analyse du sourire*

- Trois clichés intra-buccaux permettant une observation directe de l'occlusion



*Figure 4 : Occlusion secteur 1/4*



*Figure 5 : Occlusion vue frontale*



*Figure 6 : Occlusion secteur 2/3*

- Deux clichés, maxillaire et mandibulaire peuvent être ajoutés. Ils permettent d'analyser la forme d'arcade, les encombrements, ou encore d'établir le bilan dentaire et parodontal.

Le 2D date des années 80 et des technologies 3D numériques sont dès à présent disponibles. Nous parlerons donc dans la suite de ce mémoire de l'apparition de la photographie 3D basée sur le principe de la numérisation optique 3D passive.

## 2. La numérisation des empreintes et des modèles en plâtre

L'empreinte dentaire consiste à imposer une forme à un matériau en phase plastique qui la conserve après son durcissement. Le premier matériau utilisé est l'alginat puis depuis les années 1970, les élastomères de silicone se sont imposés (Schulein TM, 2005). C'est également durant les années 70 que l'avènement du numérique va mettre en relation la technologie numérique et les empreintes dentaires. Mais c'est depuis le début des années 2000 que nous observons une démocratisation des scanners extra-oraux de taille moyenne. Il s'agit de la technique de numérisation indirecte.

La numérisation des modèles et des empreintes se fait donc grâce à des scanners extra-oraux qui opèrent sur la totalité de la surface de l'objet par un mécanisme permettant de le faire pivoter dans l'enceinte de l'appareil.

Il existe dans le cas de la numérisation des empreintes et des modèles dentaires :

- Le scanner mécanique qui enregistre l'objet par contact et balayage d'un micro palpeur sur sa surface. La sonde envoie à chaque instant sa position à un ordinateur qui l'analyse et l'enregistre (dans un plan X, Y, Z)
- Le scanner optique à méthodes réflectives qui est basé sur le principe de base du calcul de la déformation d'un rayonnement projeté puis réfléchi sur l'objet à numériser. Un rayonnement de référence (laser, frange de lumière) dont on connaît les propriétés est projeté sur une surface qui va le réfléchir. Par l'analyse de la déformation du rayonnement renvoyé, un logiciel calculera et créera un nuage de points définissant la résolution de l'image (Lecocq, 2016). Les scanners sont de plus en plus constitués de *LED* (Light-Emitting-Diode) bleu qui permettent en plus de capturer les textures de l'objet scanné.

Ainsi, des triangles (maillages tridimensionnels) joignent les points qui ont été acquis à haute résolution par les caméras, et leur nombre est optimisé pour assurer un compromis idéal entre la taille des modèles et leur précision. A partir de là, les facettes triangulaires modélisent un modèle polygonal 3D qui va servir de base à la reconstruction 3D : l'image tridimensionnelle est donc créée.

Ces deux types de scanner produisent une suite de fichiers qui sont, pour la suite du protocole, encodés dans un format libre de type *.stl* (Standard Tessellation Language). Ce

format permet une lecture par tous les logiciels 3D et est donc disponible pour le laboratoire et le praticien sans pour autant devoir disposer d'un logiciel spécifique.

Pour exemple, le scanner 3D R850® (fig.7), scanner orthodontique 3D conçu pour une numérisation à grande vitesse, présente les spécificités techniques suivantes (3Shape, 2016) :

- Temps de numérisation des modèles en plâtre : 60 secondes
- Temps de numérisation des empreintes : 160 secondes
- Précision (ISO) : 7 microns
- Caméras : 2 caméras de 5 mégapixels
- Source lumineuse : Bleu LED multi-ligne
- Système de mouvement : 3 axes : rotation, inclinaison et mouvement linéaire
- Interface : Connexion USB pour PC et ordinateur portable
- Format de sortie : STL (standard ouvert) et DCM
- Dimensions (L x H x P) : 335 x 283 x 362 mm
- Poids : 15,8 kilogrammes



Figure 7 : Scanner extra-oral 3Shape®

Les intérêts de cette technique se définissent à différents niveaux : le stockage et la conservation des modèles, la fabrication et la duplication aisée, la production d'images durables sans crainte de perte ou de dommage, l'analyse facilitée par l'utilisation de logiciels d'analyse, la portabilité pour des présentations, le gain de productivité, l'absence de frais de transport pour la prise en charge des empreintes et une communication facilitée.

La non-utilisation des modèles traditionnels en plâtre permet d'éviter poussière, risque d'usure, risque de casse partielle ou totale et facilite le stockage ainsi que l'obligation de numérotation et datation.

Concernant la fiabilité de ces empreintes virtuelles, plusieurs études ont été réalisées pour des modèles issus de scanners et de logiciels différents avec pour conclusion identique : il s'agit d'une technique fiable et reproductible (Wiranto MG, 2013) (White AJ, 2010).

### 3. Les empreintes numériques

L'avènement du numérique amène le praticien à s'éloigner des techniques d'empreintes traditionnelles et permet la démocratisation des caméras intra-orales. La prise d'empreinte devient donc numérique. Le scanner intra-oral (ou caméra intra-orale) est un capteur photo-numérique que l'on présente devant toutes les faces des dents pour obtenir une empreinte dentaire optique numérique tridimensionnelle.



Figure 8 : Prise d'empreinte numérique



Figure 9 : PlanmecaA® - PlanScan®

Cet outil numérique se compose soit d'une simple caméra qui est branchée à un ordinateur (*fig.9*), soit d'un module posé sur le plan de travail qui comprend la caméra et le système informatique (*fig.10*), soit encore d'un *kart* mobile avec caméra et système informatique intégré (*fig.11*).

Ces systèmes d'empreintes optiques font appel à différentes technologies pour enregistrer les volumes dentaires via l'enregistrement des coordonnées tridimensionnelles de tous les points de la cible : la triangulation laser, la projection de franges de lumière, l'imagerie parallèle confocale et la vidéo photogrammétrique. Pour les trois premières techniques, comme nous l'avons vu pour les scanners extra-oraux, le rayon incident est réfléchi par la surface scannée puis est enregistré par un capteur spécifique. Pour la vidéo stéréophotogrammétrique, deux caméras vidéo HD (haute définition) décalées enregistrent différentes prises de vues de l'objet cible. Ainsi, la distance entre ces caméras et la cible est enregistrée selon deux perspectives et permet de définir ses coordonnées tridimensionnelles (Lecocq, 2016).

En complément, (Cazier S, 2013) (Patzelt SB, 2014) (Chouraqui JF, 2015) évoquent les différentes caractéristiques qui classent les caméras actuelles :

- L'ergonomie de la caméra : poids, taille globale, prise en main (pistolet, stylos), taille et forme de l'embout intra-buccal

- La technologie qui la compose (capteurs numériques et logiciel interne)
- La présence ou l'absence de poudrage : en orthodontie spécifiquement une caméra sans poudrage est recommandée
  - Le maître modèle : monochrome ou coloré
  - L'interface de communication : clavier étanche, souris, trackball, écran tactile, ordinateur portable, ou encore celui du cabinet
    - Le type d'acquisition : a) image par image en positionnant la caméra sur les zones à enregistrer ; b) flux continu en balayant les surfaces dentaires avec possibilité de voir en temps réel la fenêtre d'acquisition
    - Le dispositif antibuée : dans un environnement propice à la formation de buée comme la cavité buccale, deux systèmes non décrit ici existent pour éviter la formation de celle-ci
      - La réalisation de photographies intra-orales en HD (haute définition)
      - Le calibrage de la caméra pour maintenir un haut niveau de précision. Le calibrage est nécessaire régulièrement dans le cas des caméras dont des éléments optiques sont en mouvement
      - L'utilisation de l'acquisition avec envoi du fichier .stl à un laboratoire pour exploitation (et retour) ou utilisation au sein du cabinet
      - Le traitement du fichier image avec un travail numérique réalisé directement par l'unité d'acquisition ou de manière externalisée
      - Le prix actuellement onéreux avec évidemment une tendance à la baisse.



Figure 10 : iTERO® Element®



Figure 11 : Dental Wings® - Dwio®

Pour (Patzelt SB, 2014) les intérêts et les apports en orthodontie de cette technique d'empreinte spécifique sont des frais de manufacture réduits, une numérisation précise en couleur avec un rendu HD, une visualisation 3D en temps réel de la prise d'empreinte, une reprise d'empreinte immédiate si nécessaire et une possibilité d'enregistrement de l'occlusion.

Il faut ajouter que pour les patients, la prise d'empreinte devient quasiment ludique et est en tout cas moins inconfortable. Dans leur article (Güth JF, 2013) compare la précision de différents procédés de prise d'empreintes et en conclut dans les limites de leur étude que la numérisation directe avec une caméra intra-buccale montre une précision significativement plus élevée par rapport à la procédure classique de prise d'empreinte et la numérisation indirecte par un scanner.

#### 4. Les études des moulages

Les moulages orthodontiques représentent de véritables outils d'analyse. Ils sont des éléments incontournables de la démarche diagnostique et par conséquent de la décision thérapeutique. Comme nous l'avons vu, de nos jours, les modèles d'étude peuvent se présenter désormais sous la forme palpable de modèles en plâtre ou alors sous une forme numérique.

Depuis des décennies, l'orthodontiste analyse sur ses modèles en plâtre la position des dents et la situation des arcades entre elles. Après la réalisation des empreintes, celles-ci sont coulées en plâtre. Il s'en suit la taille des moulages à l'aide d'un taille-plâtre équipé d'un angulateur. Les modèles sont stables sur toutes leurs bases avec les bords supérieurs et inférieurs parallèles au plan d'occlusion : il s'agit de la « taille américaine ». Ils sont aisément manipulables et permettent une évaluation objective et quantitative des paramètres occlusaux et dentaires indispensables à l'élaboration du diagnostic. Par exemple : évaluer la forme d'arcade, consigner la formule dentaire, ou encore déterminer la classe d'Angle canine et molaire.

Les outils numériques répliquent l'utilisation traditionnelle des modèles d'étude en la dépassant sans risque d'endommager le modèle et ouvrant des opportunités entièrement nouvelles avec l'utilisation de logiciels spécifiques :

- Mesure du périmètre d'arcade grâce à des arcs générés automatiquement et modifiables
- Mesure mésio-distale de chaque dent par des étriers virtuels ainsi que le zoom

- Mesure du recouvrement et du surplomb avec des mesures facilitées par la possibilité de réaliser des coupes virtuelles de moulages dentaires
- Mise sur articulateur virtuel
- Visualisation du plan de traitement et analyses comparatives avec superposition de modèles
- Réalisation d'un *set-up* virtuel pouvant être modifié à l'infini.

Le *set-up* consiste à découper certaines dents du moulage avec une scie à lame très fine et à les installer dans la cire pour préfigurer un traitement. Cette technique est considérée comme le moyen le plus efficace pour valider l'occlusion voulue. Tout naturellement, les *set-up* numériques se sont développés depuis les années 2005 et sont réalisables en quelques clics (Baron P, 2014). Il existe aussi le *set-up* chirurgical informatisé avec simulation du traitement sur modèle grâce des logiciels spécifiques tel que Dolphin Imaging®.

D'après leur article (Leifert MF, 2009), dont l'étude compare les mesures d'analyses effectuées sur des modèles numériques avec ceux de modèles en plâtre, montre que la précision du logiciel pour l'évaluation de l'analyse de l'espace sur les modèles numériques est cliniquement acceptable et reproductible par rapport aux analyses faites sur les modèles traditionnels.

De plus, (Barreto MS, 2016) vise à évaluer la fiabilité de la technologie de configuration orthodontique numérique (*set-up* numérique) en le comparant avec des configurations manuelles (*set-up* physique) et avec les modèles de traitement finaux. Les modèles en plâtre sont numérisés à l'aide d'un scanner R-700® de 3Shape®, tandis que les *set-up* numériques sont fabriqués en utilisant le logiciel OrthoAnalyzer®. Après comparaison de mesures linéaires, les résultats révèlent qu'aucune des mesures évaluées par le *set-up* manuel et le *set-up* numérique ne montrent de différences statistiquement significatives. On peut en déduire que les *set-up* numériques sont aussi efficaces et précis que les *set-up* manuels et constituent un outil pour le diagnostic à part entière.

Pour terminer, il faut ajouter que de nombreux logiciels de traitement d'image de reconstruction 3D existent sur le marché. Une équipe (Westerlund A, 2015) vient de comparer quatre logiciels de traitement orthodontique en terme de services proposés, de caractéristiques et de convivialité. Dans ce cadre de test, la réplique des moulages initiaux a été envoyée à la société Cadent® pour OrthoCAD®, OthoLab® pour O3DM®, OrthoProof® pour DigiModel® et 3Shape® pour OrthoAnalyzer®. L'un des résultats est que la facilité

d'utilisation de ces programmes est pauvre et a donc besoin d'être développée. De plus, une formation pratique supervisée par les experts de la société choisie est recommandée pour les praticiens débutants.

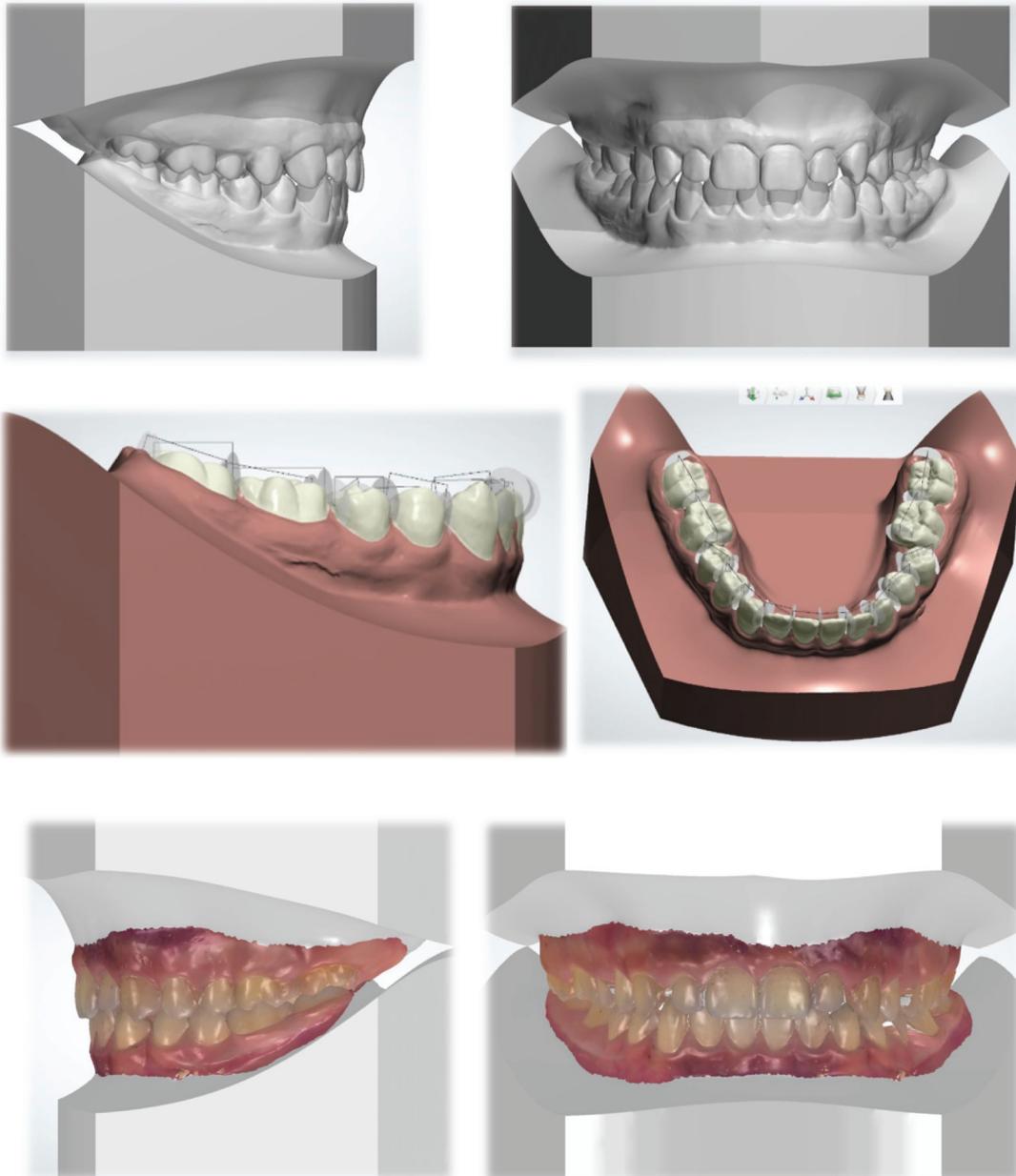


Figure 12 : Set-up numérique

En conclusion, grâce à l'utilisation du numérique, les modèles dentaires deviennent virtuels et *hyper modifiables*, ce qui facilite la pratique de l'orthodontie et y apporte une dimension que l'on peut qualifier de ludique. Ces documents aident ainsi à la pose d'un diagnostic.

## B. Pour le diagnostic céphalométrique

### 1. Définition et historique

La céphalométrie 2D comme la céphalométrie 3D sont des systèmes de mesures biologiques concernant l'extrémité céphalique et sont destinées à conduire à l'établissement d'un diagnostic et d'un plan de traitement quantifié. Les étapes requises sont :

- La saisie de l'anatomie
- La définition d'un système de repères (*landmarks*) et de paramètres
- La comparaison des paramètres d'un patient aux valeurs moyennes (dites normales)
- La définition et l'appréciation quantifiée de la dysmorphie
- La définition des objectifs (retour à la normale) et des moyens pour permettre d'établir la thérapeutique avec un plan de traitement quantifié.

Concernant l'histoire de la 2D, le premier cliché dentaire intra-buccal a été effectué par Otto Walkhoff sur lui-même très peu de temps après la découverte fortuite des rayonnements électromagnétiques à haute fréquence (RX) par W.C Röntgen en 1895. Initialement, l'imagerie 2D par rayons X est une imagerie de projection qui réduit un volume 3D en une image plane 2D. Il s'agit du résultat d'absorption d'un faisceau homogène de rayons X par les structures anatomiques qu'il rencontre. L'application commune est l'orthopantomogramme (OPT), examen de routine en ODF.



Figure 13 : Panoramiq  dentaire



Figure 14 : Téléradiographie de profil

En 1923, Carrea propose une analyse radiographique simultan e du profil cutan e et osseux du patient. C'est à partir de là que nous pouvons définir les caractéristiques de la téléradiographie comme nous la connaissons de nos jours, avec une grande distance foyer-

objet (1,5 ou 4m), le choix d'un générateur avec une puissance suffisante et l'utilisation d'un céphalostat. Trois incidences existent, de profil (plan sagittal), de face (plan frontal) et basale (plan basal) (Foucart JM, 2012).

Concernant l'histoire de la 3D, l'évolution des techniques d'imagerie nous amène vers l'apparition de méthodes de saisie tridimensionnelle dentaire, cutanée et squelettique dans les années 1970. Le scanner à RX est le premier appareil qui permet la création d'une image des tissus durs (osseux et dentaires) et tissus mous de la face. Son image résulte d'un phénomène d'absorption des rayons X (générateur haute tension de l'ordre de 120 kV) et d'un codage informatique. Mais dans les années 1990, le souci de radioprotection conduit au développement d'une technique d'imagerie sectionnelle 3D avec une dosimétrie plus favorable, qui cible les structures denses. Elle bénéficie d'une résolution de l'image optimale et s'améliore constamment avec l'apparition d'appareils « haut de gamme ». De plus sa moindre sensibilité aux artefacts métalliques donne un avantage à cet appareil. Ainsi, le *cone beam computerized tomography* (CBCT) voit le jour et utilise un faisceau ouvert de rayons X, le plus souvent conique. Les données numériques de ses projections multi-angulaires sont traitées par des algorithmes de reconstruction qui restituent l'objet (Cavézian R P. G., 2008). Ces deux appareils, scanner à RX et CBCT sont des techniques d'imageries sectionnelles numériques.



Figure 15 : Appareillage CBCT Planmeca®

L'ODF bénéficie de l'apport diagnostique (morphologique et topographique) du CBCT pour les éléments dentaires inclus et pour l'étude des structures de voisinage mais aussi pour l'analyse du massif facial. Son application s'étend grâce aux appareils à grand champ à la céphalométrie 3D (Cavézian R, 2011). Le format standard pour les images de tomodensitométrie s'appelle DICOM, pour « *digital imaging and communication in medecin* ».

D'autres techniques permettent l'acquisition d'une image en 3D : la microtomographie par ordinateur (MCT), le scanner optique, la stéréophotogrammétrie (3DMD) ou photographie numérique 3D, la morphométrie faciale 3D (3DFM) ou encore l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Par exemple, à l'école de médecine dentaire de l'Université de Caroline du Nord à Chapel Hill, le docteur Nguyen utilise un système d'imagerie en trois dimensions qui emploie la méthode vidéo stéréophotogrammétrique par lumière structurée pour capturer l'image du visage (technique la plus utilisée pour la numérisation 3D). Les images peuvent être ultérieurement intégrées aux tracés céphalométriques 3D. La précision de la reconstruction obtenue avec ce système est d'environ 400 microns (Nguyen CX, 2000).



*Figure 16 : Image reconstruite d'un visage humain*

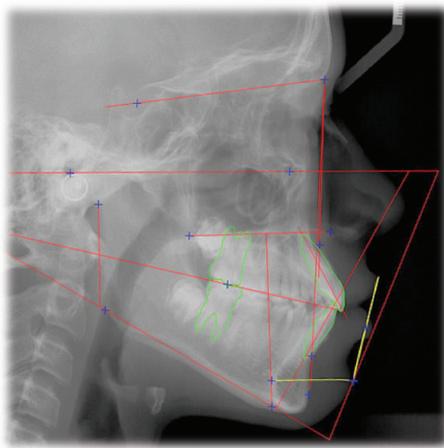
En résumé, les méthodes de saisie morphologique 3D sont nombreuses, efficaces et produisent une imagerie 3D magnifique mais le diagnostic n'en est qu'à ses balbutiements.

## 2. La céphalométrie paramétrique

### *a) La céphalométrie paramétrique bidimensionnelle*

La céphalométrie 2D quantifie l'importance des dysmorphoses par l'étude des mesures angulaires et linéaires à partir de plans de référence. Cette céphalométrie regroupe différentes analyses basées sur l'identification de « points » ou repères sur une radiographie de patient.

Nous pouvons citer trois groupes d'analyse : typologiques (Björk), dimensionnelles (Tweed) et architecturales (Coben).



Analyse de Tweed :				
Angle FMA	25.0°	±5.0	30.5	0.5
Angle FMIA	68.0°	±3.0	60.7	-4.3
Angle IMPA	87.0°	±5.0	88.9	OK
Angle SNA	82.0°	±2.0	81.3	OK
Angle SNB	80.0°	±2.0	80.3	OK
Angle ANB	2.0°	±2.0	1.0	OK
AO-BO	0.0mm	±2.0	-5.5	-3.5
Occlusal - SN	14.0°	±2.0	20.4	4.4
Occlusal - FH	10.0°	±2.0	13.5	1.5
Inter-incisif	135.0°	±3.0	123.2	-8.8
total chin	11.0mm	±5.0	13.1	OK
upper lip	13.0mm	±5.0	11.7	OK
Angle Z	78.0°	±3.0	67.7	-7.3
Nasion - ENA	56.2mm	±10.0	46.5	OK
Menton - ENA	65.7mm	±10.0	56.9	OK
HFP	45.0mm	±10.0	32.1	-2.9
HFA	65.0mm	±10.0	54.1	-0.9
HFP / HFA	0.7	±0.2	0.6	OK

Figure 17 : Tracés céphalométriques

Avant le numérique, le praticien dessinait des points et des traits sur un cliché argentique et calculait les valeurs. Désormais une analyse céphalométrique 2D numérique est réalisée rapidement et automatiquement sur écran. Le praticien clique sur les repères qu'il désire utiliser et les logiciels (Arakis®, Orqual®, Oris®, *etc.*) effectuent tous les calculs souhaités ce qui permet un gain de temps majeur en évitant les tracés fastidieux manuels.

Le logiciel Oris® présente de telles fonctionnalités (ORISLINE) :

- Des images de HD avec calibration et modifications des nuances de gris
- OrisCephRx3 Designer® avec la possibilité de créer des analyses personnalisées
- Un graphique orthodontique OrisDent9001® qui permet l'acquisition et l'affichage des données de l'analyse céphalométrique d'un patient puis, dans le même tableau, les données sur l'évolution du traitement
  - La possibilité de traçage de la mandibule en relation centrée
  - La gestion des images du patient dans un album photo où sont stockées toutes les images nécessaires pour le traitement orthodontique
  - Des outils d'analyse avancés avec la possibilité de réaliser des roto-translations et le redimensionnement des structures anatomiques
  - De nombreuses techniques d'analyses disponibles.

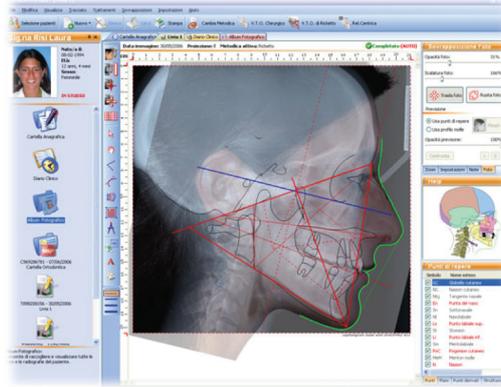


Figure 18 : Logiciel Oris®

Mais il existe des limites à la céphalométrie 2D car l'interprétation de l'image radiologique suppose une superposition exacte des cotés droit et gauche du patient sur le plan sagittal médian. De plus, le repérage des points est difficile et fastidieux, et, l'utilisation de moyennes d'une population de référence standard et d'une définition de la normalité affaiblit la technique.

Dans leur article, (Bourriau J, 2012) montre qu'il n'existe aucune différence statistiquement significative liée à la distance foyer-sujet ou au type de récepteur (argentique/numérique) lors de l'identification des repères céphalométriques. De plus, le type de cliché qui présente en moyenne des nuages de dispersion les plus faibles est celui réalisé sur une installation à 1,50 m associé à un capteur numérique. Les erreurs de mesures angulaires et linéaires sont faibles, respectivement inférieures à  $3,1^\circ$  et 0,46mm. D'après (Chung RR, 2009) une coupe latérale d'une image CBCT peut être utilisée pour effectuer une analyse céphalométrique avec des niveaux de précision comparables aux céphalométries latérales traditionnelles.

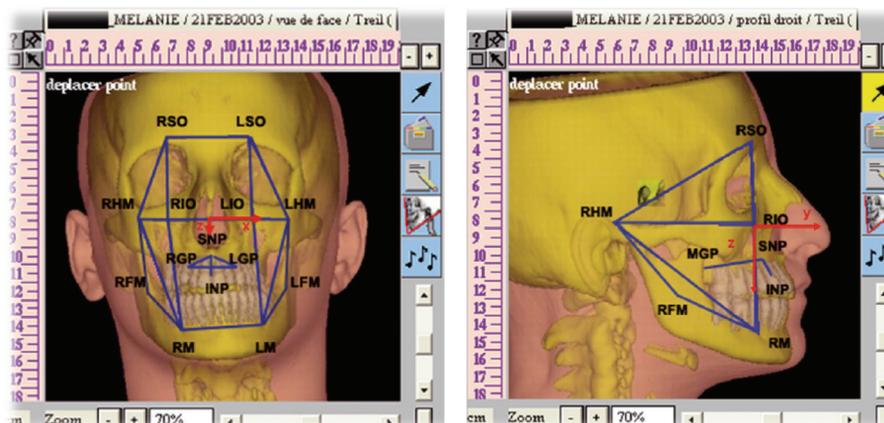
Pour finir, nous savons que son utilisation est très importante et est le point de départ de la quasi-totalité des diagnostics orthodontiques. Il s'agit d'un examen de routine. La téléradiographie latérale permet une analyse de base d'orthodontie avec des taux d'irradiation très faibles équivalents à moins d'une journée d'exposition naturelle (source : institut de radioprotection et de sûreté nucléaire).

## b) Analyse céphalométrique tridimensionnelle

L'évolution de l'acquisition numérique du volume céphalique et le développement de logiciels adaptés permet une restitution 3D conforme aux exigences anatomiques, morphologiques, topographiques et biensuratives dento-maxillo-faciale. Ainsi, la possibilité d'une imagerie 3D biométrique est réelle. Comme pour la céphalométrie 2D, ces analyses sont divisées en analyses dimensionnelles et en analyses architecturales (Papé Rd, 2012).

En France, Jacques Treil et son équipe, avec la collaboration du service d'ODF de Toulouse, ont créé à partir des années 1990 une méthode d'analyse céphalométrique 3D à partir des données DICOM issues d'acquisitions volumiques s'inspirant de la théorie neuromatricielle de Moss (Treil J, 2000). Cette méthode d'analyse céphalométrique est passée progressivement de 8 à 14 points permettant une lecture parfaite de l'architecture maxillo-faciale globale. Les 8 points de l'analyse primaire de Treil assurent le bornage de la charpente et les 8 autres points assurent le repérage des bases (Faure J M.-S. C.-J., 2008). Les points mentonniers sont mixtes. Ils appartiennent simultanément à la charpente et à la base mandibulaire. Cette méthode est supportée par les logiciels de la gamme Cépha® (C2000® et Cépha 3DT®).

La création du modèle 3D de l'architecture maxillo-faciale s'appuie sur 14 repères trigéminaux et la localisation des dents passe par le calcul de la matrice d'inertie. Les points-repères utilisés, dont le repérage et la labélisation se font directement sur les coupes scanner, sont les deux foramina supra-orbitaires (RSO et LSO), les deux foramina infra-orbitaires (RIO et LIO), les deux foramina mentonniers (RM et LM), les deux têtes des marteaux (RHM et LHM), les deux foramina grands palatins (RGP et LGP), les deux foramina mandibulaires (RFM et LFM) et l'orifice inférieur et supérieur du canal naso-palatin (INP et SNP).



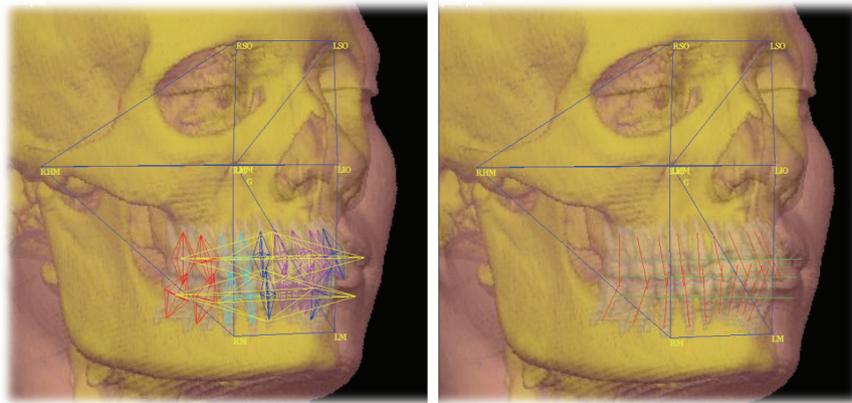


Figure 19 : Charpente maxillo-faciale – analyse céphalométrique 3D

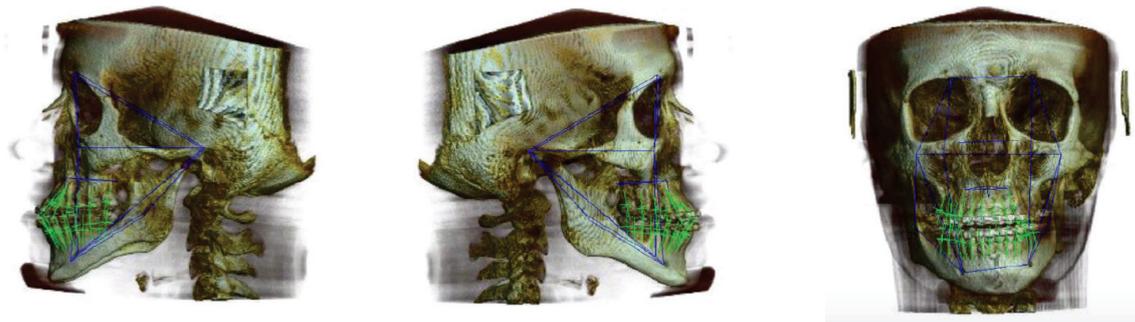
Tout cela représente l'étage alvéolo-dentaire décrivant la dent unitaire et les deux arcades maxillaire et mandibulaire isolées ou prises dans leur ensemble, l'étage basal avec les quatre points basi-maxillaires (RGP, LGP, INP, SNP) et basi-mandibulaires (RFM, LFM, RM, LM) et la charpente maxillo-faciale définie par les huit points d'analyse initiale de Treil (RHM, LHM, RSO, LSO, RIO, LIO, RM, LM). Le praticien, dans un souci orthodontique, pourra analyser les dents et les arcades. L'orthopédie et la chirurgie orthognatique pourront s'enrichir des données acquises sur les bases osseuses.

Cette analyse permet un repérage parfait des positions dentaires linéaires et angulaires par rapport aux arcades (coordonnées du centre d'inertie, torque de chaque dent) et un repérage des arcades par rapport à l'architecture maxillo-faciale (Faure J M.-S. C.-J., 2008).

De nombreux paramètres participent à la description de l'anatomie maxillo-faciale (plus de 1000), mais il faudra relever les paramètres les plus utiles pour établir un diagnostic cohérent (exemple : paramètre de relation ou décalage haut/bas).

Cependant, les erreurs en céphalométrie 3D existent aussi. Une étude comparant les résultats d'identification des points de référence d'une céphalométrie 2D à celle d'une céphalométrie 3D a montré que la précision d'identification est la même (Papé Rd, 2012).

Il ressort que le modèle de cette analyse est suffisamment stable pour constituer un standard biométrique universel capable de définir, par son équilibre et sa symétrie, la « normalité » de sujets d'origines ethniques différentes. La céphalométrie 3D produit une description anatomique de grande qualité et son utilisation clinique systématique n'en est qu'à son début. Il s'agit de la seule analyse quantitative développée à l'heure actuelle.



*Figure 20 : Scanner cranio-facial pré-chirurgical avec tracés céphalométriques*

En matière de céphalométrie, des solutions intermédiaires existent. Par exemple, les logiciels V surgery4.0® et V Works4.0® de Cybermed® sont utilisés pour mesurer des modèles 3D à partir des points de repères issus de la céphalométrie 2D ce qui limite l'intérêt des résultats (Park SH, 2006 ).

### *c) L'apport au niveau diagnostic*

La pose d'un diagnostic bénéficie de l'apport de la céphalométrie 2D ou 3D et permet une prise en charge adaptée.

Dans le cas d'un diagnostic céphalométrique 2D, les analyses de tracés donnent une série de résultats : diagnostic squelettique, dento-alvéolaire, occlusal, esthétique, valeur pronostique pour le sens vertical (GoGn/Sn) et sagittal (AoBo) permettant de poser le diagnostic d'une dysmorphose ou d'une anomalie. Il donne aussi la possibilité de quantifier et de comparer dans le temps des valeurs, la possibilité d'examen du carrefour aéro-pharyngé et une analyse des compensations.

Dans le cas d'un diagnostic céphalométrique 3D, tous les résultats 2D sont évidemment aussi disponibles. Mais, la céphalométrie 3D permet en plus un diagnostic du sens antéro-postérieur et du sens vertical beaucoup plus riche que la céphalométrie conventionnelle. L'analyse du sens transversal, l'analyse de l'asymétrie faciale, de l'esthétique, des compensations, l'analyse des voies respiratoires et la possibilité de déterminer des éléments anatomiques squelettiques et dentaires à corriger sont des éléments importants de diagnostic améliorés par le numérique 3D. Les paramètres de l'analyse permettent d'obtenir de

nombreuses informations, *Gimx* pour exemple est un paramètre : d'asymétrie / de position d'un élément anatomique / transversal / alvéolaire / antérieur.

L'analyse céphalométrique 3D amène la transversalité, ce qui permet l'exploitation de nouvelles données et une analyse plus spécifique de l'esthétique morphologique du visage. La possibilité de disposer d'une charpente en trois dimensions donne un nouvel accès au sens transversal qui est peu exploité en céphalométrie 2D car il n'est exploitable qu'avec des téléradiographies basales ou frontales.

Quantifier les asymétries faciales et déterminer précisément les éléments anatomiques squelettiques et dentaires à corriger est essentiel pour la pose d'un diagnostic. L'analyse de l'asymétrie est un exemple remarquable du passage du 2D au 3D. Pour (Oueiss A, 2010) l'asymétrie dans les grandes dysmorphoses est une dysmorphie globale, c'est-à-dire une prédominance d'une hémiface avec augmentation homogène des mesures transversales, antéro-postérieures et verticales. Cette technique d'imagerie permet aussi la description des syndromes transversaux. Toute anomalie transversale alvéolo-dentaire ou squelettique a des répercussions sur la symétrie faciale.

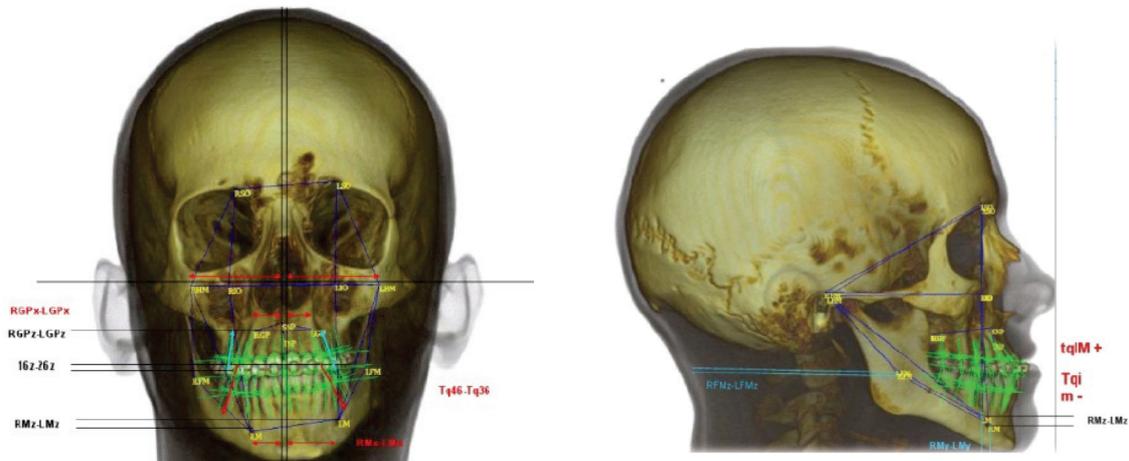


Figure 21 : Scanner cranio-facial de face et de profil avec les points de repères trigéminaux et les paramètres d'asymétrie les plus marquants

L'esthétique, motif principal de consultation en orthodontie, était historiquement mesurée lors de la présence du patient sur le fauteuil et par les photographies associées. Dans leur étude, Ahmed Zribi et Jacques Faure déterminent les critères céphalométriques les plus déterminants dans l'esthétique faciale par l'identification des corrélations les plus fortes entre l'aspect esthétique et les valeurs de céphalométries tridimensionnelles de l'analyse

Cepha3DT®. D'après leurs résultats, les valeurs les plus influentes sur l'appréciation esthétique concernent le décalage sagittal des arcades et des bases. Ainsi, qu'il soit squelettique ou dentaire, plus le décalage est antérieur, plus il est influent (Zribi A, 2014). Il faut cependant noter que l'évaluation esthétique reste actuellement essentiellement bidimensionnelle pour des raisons de rationalisation du jugement esthétique.

Pour (Faure J M.-S. C.-J., 2008), la 3D apporte de nouvelles perspectives en matière d'analyse des compensations en cas de dysmorphie.

L'analyse du carrefour aéro-pharyngé est possible sur une téléradiographie de profil et permet l'analyse dans un but diagnostique de celles-ci, allant de ventilateurs buccaux à des patients présentant des apnées du sommeil. La céphalométrie 2D étudie depuis des décennies ce phénomène d'apnée du sommeil. L'apport des images 3D permet de mieux évaluer les sites d'obstructions. Le syndrome d'apnée obstructive du sommeil (SAOS) correspond à des interruptions répétées de la respiration supérieures à 10 secondes durant le sommeil du fait d'un collapsus des voies aériennes sus-glottiques.

En conclusion de cette partie, pour ce qui concerne la fiabilité des résultats, (Navarro Rde L, 2013) compare des tracés céphalométriques issus de logiciels sur des supports différents (clichés latéraux conventionnels et CBCT) avec ceux issus de tracés manuels. Les résultats démontrent que toutes les méthodes évaluées sont fiables et valides pour la recherche. Toutefois, la question se pose de savoir pourquoi faire subir une saisie 3D au patient pour en tirer un résultat similaire aux radiographies traditionnelles 2D. Pour (Farronato G, 2014) une analyse 3D permet d'obtenir des résultats plus précis et présente des avantages par rapport à la technique classique. Par exemple une véritable représentation des structures anatomiques : contrairement à celles qui sont faites sur les radiographies projectives, les mesures angulaires et linéaires détectées sur la 3D deviennent réelles.

### C. L'apport des données tridimensionnelles dans le diagnostic

L'apport des images 3D permet de définir une morphométrie biologique du patient, c'est-à-dire d'établir la forme et la dimension du massif maxillo-facial. Cela est traditionnellement réalisé en utilisant des mesures linéaires, des masses, des angles et des ratios permettant de réaliser des statistiques. Une méthode plus sophistiquée est basée sur des repères de morphométrie géométrique, dans laquelle les données peuvent être collectées sous la forme de dispositions spatiales des points de repère le long d'une structure. L'emploi en recherche et en clinique de l'imagerie 3D utilise largement les outils de superposition de la morphométrie géométrique, soit directement avec des logiciels de celle-ci (Morphologica®, Rapid Form®), soit en intégrant des modules analogues dans des logiciels d'orthodontie ou de chirurgie.

Ainsi, au fil des siècles, l'être humain a voulu étudier l'homme et ses « formes ». Depuis 1784, avec les recherches entreprises par Louis Jean Marie Daubenton, jusqu'à aujourd'hui où le développement du numérique et l'acquisition radiographique permettent de nouvelles études.

Actuellement, trois méthodes sont utilisées pour l'analyse de l'anatomie et les changements dus au traitement ODF. La première méthode, comme nous l'avons vu, s'inspire largement de méthodes de mesures céphalométrique 2D (méthode paramétrique 3D). Une deuxième méthode analyse les déplacements de structures en superposant les images 3D, et ces changements peuvent alors être représentés comme une carte de couleurs (caractérisation colorimétrique, images A et B de la *figure 22*). La troisième méthode se définit comme la superposition et la caractérisation plus précise des déplacements avec une information sur la direction et l'amplitude des mouvements (représentation sous forme de vecteurs et de cartes de couleurs, images C et D de la *figure 22*) (Kapila SD, 2015).

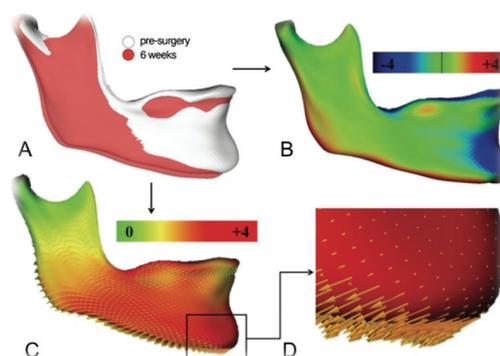


Figure 22 : Superposition 3D de la mandibule

## 1. Les études d'acquisition tridimensionnelle

En matière d'acquisition, les données diagnostiques 3D sont désormais disponibles par la modélisation, la visualisation des tissus mous et des différentes structures. En raison des progrès des CBCT, du développement des imageries 3D et des logiciels conçus pour gérer ces données, il est possible de tirer parti des informations tridimensionnelles dans un cadre clinique.

**Concernant la saisie 3D dento-squelettique**, le traitement informatique de l'image permet d'accéder à des fonctions nouvelles :

- L'étude de la variation de la densité optique et du contraste grâce à la numérisation des images permet de révéler le plus de détails possible. Plusieurs filtres de seuil peuvent être appliqués à la même image afin de faire la distinction entre les tissus de différentes densités. La transparence peut également être appliquée pour permettre la visualisation des tissus durs à travers les tissus mous, ce qui permet la visualisation de structures anatomiques spécifiques comme les articulations temporo mandibulaires
- L'inversion positive-négative met en évidence les fractures radiculaires par la visualisation inversée des structures radio-claires et radio-opaques
  - La réalisation de mesures précises
  - La réalisation de coupes tridimensionnelles
  - Le zoom et la rotation permettent l'agrandissement d'une zone déterminée pour repérer des éléments passés inaperçus, et de naviguer interactivement dans le volume facial
- La visualisation d'anomalies dentaires (éléments surnuméraires), d'anomalies de situation dentaire (inclusions dentaires) ou encore de fentes
- La possibilité d'engendrer des modèles virtuels 3D est un fondement de la dentisterie numérique. Le moteur de segmentation de ces images se développe mais ne constitue pas encore un standard dans la pratique quotidienne (Maret, 2010).

Ainsi, l'apport majeur pour le praticien réside dans des manipulations informatiques qui permettent d'éliminer des éléments anatomiques gênants comme la peau et les muscles pour avoir accès aux éléments majeurs qu'il souhaite étudier. L'analyse possible des structures est

disponible à l'aide de la superposition que nous allons détailler par la suite mais aucune donnée n'est recevable pour établir une analyse diagnostique.

Techniquement, un appareillage CBCT spécialisé pour l'imagerie maxillo-faciale convient pour évaluer les changements en 3D de la morphologie du visage. Les appareils les plus utilisés dans les recherches sont l'iCat® avec un champ de vision 16 de 22 cm, ou le NewTom 3G® avec un champ de vision de 30,5 cm.



*Figure 23 : Acquisition CBCT*

**Concernant la saisie de surface 3D**, d'un point de vue scientifique, c'est aux Etats-Unis que les données issues de l'utilisation d'appareils d'imagerie 3D numérique sont les plus étudiées. Une équipe de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA) a publié de nombreux travaux de recherche sur ce sujet.

Les chercheurs de l'équipe du docteur Moon Won ont axé leurs recherches sur le projet de cartographier la surface du massif maxillo-facial et de définir les limites de la 3D des tissus mous du visage en utilisant des images photographiques obtenues à partir du système d'imagerie faciale 3DMD®. Des photographies faciales 3D sont ainsi prises sur des patients et transférées vers le logiciel développé par leur soin pour traiter les données dans un format spécifique. Ils ont ainsi créé une sorte de moyenne en trois dimensions du visage humain définissant une analyse qualitative remarquable avec la définition d'un modèle de type « morphologie moyenne ». Plus précisément, cette analyse a abouti à l'établissement d'un protocole reconnu pour la cartographie de la surface de la face humaine en 3D.

L'application immédiate de cette moyenne permet d'obtenir des données normatives pour un groupe démographique spécifique. Les résultats de cette recherche suggèrent qu'il est possible de réaliser la moyenne de plusieurs images de visages à la topologie très variable afin d'enrichir les prochains logiciels de traitement orthodontique. Il s'agit d'une comparaison de populations différentes, qui est par exemple utile pour les recherches en anthropologie.

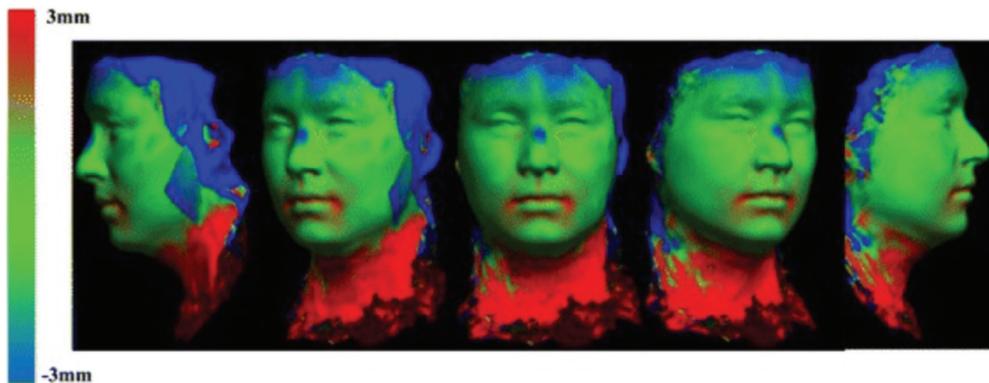


Figure 14 : Moyenne d'acquisitions de saisie de surface 3D

Il est ainsi possible de réaliser des superpositions entre un patient et le modèle moyen ainsi qu'une caractérisation de la pathologie via la transformation de la cartographie sphérique. Une coloration quantifie l'écart entre un sujet pathologique et le modèle de référence. Cela se révèle précieux dans les spécialités dentaires pour déterminer le traitement approprié en vue de la correction d'une déviation du visage par exemple, d'autant que l'acquisition de ces données ne pose aucun problème pour le patient et permet l'acquisition d'images illimitées reposant uniquement sur la capacité de stockage numérique (Nanda V, 2015) (Lestrel, 2015).

Plus précisément, le système 3dMDface (utilisé par Dr. Moon Won), est un système d'imagerie de surface qui capture 60 images 3D à haute résolution par seconde pendant plusieurs minutes. Son acquisition rapide d'images réduit les défauts causés par le mouvement au cours du processus d'acquisition, il est capable d'effectuer de nombreuses mesures. Cependant, comme avec toutes les techniques de mesure, les sources d'erreurs inhérentes peuvent affecter l'exactitude et la précision de l'analyse du visage (Aynechi N, 2011).

Comme nous l'avons montré, la modélisation des tissus mous du visage est une technologie récente qui permet d'exploiter de nouvelles données pour le diagnostic. C'est un sujet de recherche qui intéresse particulièrement les sociétés de logiciels orthodontiques.

## 2. La superposition tridimensionnelle

Avec le développement de la 3D sont nés des instruments permettant la comparaison de données tridimensionnelles. Pour l'ODF, il existe deux types de superpositions et celles-ci ont donné naissance à la notion de « recalage tridimensionnelle ».

Type 1, les superpositions conventionnelles, lorsque l'utilisateur privilégie une zone supposée stable ou « zone enregistrée » et qu'il visualise ainsi l'évolution (croissance, thérapeutique, vieillissement, *etc.*) des zones modifiées par rapport à cette référence stable. Il y a donc un choix opérateur-dépendant.

Type 2 la superposition Procuste, dans laquelle le logiciel corrige l'échelle, oriente les deux sujets en parallélisant les axes d'inertie et superpose au mieux l'ensemble de l'objet étudié affranchi de toute notion de repère ou de zone de superposition. Cette technique sépare les effets de taille des effets de forme et est non-opérateur dépendant (utilisée en recherche) (Penin, 2006).

La superposition avec une zone enregistrée supposée stable, mettra mieux en évidence la variation observée qu'une superposition Procuste sur l'ensemble. Le choix entre ces deux méthodes dépendra de :

- La nature du phénomène étudié. Si l'évolution est globale, par exemple un processus de croissance, la superposition Procuste sera l'arme privilégiée. Si l'évolution est bien localisée, par exemple une chirurgie d'avancement mandibulaire, une superposition sur « zone enregistrée » (dans ce cas, la branche montante postérieure à l'ostéotomie) retrouvera tout son intérêt.
- Du caractère isolable ou dissécable de la zone d'intérêt (dissection réelle ou virtuelle).
- De l'existence et de la répartition d'un diagramme de points caractéristiques ou des zones de superposition, sur le site stable (zone enregistrée) et sur le site supposé mobile.

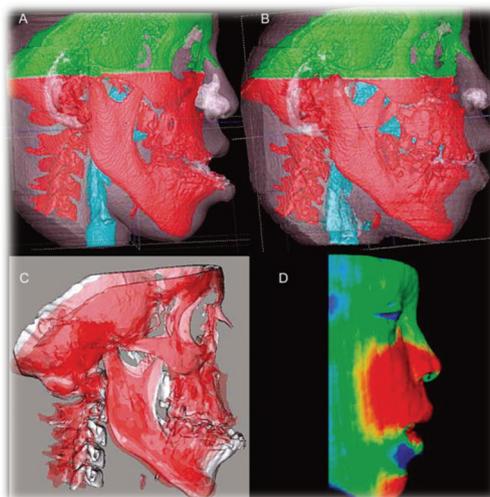
Avec une répartition des points caractéristiques inhomogènes, la superposition Procuste apparaît comme une superposition privilégiant la zone de densité maximale de ceux-ci, *pseudo-zone enregistrée*. L'évolution de l'analyse par superposition Procuste vers une superposition sur zone enregistrée, est souvent recherchée, il s'agit d'un « recalage ».

Le recalage tridimensionnel orthodontique consiste donc à superposer, à fin d'analyse, les données volumiques modélisant plusieurs images d'un espace bucco-dentaire d'une zone enregistrée. Les procédures de recalage de données 3D acquises par CBCT peuvent être effectuées avec différents logiciels tel qu'Imagine software®.

La technique de recalage la plus utilisée en odontologie est celle du recalage rigide. Il ne s'agit pas d'une modification de l'image, seuls des changements d'échelle, des rotations et des translations sont possibles en guise de transformations spatiales. De plus, il existe deux types de recalage des images 3D, une méthode se basant sur la sélection de points, de plans ou de surfaces repères et une méthode se basant sur une reconnaissance des niveaux de gris entre les voxels des deux acquisitions à recaler (saisie 3D complète de surface).

En exemple, concernant l'étude de l'évolution maxillo-faciale, divers auteurs utilisent la base du crâne ou plus précisément la partie antérieure de celle-ci (pour l'évaluation de la croissance), comme zone de superposition. Il s'agit d'une structure stable qui n'est pas altérée par la croissance et/ou le traitement. Ainsi, (Cevidanes L. S., 2009) définit un protocole de superposition :

Sur deux images basi-craniennes A et B, disposées dans le même espace virtuel, des repères homologues sont identifiés, le programme détermine alors la matrice de déplacement superposant A sur B. Un ajustement manuel est nécessaire. Les différences A/B peuvent être chiffrées dans le repère orthonormé défini par le diagramme des points repères. Les limites de la méthode restent celles d'un système axé sur la comparaison de deux individus.



*Figure 25 : A-Image avant traitement. B-Un an après traitement chirurgical. C-Visualisation des modifications squelettiques A (en blanc) et B (en rouge) superposées sur la base du crâne par semi-transparence. D-Quantification des modifications des tissus mous en utilisant une échelle colorimétrique*

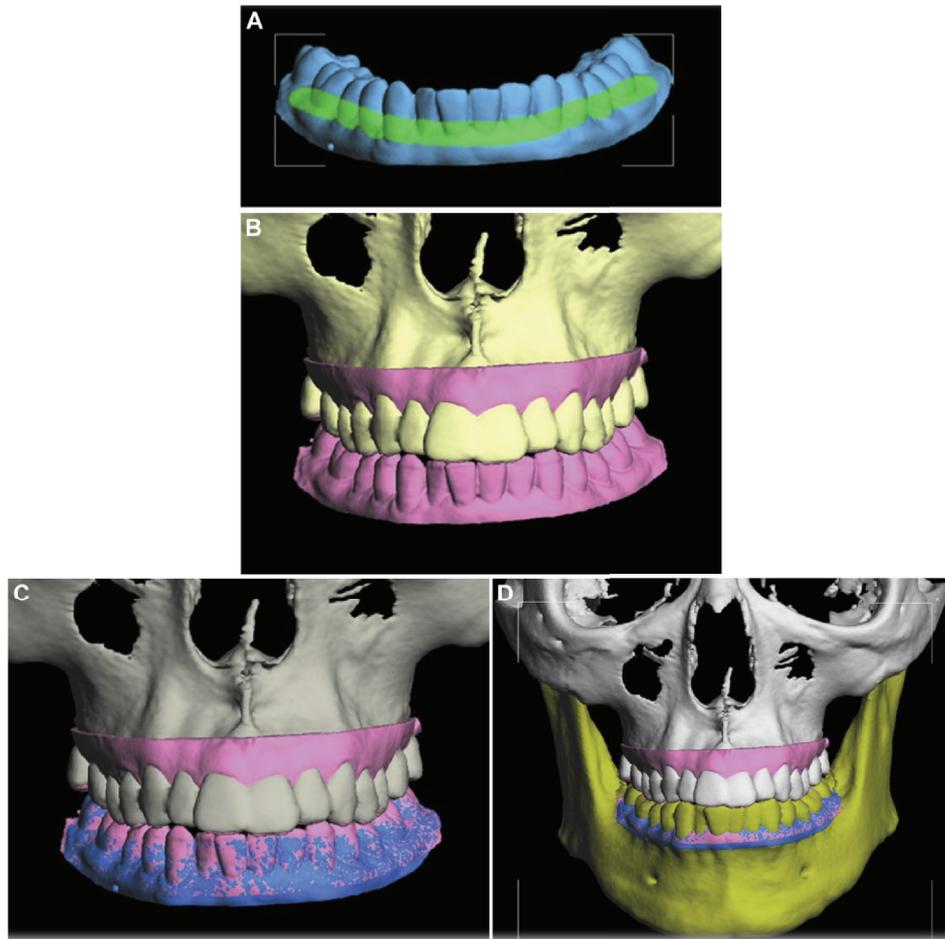
### 3. La fusion

Pour permettre un rendu idéal, une photographie 3D d'un patient peut être exportée vers un logiciel de traitement, avec la possibilité de créer facilement une carte de texture sur la surface du visage d'un document CBCT du massif facial avec en complément les images des modèles dentaires intégrées. Cette technique compense la résolution insuffisante et l'absence de couleurs pour la denture et l'occlusion, ainsi que pour la face et le sourire. Il s'agit d'une solution de saisie 3D intégrale d'un patient (Rangel FA, 2008).



Figure 26 : Logiciel ProFace® Planmeca®

Pour illustrer cette technologie, nous résumons ici l'article de (Yang WM, 2015) qui crée un modèle de qualité de l'architecture maxillo-faciale (obtenue par CBCT) en associant l'image maxillo-faciale à des modèles numériques des arcades dentaires. Actuellement, lors de l'acquisition CBCT, la région dentaire manque de précision et plusieurs méthodes ont été développées pour remplacer la dentition brumeuse avec des images 3D du modèle dentaire. Le protocole se définit ainsi : une image numérique du maxillaire, de la mandibule et de l'occlusion du patient est réalisée de manière précise, puis ces données sont superposées à celles issues de l'acquisition du massif facial dans son intégralité grâce à la superposition automatique des marqueurs de références palatins. Ce procédé de superposition fournit une grande précision pour le remplacement de la dentition en utilisant la technologie CBCT et est facile à utiliser pour une application clinique. Cette technique d'intégration est *conviviale* et automatique. Elle pourra ainsi être utilisée lors de simulations de chirurgie ou encore de créations de gouttières chirurgicales.



*Figure 27 : Superposition de l'image de modèle dentaire inférieur à la région dentaire inférieure de l'image CBCT du massif facial. A-Sélection du modèle dentaire inférieur (vert). B- Vue frontale du modèle en occlusion superposé à l'image CBCT. C-Superposition de l'image du modèle dentaire inférieur (bleu). D-Superposition avec l'image CBCT de la mandibule*

Sur ce sujet, de nouvelles méthodes se développent rapidement : (Waard O, 2016) enrichit la méthode par l'utilisation d'un CBCT associée à une acquisition supplémentaire de la morsure de cire et toujours en association de la capture intra-orale de la dentition.

#### 4. L'apport au niveau diagnostique

De manière naturelle, les données de ces méthodes d'analyse tridimensionnelle ne sont pas utilisées dans un but de diagnostic dans les cabinets. Mais d'une manière indirecte, les saisies 3D dento-squelettiques offrent des informations sur les éléments anatomiques de la face, du carrefour aéro-pharyngé et permettent de poser le diagnostic d'asymétries squelettiques ou bien encore d'autres dysmorphoses. Les saisies cutanéomuqueuses, elles, permettent d'avoir accès à des données qui permettent de poser un diagnostic esthétique. De plus, la possibilité de comparer un individu à un rendement moyen offre la possibilité de disposer d'un nouvel outil de diagnostic. La fusion quant à elle offre une connaissance complète de l'évolution des éléments superposés.

Les données 3D dento-squelettiques permettent d'analyser des éléments anatomiques tels que les morphologies osseuses, la présence d'images radioclares à l'apex des racines, la présence des éléments vasculaires et des éléments nerveux (nerf alvéolaire inférieur avant une chirurgie). L'équipement CBCT devient la norme dans les cabinets, mais nous devons noter qu'aucune conclusion diagnostique chiffrée n'existe et qu'il n'existe pas de superposition patient/référent disponible pour poser de tels diagnostics.

Ainsi, pour le syndrome d'apnée obstructive du sommeil (SAOS), les acquisitions numériques permettent d'analyser les voies respiratoires supérieures de manière plus détaillée que par images de céphalométrie. Grâce à (Grauer, 2010) nous pouvons dire que les images 3D permettent de mieux évaluer un site d'obstruction des voies respiratoires. De plus, d'après (Fuhrmann R, 1996), ce diagnostic est très important car il existe un lien statistiquement significatif entre le diagnostic d'apnée du sommeil et les malocclusions.

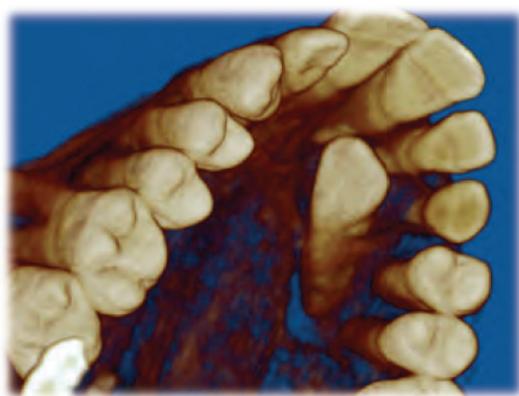


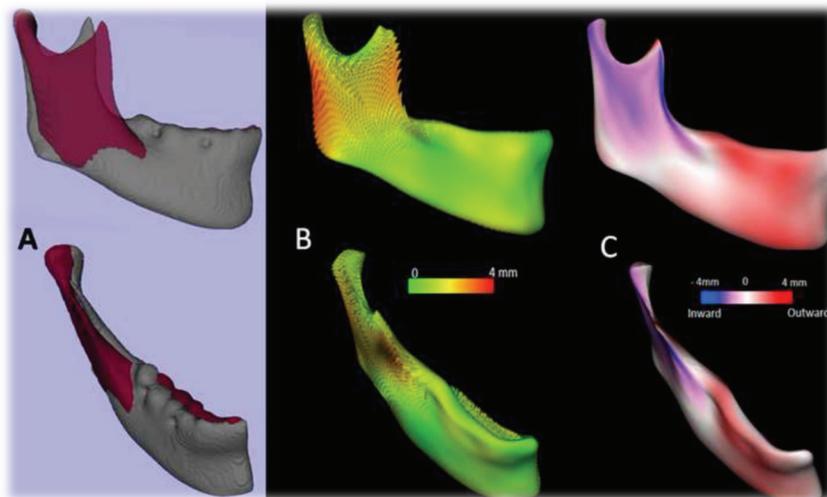
Figure 28 : Visualisation d'une canine incluse sur CBCT



Figure 29 : Appréciation du carrefour aéro-pharyngé sur CBCT

De même, le diagnostic d'asymétrie squelettique est facilité par l'apport des images et de la possibilité de visualisation tridimensionnelle de toutes les structures créant une anomalie de symétrie.

Pour illustrer cela, (Nur RB, 2016) évalue l'asymétrie faciale 3D en utilisant la tomographie à faisceau conique CBCT et étudie les tissus mous et durs des côtés droit et gauche du patient et les compare entre eux. Dans leur article, (Cevitanes L. A., 2011) utilise le recalage 3D pour préciser le diagnostic d'asymétries faciales et mesurer les différences entre les côtés droit et gauche du patient. En 2013, (Faure J O. A., 2013) étudie l'asymétrie par l'utilisation du recalage sur des points spécifiques.



*Figure 30 : Quantification de l'asymétrie mandibulaire pour un patient en utilisant la superposition 3D. A- Modèle original (gris) et superposition avec pour repère la base du crâne de l'hémi mandibule gauche ; B-Différences entre les deux hémimandibules représentées à l'aide de vecteurs ; C-Echelle colorimétrique quantifiant les différences : la branche gauche est plus large et le corpus gauche est plus étroit que le droit*

Pour ce qui concerne la dimension esthétique en cabinet, les images 3D permettent de juger finement le visage hors présence du patient. En recherche clinique, les images du patient sont utilisées pour identifier des valeurs de référence esthétiques qui peuvent être utilisées pour déterminer les objectifs d'un traitement orthodontique optimal, avec les méthodes de superpositions de saisie de surface 3D. Cependant, en matière d'esthétique, il faut rappeler que l'optimal a une dimension subjective : les critères esthétiques ne se réfèrent pas nécessairement à notre propre définition de la beauté (Sforza C, 2007).

De plus, il faut ajouter que la fusion permet d'obtenir des informations au niveau occlusal, au niveau cutané et au niveau de l'architecture squelettique et permet de comprendre leurs

relations. Par exemple, une superposition sur la base du crâne permettra d'apprécier les modifications cutanées et occlusales en relation avec les déplacements dentaires thérapeutiques orthodontiques et/ou les déplacements chirurgicaux.

Ainsi, les données 3D permettent de faciliter l'accès à de nombreux critères de décision et offrent un large éventail de choix de critères permettant de poser un diagnostic orthodontique (Bettega G, 2000). Le praticien choisit les éléments essentiels pour son étude (asymétries, esthétique, *etc.*) et obtient, grâce aux logiciels, les données correspondantes nécessaires pour sa pose de diagnostic.

### III. Les nouveaux apports des technologies numériques en matière de thérapeutique

Après l'utilisation de données pour la pose de son diagnostic et l'élaboration de son plan de traitement, le praticien choisit une thérapeutique et utilise les moyens qui s'offrent à lui pour une prise en charge adaptée. Les thérapeutiques ODF traditionnelles sont les actes de prévention et d'interception, la thérapeutique orthopédique, la thérapeutique orthodontique par appareils multi-bagues vestibulaires ou éventuellement la chirurgie maxillo-faciale.

L'orthodontie par appareils multi-attaches permet d'assurer un contrôle rigoureux des déplacements dentaires dans les trois dimensions de l'espace. Ainsi, l'attache et le fil forment un couple indissociable qui assure le déplacement de la dent et son contrôle. Selon les phases et les techniques, l'arc peut par son élasticité assurer le déplacement d'une dent ou d'un groupe de dents, ou guider le déplacement des dents.

En chirurgie orthognatique, le protocole thérapeutique traditionnel repose sur une préparation orthodontique pré-chirurgicale de décompensation dento-alvéolaire orthodontique et sur un bilan pré-chirurgical avec un set-up pour quantifier les déplacements chirurgicaux en fonction des résultats de la préparation orthodontique. Ensuite, les guides chirurgicaux sont réalisés puis la chirurgie est effectuée. S'en suit une étape post-chirurgicale essentielle ainsi qu'une finition orthodontique si besoin.

Pour résumer, le *numérique* fait évoluer l'éventail des moyens thérapeutiques disponibles pour le praticien avec des techniques issues du développement de la *conception et de la fabrication assistée par ordinateur* (CAO/FAO). Appliqué à l'ODF, ce domaine de l'informatique associe la modélisation et la visualisation, à la confection automatique d'appareils à l'aide de robots.

#### A. Pour les éléments dentaires

Il existe de nouvelles techniques liées à cette révolution numérique. Nous avons choisi de développer quelques-uns des outils disponibles dans l'arsenal thérapeutique des praticiens, ainsi, nous parlerons des aligneurs, des appareils de multi-attaches linguales et vestibulaires, et des gouttières chirurgicales.

## 1. Les aligneurs actifs

Le mouvement des dents sans l'utilisation de fils, de supports, ou encore de bagues a été décrit pour la première fois en 1945 par le docteur Kesling. Il s'agit de gouttières habituellement destinées à la contention qu'il utilise pour effectuer des mouvements dentaires mineurs. Il ira plus loin en projetant l'idée de réaliser une série de gouttières dans le but de réaliser des mouvements dentaires plus importants. En 1985, les mouvements dentaires mineurs ont également été obtenus avec une technique développée par Raintree Essix®, qui utilise des gouttières transparentes et y associe une réduction inter-proximale (Wong, 2002). Au fil des années, l'idée initiale a évolué jusqu'à ce que la technologie permette sa concrétisation par une mise en œuvre simplifiée.

Les aligneurs sont des appareils amovibles thermoformés, en polycarbonate transparent qui sont portés de manière séquentielle par le patient. Chaque appareil permet la réalisation d'un petit mouvement qui fait partie intégrante d'un ensemble de mouvements beaucoup plus vaste correspondant au traitement (Beers AC, 2003).

Pour illustrer l'alternative thérapeutique que sont les aligneurs, nous avons choisi de parler du système Invisalign® de la société Align Technology®, leader du marché. Ce système orthodontique, créé en 1999 et arrivé en France en 2001 utilise les technologies *CFAO* dans le but de fabriquer les appareils nécessaires.

Au cabinet dentaire, le protocole Invisalign® permet :

- La création d'un dossier patient et d'une procédure de soumission : le praticien crée un dossier dans lequel il détaillera les données relatives au patient, photographies et/ou radiographies.
- Un diagnostic complet, la réalisation d'une empreinte numérique ou en matériau polyvinyle siloxane du maxillaire et de la mandibule avec un porte-empreinte en plastique, ainsi qu'un enregistrement de l'occlusion en relation centrée.
- Le choix d'une option de niveau traitement, sachant qu'il en existe cinq. Invisalign full® se définit avec un large champ d'applications selon le niveau d'expérience du praticien, y compris les traitements globaux adaptés à des corrections antéro-postérieures de classe I, II et III. Le praticien répond aux questions concernant le plan de traitement du patient et réalise ainsi sa prescription basée sur des préférences cliniques.

- L'envoi pour analyse des empreintes, mordus, et formulaires à la société Align Technology®.
- L'application du plan de traitement sur l'arcade dentaire numérisée. La visualisation numérique est disponible sur l'ordinateur du praticien. Cette conception virtuelle du plan de traitement apparaît grâce au logiciel ClinCheck®.
- La validation par le praticien du projet thérapeutique présenté en 3D par la société Align Technology® avec la possibilité de modification de celui-ci par ses soins pour qu'il corresponde à ses attentes, la possibilité de visualisation du rendu escompté grâce au logiciel de prévisualisation IOSim®.
- La réception et les poses successives des gouttières, avec adjonction possible de taquets, accompagnées des explications spécifiques à cette technique.
- Le suivi thérapeutique régulier par la comparaison « en bouche vs situation prévue virtuelle » avec la possibilité d'interaction rapide avec les référents de la société Align Technology® en cas de difficulté.

À l'autre bout de la chaîne, dans le laboratoire Align Technology®, le protocole offre les services suivants :

- Les empreintes réalisées de manière traditionnelle sont scannées à l'aide de l'utilisation d'un scanner extra-oral.
- Après avoir réalisé un recalage des modèles, le technicien orthodontique virtuel Invisalign (VOT) crée un set-up virtuel sur lequel une gencive virtuelle est placée le long des collets pour servir de référence à la fabrication des aligneurs.
- Une fois la configuration finale réalisée, les mouvements dentaires sont visualisés de sorte qu'il n'y ait pas d'interférence en fin de réalisation. Le nombre d'étapes nécessaires dépend de la quantité et de la complexité du mouvement global.
- L'orthodontiste, dans son cabinet approuve le plan de traitement, ce qui lance la production des gouttières.
- Les gouttières sont rognées et gravées au laser avec les initiales du patient, et sont ensuite désinfectées, emballées et expédiées chez le praticien.

D'un point de vue technique, l'offre de la société s'appuie sur un procédé spécifique production/impression 3D.



*Figure 31 : Gouttières Invisalign® portées*

Les images numériques des arcades sont converties en modèles physiques en utilisant un processus appelé stéréolithographie, technique dite de prototypage rapide en fabrication additive : la fabrication des moules de chaque gouttière se fait par l'utilisation d'un laser solidifiant de la résine liquide. Ces modèles sont ensuite utilisés pour fabriquer les dispositifs d'alignement avec une machine de moulage sous pression Biostar® avec une précision de l'ordre de 50 microns (Wong, 2002).

À partir de 2009, la découpe et le polissage sont industrialisés créant un produit obtenu en totalité sans manipulation humaine ce qui permet à Align Technology® et Invisalign® de faire le premier appareil orthodontique par aligneur 100% digital augmentant considérablement la précision, la propreté et les possibilités de fabrication à grande échelle.

Le logiciel utilisé avec la technologie Invisalign® se nomme Clincheck®, set-up animé du plan de traitement permettant de vérifier la concordance entre le virtuel et le réel sous tous les angles. Il permet une visualisation 3D des étapes de traitement jusqu'au résultat final. Comme déjà dit, le praticien peut évidemment intervenir pour valider ou non la proposition. Le logiciel possède de nombreux outils. Les principaux permettent :

- La vérification de l'occlusion initiale
- L'analyse : calcul encombrement, observation des points de contact
- L'évaluation des déplacements prévus pour chaque dent pendant le traitement
- La vérification de la position finale
- La comparaison des différentes stratégies thérapeutiques
- La présentation du traitement au patient
- L'analyse de la quantité, de la localisation et du moment des meulages interproximaux éventuellement nécessaires.

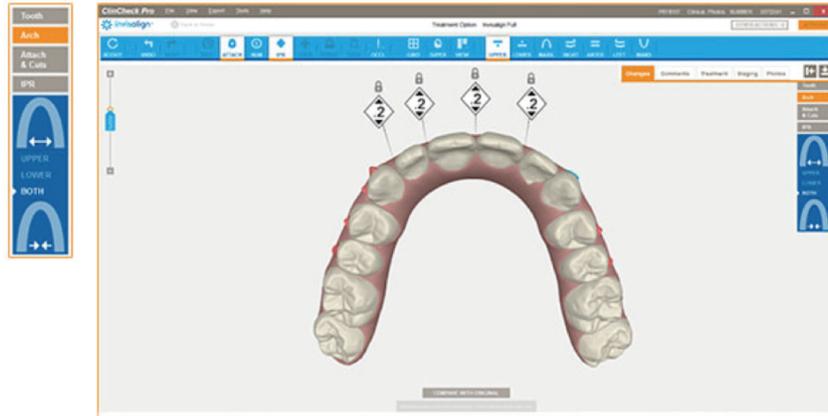


Figure 32 : Simulation d'expansion d'arcade dentaire sur ClinCheck®

Pour conclure, examinons les principaux points de vue qui permettent d'apprécier la technologie Invisalign® : esthétique (discrétion), confort, sécurité, hygiène, caractère amovible, coût.

La discrétion et la facilité d'adaptation de ces gouttières semblent être les avantages majeurs de cette technique. Les patients recherchent avant tout un moyen « esthétique » d'aligner les dents. Exactement ce que procure ce système qui est basé sur des gouttières pratiquement invisibles qui ne génèrent presque aucune gêne ou blessure (au maximum 2-3 jours) et ne perturbent pas l'élocution.

Du point de vue de l'hygiène, la dépose des gouttières lors du brossage doit permettre de conserver une hygiène dentaire parfaite durant la durée du traitement. Cela suppose que l'hygiène du patient doit être très rigoureuse, après chaque repas ou collation un nettoyage doit être effectué afin d'éviter toutes lésions carieuses ou coloration de la gouttière qui perdrait son atout majeur esthétique. Le facteur amovible semble être un avantage, mais est aussi en rapport avec l'efficacité du traitement. Celle-ci dépend, comme pour toute technique amovible, de la coopération du patient au bon port des gouttières. Dans ce contexte, pour les adolescents, Invisalign Teen® prévoit des témoins de bon port des gouttières réactifs à la salive ce qui permet le contrôle du port effectif.

La visualisation du résultat sur écran ainsi que l'évaluation du nombre de gouttières et donc de la durée du traitement est un atout pour le patient.

Le coût est actuellement conséquent et peut donc représenter un facteur de dissuasion, de plus, cette thérapeutique est limitée aux adolescents et adultes en dentition stable (Boileau, 2011).

Alors nous pouvons dire que le modèle dentaire proposé est incomplet. Les informations sur les racines pourraient être ajoutées en mesurant les propriétés de chaque racine, telle que la longueur et la largeur, et les utiliser pour compléter le modèle virtuel.

En définitive, avec à ce jour plus de quatre millions de personnes traitées dans le monde, la technologie Invisalign® semble avoir de beaux jours devant elle. Plus généralement, c'est probablement le processus de production de séquences de gouttières qui devrait se développer dans l'avenir avec l'apparition d'autres techniques et d'autres sociétés dans le but d'améliorer la thérapeutique, de tous les points de vue, pour le patient et pour le praticien.

## 2. Les gouttières chirurgicales numérisées

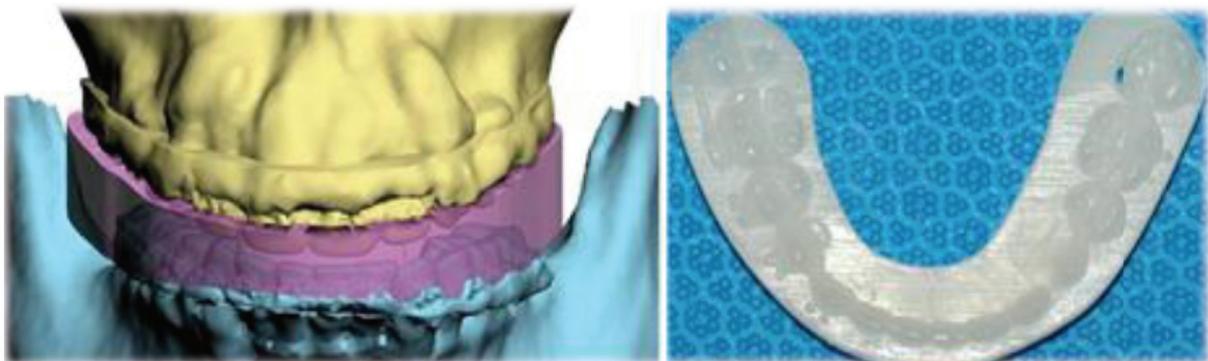
La chirurgie orthognatique a pour objectif de corriger les malformations et les grandes dysmorphoses maxillo-mandibulaires, qu'elles soient congénitales ou acquises. Elle vise à obtenir une occlusion dentaire, un sourire et un visage harmonieux ce qui a un impact esthétique et fonctionnel. Plusieurs types de chirurgie existent : l'ostéotomie de LeFort I, l'ostéotomie mandibulaire totale ou encore l'ostéotomie bi-maxillaire. Celles-ci sont toutes réalisées après une préparation orthodontique.

Les gouttières chirurgicales sont des guides chirurgicaux très utilisés au cours de la chirurgie. Ce sont des outils-clés disposant d'informations dans les trois sens de l'espace relatives aux mouvements des bases osseuses et de l'occlusion souhaitée lors de la réalisation de la chirurgie. Elles ont une bonne précision du positionnement antéro-postérieur mais possèdent peu de contrôle sur la dimension verticale. Ces gouttières peuvent être de type intermédiaire (pour repositionnement maxillo-mandibulaire) ou de type terminal (pour placement des arcades dans l'occlusion souhaitée). Les matériaux utilisés sont des résines auto-polymérisables, photo-polymérisables ou encore un silicone (polyvinyle siloxane).

Le protocole de création des gouttières chirurgicales traditionnelles comprend une prise d'empreinte maxillaire et une prise d'empreinte mandibulaire à l'alginate de préférence une semaine avant l'intervention et un enregistrement de l'occlusion intermaxillaire en relation centrée. S'en suit une simulation chirurgicale manuelle à l'aide de modèles en plâtres montés sur split-cast et sur articulateur. Les gouttières sont ensuite fabriquées directement sur la simulation souhaitée en laboratoire pour correspondre à cette situation (Dahan S, 2011).

Grâce aux nouvelles technologies informatiques et industrielles dont nous avons déjà parlé dans ce mémoire (empreintes optiques, images 3D) un nouveau protocole de chirurgie maxillo-faciale est désormais disponible. Il repose sur les étapes suivantes (Bachelet J.T, 2016) :

- Empreintes numériques ou scénarisation d'empreintes ou de modèles classiques pour obtenir une acquisition 3D des surfaces occlusales du patient
- Photographie du visage afin de tenir compte des tissus mous du patient
- Acquisition 3D du complexe maxillo-mandibulaire en relation centrée et sans intercuspitation maximale, afin de permettre la segmentation des arcades maxillaire et mandibulaire
- Simulation chirurgicale virtuelle informatisée à l'aide de logiciels spécifiques et recalage de l'enregistrement occlusal sur le volume du massif facial du patient afin d'obtenir une définition maximale de l'occlusion dentaire. Et utilisation d'un articulateur virtuel repositionnant les surfaces occlusales bi-maxillaires en articulé de classe I dentaire après segmentation des arcades
- Conception assistée par ordinateur de la gouttière avec la création d'une gouttière virtuelle reproduisant la position relative corrigée des arcades maxillaire et mandibulaire
- Fabrication des gouttières par impression 3D, en utilisant un matériau biocompatible de type PGA (Poly Glycolic Acid)
- Utilisation de la gouttière lors de la chirurgie.



*Figure 33 : Impression 3D de gouttières chirurgicales numériques*

Techniquement, la fabrication des gouttières est réalisée par impression 3D en superposant des couches de matériau. Cette fabrication est donc d'une très grande précision. En revanche, la durée de réalisation est actuellement relativement longue : il faut compter 2 minutes et 30 secondes en moyenne pour l'impression d'une couche et 1 minute de séchage entre chaque couche ce qui revient à une durée de 2 à 4 heures environ par gouttière. Cet inconvénient se réduit si l'imprimante 3D permet la création de plusieurs gouttières simultanément.

Du point de vue logiciel, Dolphin Imaging® ou encore NemoCeph FAB 3D® permettent la réalisation de gouttières de positionnement reproduisant le plan virtuel basé sur les données de l'occlusion saisies de manière informatique et leur utilisation au sein du bloc opératoire après leur fabrication. Ces logiciels contiennent divers outils permettant de sélectionner la largeur, l'épaisseur et d'autres paramètres de l'attelle en fonction des plans de traitement. Tous les fichiers de données d'attelle sont générés au format .stl standard, pour l'impression physique 3D au laboratoire ou directement au cabinet.

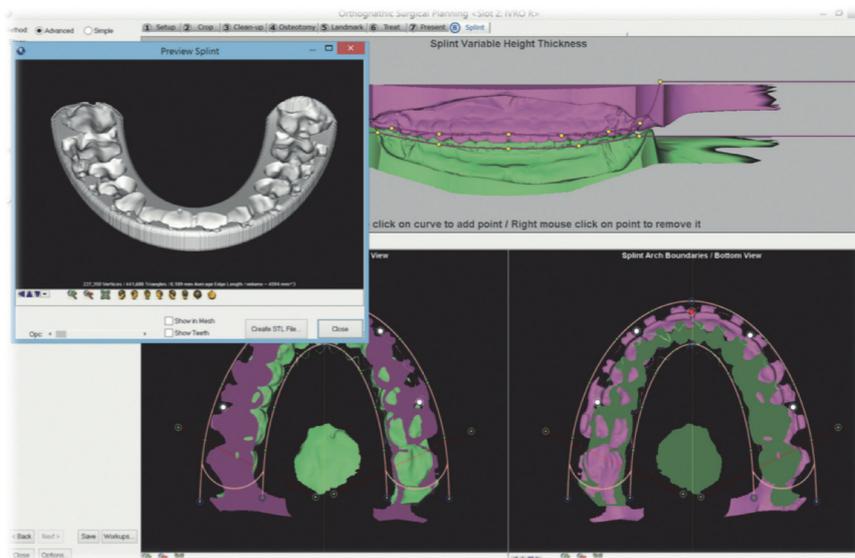


Figure 34 : Logiciel CFAO de gouttières chirurgicales via Dolphin Imaging®

Dans l'article suivant, (Adolphs N, 2014) sont étudiés deux types de gouttières occlusales lors de chirurgies orthognatiques : une gouttière fabriquée de façon traditionnelle au laboratoire, et une deuxième gouttière conçue via l'utilisation de RapidSplint®, un logiciel de conception et fabrication. Pendant les 50 opérations chirurgicales de l'étude, les deux types de gouttières ont été insérés après mobilisation des arcades dentaires, puis comparés en ce qui

concerne leur utilité clinique en fonction de l'ajustement occlusal obtenu. Par cette étude, il a été démontré que des gouttières produites par la technologie assistée par ordinateur peuvent être cliniquement utilisables pour la chirurgie orthognatique.

A la suite, (Zinser M, 2015) cherche à définir un protocole clinique innovant utilisant des gouttières chirurgicales obtenues par CFAO. Les patients observés ont subi des ostéotomies bi-maxillaires et, si nécessaire, une génioplastie supplémentaire. Les gouttières traditionnelles et celles produites numériquement ont été évaluées en appliquant 13 paramètres de comparaison. Il ressort que les gouttières obtenues par CFAO fournissent une approche fiable, innovante et précise pour le transfert de la planification orthognatique et semblent plus précises que les gouttières obtenues de manière traditionnelle.

Les avantages de la technique virtuelle résident dans la non utilisation de plâtre, la possibilité pour le praticien de prendre la main sur la confection de la gouttière via les set-up chirurgicaux, et la possibilité d'un travail en collaboration (prothésiste, dentiste) au travers du partage de fichiers.

Les inconvénients résident dans la difficulté de définition d'une occlusion chirurgicale virtuelle satisfaisante et dans la durée de fabrication de ces gouttières. On peut aussi ajouter le besoin d'une excellente connaissance des logiciels employés pour respecter strictement les étapes de réalisation en fournissant les données nécessaires.

L'usage du numérique ne se limite pas à la création de gouttières, il existe aussi la fabrication informatisée de dispositifs sur mesure tels que les guides de coupe, de pré-forages ou encore les plaques d'ostéosynthèses. Par la suite nous évoquerons son apport pour des actes chirurgicaux dento-faciaux.

### 3. L'orthodontie linguale et l'orthodontie vestibulaire numérique

Le concept **d'appareillage orthodontique lingual** est né en 1975 aux Etats-Unis et au Japon. Kurz et Fujita mettent au point et publient cette technique innovante qui consiste essentiellement à disposer les attaches de l'appareil en position linguale. A cette époque, elles sont positionnées à la main sur des set-up physiques afin de garantir leurs bonnes positions et ne sont que des attaches vestibulaires mises en position linguale. La technique multi-attaches étant située sur la face linguale et palatine des dents, s'avère alors totalement esthétique. Elle

est réservée à l'adulte en première intention en raison de la difficulté de mise en œuvre et du coût.

En 1989, le numérique se mêle à cette technique via la CAO en produisant le dessin des arcs (logiciel DALI® pour dessin d'arc lingual informatisé) et en 1998 les arcs sont produits par robotique. Puis à partir de 2003, les attaches sont dessinées et produites par l'ordinateur (Baron P, 2014). C'est aussi la période où l'orthodontie linguale s'est considérablement développée en France en raison de la démocratisation des traitements personnalisés chez l'adulte et l'adolescent.

De nos jours, la fiabilité du collage et la reproductibilité des techniques linguales disponibles permettent d'atteindre des objectifs thérapeutiques élevés (Pauls, 2010) (Barthelemi S, 2014). De nombreux systèmes existent, (Insignia®, Suresmile®, Incognito®, *etc.*). En 2001, Wiechmann et le laboratoire Top Service® mettent au point une attache individualisée pour chaque dent, augmentant ainsi sa précision. C'est la technique Incognito® de la société 3M® dont nous parlerons ici.

Au cabinet dentaire, le protocole Incognito® permet :

- Le diagnostic complet, la réalisation d'une empreinte numérique ou en silicone par une technique de double mélange du maxillaire et de la mandibule, ainsi que l'enregistrement de l'occlusion
- La prescription de manière numérique du praticien qui décrit ses objectifs de traitement et renseigne les informations obligatoires et optionnelles avec visualisation et valide le plan de traitement à l'aide d'un logiciel spécifique
- La production des empreintes, du mordue et des formulaires qui sont expédiés à la société et analysés par les équipes d'ingénieurs
- La validation du projet thérapeutique soit par l'acceptation du plan de traitement virtuel 3D, soit par l'acceptation d'un set-up physique
- L'installation par collage en technique indirecte et l'activation des attaches et des arcs livrés
- Le suivi régulier.

Dans le laboratoire de la société 3M®, le protocole rend les services suivants :

- Un set-up informatique est réalisé à partir des modèles et de la prescription du praticien. Le technicien dessine alors sur ordinateur chaque base linguale et palatine individuellement en y ajoutant les gorges de façon à accueillir passivement les arcs, les tiges de coulées virtuelles étant aussi représentées
- Les attaches et les arcs sont fabriqués sur mesure grâce à une assistance informatique (*cf.* ci-dessous)
- L'ensemble fabriqué est positionné sur un modèle en plâtre puis la totalité des attaches est emprisonnée dans une gouttière en silicone ou dans une double gouttière thermoformée transparente
- Tout ce matériel est emballé et envoyé au praticien après désinfection.

La fabrication des multi-attaches linguales de type Incognito® est basée sur la production en cire des attaches virtuelles par l'utilisation d'une machine-outil de prototypage rapide. Les attaches finales en alliage d'or sont ainsi produites par le procédé de cire perdue traditionnelle. Ces bases sont ensuite sablées, silanisées puis préencollées. En ce qui concerne les arcs, un robot de pliage commandé par ordinateur, se charge avec précision de la fabrication à partir de la situation tridimensionnelle de chaque gorge. Notons que l'or est utilisé pour les attaches afin d'obtenir des gorges plus précises, gorges qui sont toutes vérifiées par une jauge de haute précision permettant un résultat global de très haute qualité. Les gouttières de transfert sont aussi fabriquées avec un dispositif digital Incognito Clear Precision Tray®.

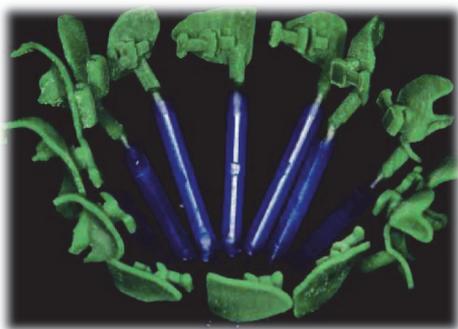


Figure 35 : Attaches en cire sur tige de coulée

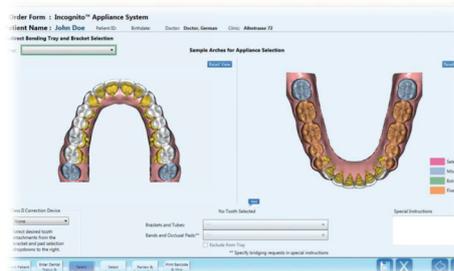


Figure 36 : Attaches et arc en place

Du point de vue informatique, le système Incognito®, conçu à partir de 2001 et diffusé dès 2004, utilise le logiciel Unitek® Treatment Management Portal® dont les spécificités principales sont (3M) :

- L'obligation de respecter un questionnaire précis fixant les paramètres de la thérapeutique, tels que l'alignement des lignes médianes, le choix des relations d'occlusion, la volonté de réduction inter-proximal, la forme ou la largeur des arcades ou encore le nivellement ou le recouvrement incisif.
- Le choix des types d'attaches, d'arcs et de la gouttière de transfert.

Figure 37 : Choix des attaches



- La visualisation interactive de la prescription sous forme d'un set-up modifiable, avec la mise à disposition de nombreuses vérifications (alignement, recouvrement, etc.) par le logiciel de configuration numérique Set Up Lab®.
- L'utilisation de la superposition des modèles pour vérifier les mouvements réalisés entre la situation initiale et le set-up virtuel.



Figure 38 : Superposition de modèles

Ainsi, le système Incognito® dispose de nombreux avantages reconnus :

- L'encombrement minimal grâce à la faible épaisseur de matériaux utilisés (or et colle)
- La grande possibilité de choix de prescription pour le praticien (paramétrage)
- La faible distance gorge/dent qui améliore le contrôle du torque et diminue les effets parasites
- La fabrication sur mesure qui permet une adaptation parfaite des attaches à la face linguale et palatine
- La discrétion du dispositif qui favorise l'esthétique.

Mais il n'évite pas les inconvénients rapportés par la littérature pour ce genre de système :

- Pour les patients, irritations linguales, troubles phonatoires, difficultés d'hygiène, modifications masticatoires avec des gênes alimentaires et coût élevé.
- Pour le praticien, nécessité de l'apprentissage de la technique spécifique relativement complexe et obligation d'un niveau de concentration élevé et constant avec un temps de travail au fauteuil augmenté.

« Tous les cas qui peuvent être traités en orthodontie vestibulaire peuvent être traités en orthodontie linguale », tel était le point de vue théorique du docteur Toshiaki Hiro en 2008 (Hiro, 2008). Désormais, grâce à des systèmes tels que celui que nous venons de décrire, l'affirmation devient une réalité.

Le concept d'**appareillage orthodontique vestibulaire numérique** est particulièrement mis en œuvre par le système Insignia® du laboratoire Ormco®. Insignia® est une plateforme numérique qui permet de planifier, de coordonner et de concevoir un traitement orthodontique à partir d'attaches réalisées sur mesure en utilisant les protocoles vus précédemment.

Première étape : la dématérialisation et la planification. Après la création d'un modèle numérique de la denture du patient à partir d'une empreinte en silicone ou d'une image numérique obtenue par scanner, le logiciel Approver® planifie le traitement et propose la visualisation des résultats finaux. Les techniciens du laboratoire InsigniaSmileDesign® et l'orthodontiste utilisent ce modèle numérique pour déterminer la position idéale des attaches permettant d'effectuer les mouvements dentaires désirés.

Deuxième étape : la société Ormco® fabrique, sur mesure, les attaches, les arcs et les jauges pour le patient. La fabrication de ces composants se fait à l'aide d'une technologie CFAO qui garantit une grande précision des mouvements dentaires.

Dernière étape : le praticien réalise le collage des attaches sur les dents du patient, en utilisant les jauges de placement en silicone transparent, aux positions proposées par le logiciel Insignia® et acceptées par le praticien.

Insignia® est à l'heure actuelle un exemple complet des apports du numérique : un système informatisé qui combine la planification du traitement numérique avec des composants spécialement conçus et adaptés à l'anatomie dentaire, sous la responsabilité du praticien.



Figure 39 : Insignia®

## B. Pour les moyens thérapeutiques et l'évaluation

Nous avons décrit plus tôt dans ce mémoire les nouveaux apports du numérique dans l'aide au diagnostic, voyons à présent leurs apports dans l'évaluation et la thérapeutique.

### 1. Les techniques en orthodontie

La thérapeutique des aligneurs actifs est basée sur des mouvements limités spécifiques. Sa biomécanique repose sur le fait que les forces délivrées aux dents sont produites par le retour à la position neutre de la gouttière initialement introduite en force sur celles-ci.

La quantité de déplacement est située selon les fabricants entre 0,25 mm et 1 mm par jeu de gouttières et pour cela elles doivent être portées durant 15 jours et ce durant 22 heures par jour. Les mouvements dépendent aussi de la composition et des propriétés intrinsèques des gouttières. Ainsi, il a été montré que la dureté *Vickers* des gouttières pouvait augmenter en milieu oral. Align Technology® a introduit avec la version G4 d'Invisalign® un nouveau polymère censé délivrer une force plus constante sans décroissance d'intensité avec le temps, avoir une meilleure élasticité et permettre une insertion et une désinsertion plus facile des aligneurs. Il s'agit du matériau SmartTrack qui applique des forces modérées et plus constantes (Baron P, 2014). D'après (Vardimon AD, 2010), les contraintes développées à la surface des gouttières sont maximales le premier jour de port, puis diminuent le deuxième jour et se stabilisent dans une phase de plateau jusqu'au 15<sup>ème</sup> jour. Les mouvements prévus se produisent donc dans les premières 24 heures.

Les forces exercées sont principalement localisées au niveau occlusal et, contrairement aux traitements multi-attaches classiques, la gouttière transmet, dès le début de son utilisation, les informations « des trois ordres ». Elles bénéficient aussi d'un avantage, ces gouttières permettent de supprimer l'influence de l'environnement musculaire et des contacts occlusaux.

Align Technology® définit des intervalles de valeurs selon les catégories de mouvements dentaires voulant être réalisés. Ainsi, égression et ingression sont limitées à 1mm pour le secteur postérieur, et peuvent aller jusqu'à 3mm en secteur antérieur. Les mouvements radiculaires se limitent à 4mm et la moyenne des rotations sur l'ensemble des dents est de 30°. Ces mouvements sont assurés par l'adjonction d'artifices, reliefs améliorant l'effet de pression au collet (crêtes permettant des mouvements de torque), des taquets avec des

géométries spécifiques selon les mouvements à contrôler (égression, rotation, version), des options de découpe permettant d'attacher des élastiques ainsi que des rampes d'occlusion de précision pour une correction des supraclusions. Par exemple, les attaches ovales sont indiquées pour les égressions dentaires lorsqu'elles sont placées en position horizontale et pour la rétention de la gouttière lorsqu'elles sont placées en position verticale sur les premières prémolaires (dimension : 3mm de hauteur, 2mm de largeur, 0,75mm d'épaisseur).

De nouveaux attachements ont vu le jour avec InvisalignG4® qui améliorent le contrôle et la précision des déplacements.

Cette technique est indiquée pour le traitement « d'encombrements légers à moyens et pour la correction d'anomalies transversales ou sagittales ». Son efficacité repose sur la bonne connaissance des limites de cette thérapeutique et l'expérience du praticien la mettant en place. Les limites des traitements sont connues : cas d'extractions, mésialisation des molaires, rotations sévères et corrections du sens vertical et transversal sévères. Il a été démontré que ces traitements orthodontiques par gouttières sont moins efficaces et nécessitent le recours aux techniques traditionnelles pour les cas complexes. De plus, la récurrence semble plus importante que lors de l'utilisation d'appareils multi-attaches (Kuncio D, 2007). D'après (Djeu G, 2005) presque 80 % des cas traités sélectionnés dans une étude seraient refusés à la certification de l'American Board of Orthodontics contre 52 % des cas traités en orthodontie conventionnelle. Mais depuis 2014, avec l'apparition d'InvisalignG5® puis d'InvisalignG6® forces, moments générés et techniques sont en constant perfectionnement (Simon M, 2014).

Les points positifs de cette technique que nous avons évoqués dans ce mémoire qui sont par exemple, l'aspect esthétique, l'absence de gênes et de douleurs semblent prendre le dessus dans le choix de la technique. Il faut donc compter sur une amélioration de la technicité et de sa reproductibilité dans les années à venir pour que le choix de traitement par aligneurs devienne un standard.

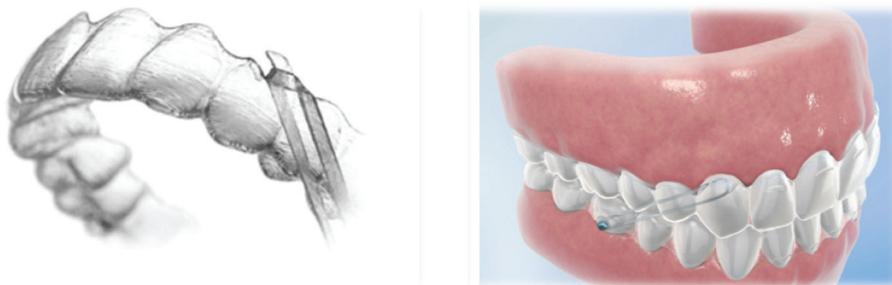


Figure 40 : Crochets, taquets Invisalign®

De son côté, l'orthodontie vestibulaire est basée sur une biomécanique traditionnelle répondant aux trois ordres de la biomécanique orthodontique. Cette technicité est adaptée aux appareils multi-attaches linguales.

La technique linguale a bénéficié des apports de la CFAO dès 2001 avec la technique introduite par Wiechmann comme nous l'avons vu. D'autres systèmes similaires ont vu le jour depuis avec des variantes concernant le mode de fabrication, le matériau, le type d'informations en entrée et en sortie du processus de fabrication.

La fabrication numérique se réalise ainsi. Le technicien à l'aide d'un logiciel dessine les bases des attaches pour que celles-ci correspondent au maximum à l'anatomie de la dent (0,3 à 0,5 mm d'épaisseur), puis le corps de l'attache est choisi en fonction des mouvements dentaires à opérer et du type de malocclusion à corriger. Après fusion de ces différents constituants, le positionnement numérique du corps sur sa base se fait automatiquement selon un plan horizontal préalablement choisi sur le set-up numérique, plan passant par toutes les gorges. La hauteur, le torque et l'angulation sont aussi préétablis informatiquement. Les arcs sont ensuite créés et un robot imprime les informations de premier, deuxième ou troisième ordre. Le principe de fabrication d'attaches individualisées garantit une relation arc/gorge optimale permettant d'incorporer des informations d'hypercorrections en fonction des impératifs thérapeutiques.

Les indications du traitement lingual spécifiques à cette technique sont une hypoplasie de l'émail, un état gingival altéré avec une gencive inflammatoire hyperplasique, une demande esthétique, le refus psychologique d'appareillage vestibulaire. Les limites de cette technique sont en rapport avec l'hygiène car les bases sont polies afin d'éviter au maximum l'accrochage de la plaque dentaire mais leur situation linguale augmente le risque de dépôt et un recouvrement important.

Pour conclure cette partie, évoquons (Sifakakis I P. N., 2013) et (Sifakakis I P. N., 2013) qui analysent l'effet des forces générées par des appareils linguaux (auto-ligaturant ou système Incognito®) et vestibulaires utilisés avec des arcs et des ligatures similaires. Les forces de torque les plus basses sont observées pour des attaches linguales auto-ligaturantes puis des attaches conventionnelles vestibulaires. Les attaches linguales Incognito® produisent les forces de torque les plus élevées. En ce qui concerne l'étude des forces et des moments générés lors du déplacement sagittal d'une dent (incisive latérale droite), il en ressort que celles-ci varient de 1,62, 1,27 et 1,81 N pour les forces et de 2,01, 1,45 et 2,19 N mm

concernant les moments pour la technique linguale auto-ligaturant, la technique vestibulaire classique, et la technique Incognito®. Ainsi, les forces produites sont différentes entre les trois types d'attaches, alors que les moments générés diffèrent uniquement entre les techniques conventionnelles et linguales.

## 2. Les techniques en chirurgie maxillo-faciale

Comme dans tous les secteurs de la chirurgie, le numérique offre de nouvelles perspectives en chirurgie maxillo-faciale. Nous pouvons évoquer deux secteurs : la planification de la chirurgie envisagée (prévisualisation, modélisation du geste chirurgical et chirurgie guidée) et une nouvelle technique chirurgicale.

**Du point de vue de la planification**, le geste chirurgical peut être désormais simulé en amont de manière virtuelle sur le massif facial numérique du patient et son impact sur les tissus mous du visage peut ainsi être apprécié.

Plus précisément, les logiciels de planification permettent :

- L'analyse en trois dimensions des voies aériennes avant et après simulation du geste chirurgical
- La mise en évidence et le marquage des éléments anatomiques (nerf mentonnier, artère palatine descendante)
- La segmentation des différentes parties (sinus, voies aériennes maxillaires, mandibules, extractions virtuelles)
- La conception des guides de découpes osseuses pour les ostéotomies maxillo-faciales
- La simulation des ostéotomies des bases osseuses avec guide de coupe et pré-forage indiqués
- L'intégration des photos du visage du patient pour une simulation de l'enveloppe faciale avec le rendu esthétique des modifications après la chirurgie
- La réalisation d'un set-up chirurgical
- La conception des mini-plaques de contention pour la chirurgie, préfabriquées selon l'anatomie du patient et l'importance du déplacement.

Par exemple, l'article, (Cevidane LH, 2010) montre l'intérêt de disposer d'un logiciel tel que CMFApp® (en cours de développement à l'Institut Maurice Müller (MEM) en Suisse) pour maîtriser la mise au point du geste chirurgical. En effet, le maillage résultant d'un segment osseux est difficile car l'anatomie du massif facial est particulièrement complexe avec des régions où l'os est très fin, tel que le plancher de l'orbite, ce qui crée des discontinuités dans le maillage, et des structures internes comme le nerf mandibulaire qui doivent être pris en compte dans le modèle.

Dans ce logiciel CMFApp®, les ostéotomies sont simulées par des combinaisons de coupes planes dans le modèle squelettique. Cette étape sert de planification des coupes anatomiques avant l'intervention chirurgicale. Elle permet aussi la planification de la position et de la taille des vis et des plaques de fixation. Toute modification d'une position d'un point de repère sur le volume maxillo-facial est immédiatement répercutée sur les mesures céphalométriques 3D ce qui guide la quantification et l'appréciation (fonctionnelle, musculaire, esthétique, *etc.*) des changements à réaliser.

Pour illustrer cela, utilisons des iconographies commentées du logiciel SimPlant OMS® de Materialise® sur lesquelles nous pouvons apprécier une simulation de rendu chirurgical.

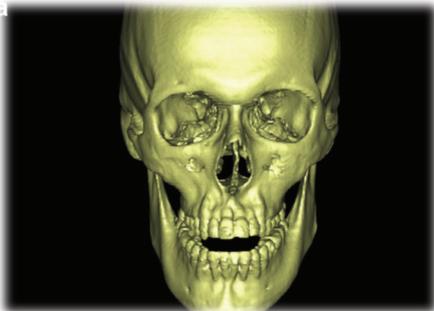


Figure 41 : Acquisition 3D

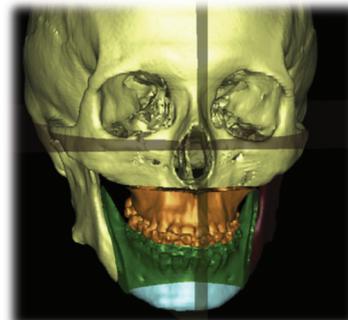


Figure 42 : Simulation 3D montrant les lignes d'ostéotomies

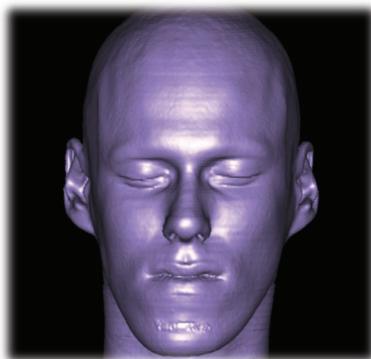


Figure 43 : Images 3D des tissus mous pré-op

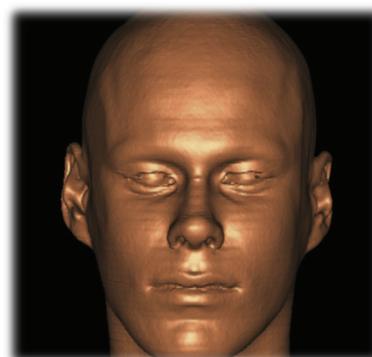


Figure 44 : Simulation 3D des résultats prévus sur les tissus mous après chirurgie

En matière de nouveauté au niveau de la planification, la chirurgie guidée, née en neurochirurgie pour permettre d'atteindre des zones spécifiques dans le cerveau, est aussi en plein essor en ODF.

Dans ce domaine, la simulation par ordinateur a le potentiel d'accroître la prévisibilité dans la salle d'opération (Tucker S, 2010). Le guidage est l'aboutissement de l'application du numérique : l'assistance - le guidage - consiste à proposer au praticien, grâce aux techniques d'imagerie 3D, d'ostéotomie et de repositionnement virtuel, la série d'actes à effectuer pour parvenir aux résultats définis virtuellement.

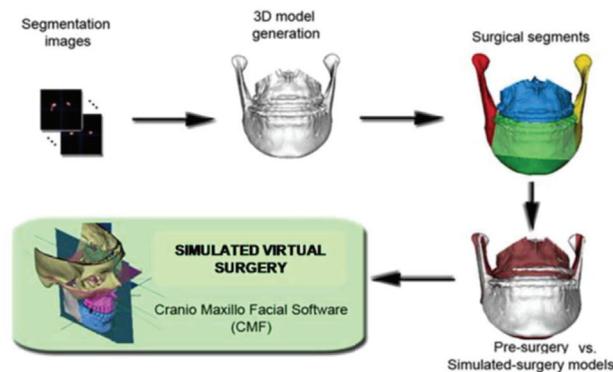


Figure 45 : Protocole d'analyse d'images 3D utilisé pour la simulation chirurgicale virtuelle

Dans ce schéma, une méthode pour transférer la planification virtuelle tridimensionnelle individualisée du patient directement dans la salle d'opération a été proposée par l'étude de (Mazzoni S, 2010) ainsi que celle de (Cevidanés LH, 2010) . Elle repose sur la superposition de l'instrument virtuel sur les données d'imageries tridimensionnelles et montre que la navigation guidée serait une procédure utile lors de la chirurgie orthognatique pour faciliter l'obtention du résultat prévu et améliorer la reproductibilité de la planification chirurgicale préopératoire virtuelle. Un exemple complet de chirurgie guidée de classe II est donné dans (Sadiq Z, 2012).

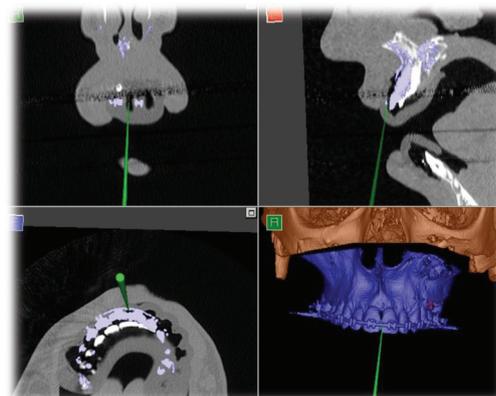


Figure 46 : Chirurgie guidée

**Du point de vue chirurgical** grâce au numérique, de nouveaux modes opératoires lors de chirurgies du massif facial voient le jour.

Un exemple significatif concerne l'ostéotomie du menton. La technique d'Albino Triaca nommée *ching wing* développée dans les années 2010 est une chirurgie traitant les asymétries faciales ainsi que les classes III chirurgicales (par exemple). Lors d'une telle chirurgie, le plan occlusal ainsi que les os mandibulaires sont corrigés et il est possible de traiter indépendamment le côté droit et gauche du patient. Cette thérapeutique est donc axée sur la correction du plan mandibulaire. Elle peut, abaisser un angle mandibulaire, corriger la hauteur de la branche horizontale et permet donc de corriger des compensations de hauteur alvéolaires excessives.

Pour les asymétries, la technique est basée sur un repositionnement des fragments osseux avec une correction de l'angle goniale, acteur important de la symétrie du visage. Dans cette technique, le fractionnement sur la ligne médiane permet le positionnement du segment de coupe plus latéralement et corrige le manque de largeur de l'angle. Avant la réalisation de l'ostéotomie du menton, il est nécessaire d'identifier la position du canal alvéolaire inférieur méticuleusement sur image 3D. Il semble particulièrement important que le segment de coupe d'os après cette opération bénéficie de nouveau d'une vascularisation suffisante (Triaca A, 2010) (*fig.47*).



*Figure 47 : Ostéotomie de chin wing*

Un exemple significatif de chirurgie de classe III sur un patient de type hyperdivergent est décrit dans l'article de (Hammoudeh JA, 2015) avec une ostéotomie LeFort I classique et un avancement maxillaire augmenté d'une rotation antihoraire et d'un recul par ostéotomie de *wing modifiée*. Ceci est un moyen simple et efficace de réduire le défaut sagittal de la mandibule, de corriger son hyper-divergence, et d'atteindre la compétence labiale avec un contour labial bien défini et une anatomie harmonieuse de l'angle. Ainsi, le geste thérapeutique est moins traumatique pour les articulations temporo-mandibulaires et sur les dimensions des voies aéro-digestives supérieures (fig.48).

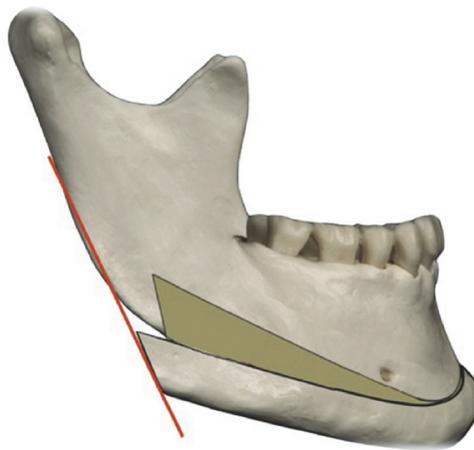


Figure 48 : Ostéotomie de chin wing modifiée

La chirurgie orthognatique englobe une vaste quantité d'actes chirurgicaux agissant sur tous les tissus du massif maxillo-facial. A ce titre, autant pour la planification que pour la thérapeutique, les apports récents du numérique évoqués dans cette partie ouvrent de nouvelles perspectives.

### 3. L'évaluation en thérapeutique orthodontique

L'évaluation en thérapeutique orthodontique et chirurgicale est une étape clé de tout protocole de prise en charge : la superposition permet cette évaluation thérapeutique. Si la superposition manuelle a toujours été disponible pour les praticiens, le numérique ouvre le champ à de nouvelles manières de procéder. Nous allons évoquer les différentes applications de cette technique concernant l'étude de la croissance, l'étude des mouvements dentaires, l'étude des techniques thérapeutiques et l'étude de l'esthétique du visage.

#### *a) L'étude de la croissance*

La superposition des tracés céphalométriques paramétriques 2D est à la base de l'évaluation de la croissance en ODF. Ainsi peuvent être analysés : le degré de croissance, la modification morphologique du schéma facial, une rotation de croissance (Björk). De plus une réévaluation peut être réalisée. Cette technique permet d'évaluer la position des éléments en fin de traitement et d'évaluer si ceux-ci sont stables dans le temps. Pour cela, il faut comparer un même individu à des dates différentes.

La superposition des téléradiographies est soumise à deux types d'erreurs. Les premières proviennent de la radiographie elle-même, causant des difficultés dans l'identification des points de repère, le chevauchement des structures anatomiques, les changements de posture de la tête et le grossissement.

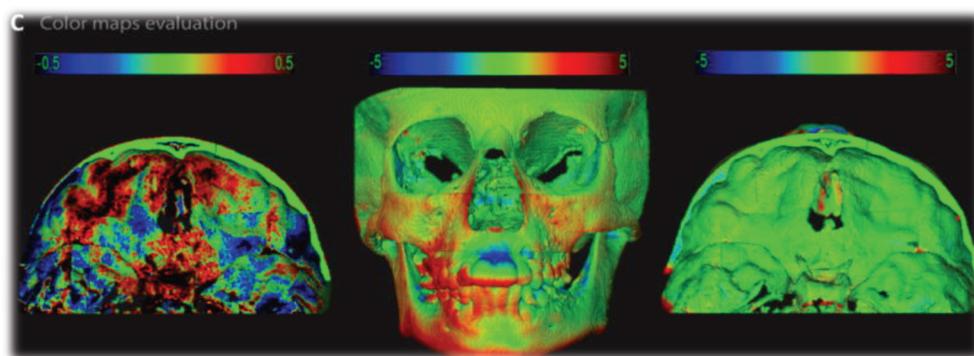
Le second type d'erreur provient du choix de la structure de référence stable pour superposer les films. Ainsi, la superposition suppose le choix d'un axe et d'une zone enregistrée stable (en général au niveau mandibulaire, plan de Downs, l'axe GoGN). De plus, nous devons noter que la croissance se produit à des vitesses différentes selon les pièces squelettiques. Ainsi, les données céphalométriques sont liées aux phénomènes de croissance et ne peuvent pas décrire complètement un phénomène biologique en trois dimensions (Kolokitha OE, 2011).

Concernant l'imagerie 2D, l'apport du numérique dans l'évaluation permet une superposition plus fiable des clichés lorsqu'ils ont été réalisés dans des conditions identiques et que le repérage de points est réalisé par le même opérateur, et cela avec le même risque d'erreur lié au choix du repère de superposition. En ce qui concerne la superposition céphalométrique 3D, le choix d'une zone stable est bien plus délicat qu'en 2D puisqu'il faut

trouver une zone de croissance zéro dans les trois directions de l'espace. Dans leur article, (Incrapera, 2010) évalue si les superpositions céphalométriques 2D sont comparables avec les images superposées en 3D et si la technologie 3D pourrait remplacer la traditionnelle imagerie 2D en chirurgie orthognatique.

Concernant l'imagerie 3D, la méthode du recalage 3D est utilisée par (Cevidane, 2009) pour identifier les changements relatifs de position maxillaire et mandibulaire, ainsi que le remodelage osseux, par rapport à la fosse crânienne antérieure sur des sujets en croissance. La même année, ils publient une méthode de recalage 3D permettant de mettre en évidence les modifications faciales liées à la croissance ou au traitement (Cevidane L. S., 2009). Grâce à une étude basée sur des images CBCT de patients prises avant et après un traitement orthopédique, la méthode permet une évaluation valide et reproductible des résultats du traitement sur les sujets en croissance. Cette technique peut être utilisée pour identifier sur les os maxillaires et mandibulaires les changements de position et le remodelage osseux réalisés par rapport à la fosse crânienne antérieure. Nous pouvons aussi évoquer ici leur nouvelle étude, un an plus tard, dans laquelle ils étudient la modification des tissus mous lors de la croissance (Cevidane L. M., 2010). En 2011, dans leur article, (Reynolds M, 2011) explore une technique de suivi de la croissance en trois dimensions d'une mandibule chez un adolescent durant un an grâce à des images CBCT de la mandibule de celui-ci.

Cinq ans plus tard, en 2015, (Weissheimer A, 2015) valide une nouvelle méthode pour la superposition rapide en 3D d'images CBCT chez les patients en croissance nécessitant une chirurgie orthognatique. Cette méthode est reproductible dans différentes conditions cliniques, elle est rapide et serait applicable à la fois pour la recherche et pour la pratique clinique.



*Figure 49 : Après superposition, appréciation des déplacements 3D via des cartes de couleur. Les zones noires représentent des changements de 0,5 mm, les zones bleues / rouges représentent des changements de moins de 0,5 mm, et les espaces verts ne représentent aucun changement. Sur l'image, les zones en noir, rouge et bleu sont les changements dus à la croissance. Les changements au niveau de la base du crâne sont minimes (vert).*

Le recalage 3D permet aux praticiens d'obtenir une meilleure compréhension des phénomènes de croissance et une meilleure anticipation de ces phénomènes. Ainsi, de nombreux chercheurs essaient de mettre au point un protocole afin de mettre en évidence les changements liés à la croissance maxillo-faciale.

### *b) L'évaluation des mouvements dentaires*

Le domaine de l'évaluation par superposition des modèles dentaires est un domaine qui bénéficie tout particulièrement de l'apport du numérique. En effet, s'il est difficilement imaginable de vouloir superposer deux modèles en plâtre, il est tout à fait possible, avec le numérique, de superposer deux ou plusieurs modèles virtuels en 2D voire en 3D afin d'évaluer les mouvements dentaires qui peuvent être réalisés ou qui ont été réalisés lors de la thérapeutique.

Cette modélisation en 3D, ouvre une nouvelle perspective très intéressante permettant une meilleure compréhension des phénomènes physiologiques et biomécaniques lors des mouvements dentaires.

Ainsi, (Choi DS, 2010) cherche à évaluer la précision de la superposition des modèles numériques 3D en utilisant la surface palatine comme référence pour mesurer les mouvements dentaires. Après analyse, les auteurs stipulent que la superposition des modèles en utilisant cette zone fournit des mesures précises et fiables, mais il reste à étudier la stabilité au niveau sagittal de cette zone palatine après la croissance et/ou un traitement orthopédique. Pour cela, l'équipe a réalisé une seconde étude en utilisant la même zone de référence et a montré que la superposition des modèles est cliniquement fiable pour évaluer le mouvement des dents dans le sens antéro-postérieur même dans les cas traités avec des appareils orthopédiques, y compris dans le cas d'expansion maxillaire rapide (Choi JI, 2012).

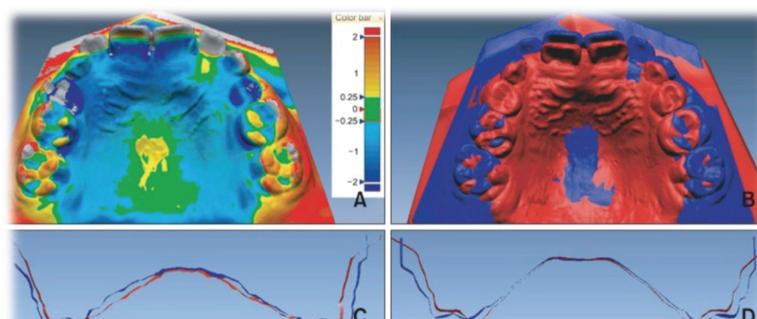
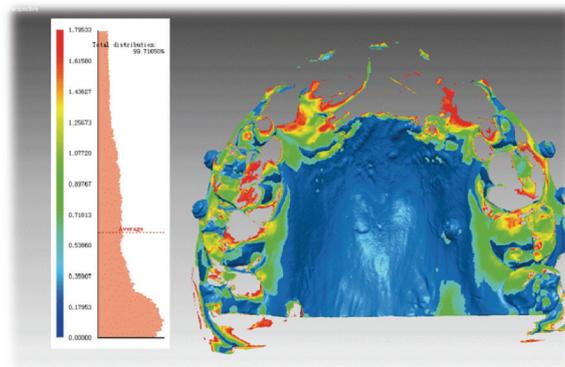


Figure 50 : A- Modèles superposés (échelle colorimétrique), B- Superposition post et pré-traitement, C- Coupe frontale au niveau des secondes prémolaires, D- Coupe frontale au niveau des premières molaires

Dans leur étude, (Chen G, 2011) cherche à identifier une région stable et reproductible chez les patients adultes qui pourrait servir de référence pour superposer des modèles dentaires maxillaires lorsque des extractions de premières prémolaires ont eu lieu. Pour cela, des mini-vis ont été implantées chez 15 patients afin de servir de référent stable. Chaque volontaire a reçu six mini-vis, dont deux utilisées pour rétracter les dents antérieures et quatre mini-vis déchargées. La stabilité de toutes les mini-vis a été analysée. En conclusion, la voute palatine, au niveau de ses replis muqueux antérieurs est une région stable pouvant être utilisée pour la superposition des modèles numérique en 3D pour évaluer le mouvement orthodontique des dents.



*Figure 51 : Carte de couleur indiquant la distance de déviation de la région palatine entre 2 moulages d'un même patient. Les zones où la déviation est inférieure à 0,5 mm ont été sélectionnées et marquées en bleu en utilisant Rapidform®*

(Liu, 2010), en 2010, explique les possibles applications des superpositions tridimensionnelles dans l'analyse des phénomènes de déplacements dentaires en cours de traitement orthodontique. En outre, (Cho, 2010) élargit le domaine de recherche du recalage 3D aux changements des formes d'arcades au cours du traitement.

Dans l'univers numérique, même si plusieurs problèmes théoriques restent à résoudre, il est désormais possible de mesurer les mouvements dentaires effectués lors d'un traitement et ainsi d'évaluer si les mouvements souhaités ont été réalisés.

### *c) L'évaluation de l'esthétique du visage*

Le recalage permet l'analyse des effets d'un traitement, d'une chirurgie et donc de l'influence de ceux-ci sur le visage humain. Ainsi, (Moss, 2003) utilise le recalage 3D pour comparer les effets sur le visage de traitements orthodontiques ayant recours ou non à des

extractions. De plus, les images surfaciques 3D peuvent être utilisées pour analyser le résultat facial d'un patient en tenant compte de ses origines ethniques.

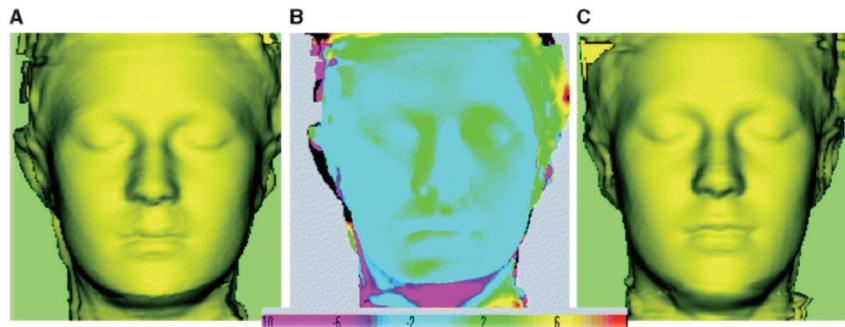


Figure 52 : A-Moyenne du groupe sans extraction avant traitement, B-Les différences de couleur indiquent la quantité de changement qui a eu lieu, C-Moyenne du groupe sans extraction après traitement

#### d) L'évaluation d'une technique thérapeutique

Avec l'exemple d'Invisalign®, (Miller, 2003) évalue l'efficacité et la précision des systèmes de simulation tridimensionnelle numérique. Une erreur linéaire inférieure à 0,35mm et une erreur rotationnelle inférieure à 2° ont pu être calculées par le recalage des données prévisionnelles avec les données des résultats obtenus. Et (Grauer D. a., 2011) se sert du recalage 3D pour évaluer la précision de la technique Incognito® en comparant le set-up prévisionnel avec les résultats obtenus.

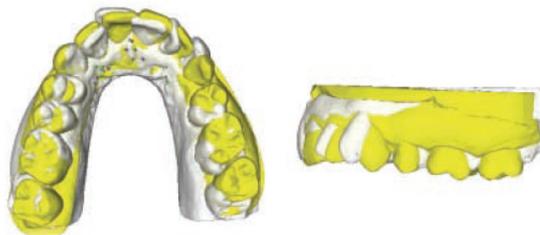
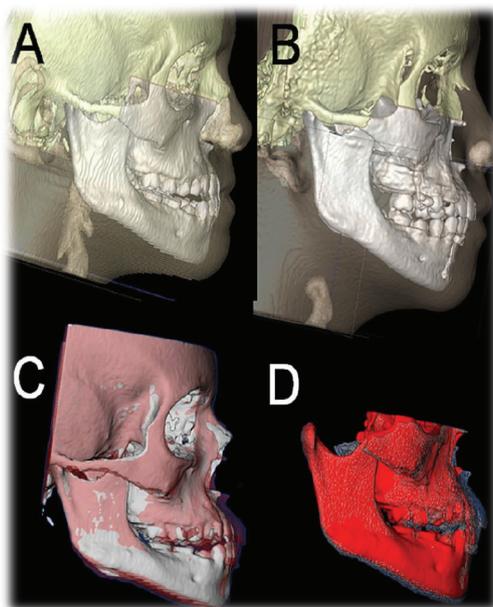


Figure 53 : Superposition du modèle initial et final maxillaire

#### 4. L'évaluation en thérapeutique chirurgicale

L'évaluation des résultats chirurgicaux est fondée sur la superposition des constituants de la face : on peut ainsi analyser les modifications avant et après chirurgie des tissus mous et durs de la face.

Dès 2004, des chercheurs stipulent que la superposition est utile pour prédire le résultat d'une chirurgie par rapport aux changements des tissus mous du visage (Naftel, 2004). En 2005, (Cevidan L. B., 2005) introduit la méthode entièrement automatisée de superposition 3D des images CBCT en dentisterie. Ainsi, le recalage d'images 3D prises avant et après chirurgie orthognatique est utilisé pour évaluer l'anatomie et la position mandibulaire (remodelage du ramus et du condyle).



*Figure 54 : A et B imageries 3D de pré et post traitement chirurgical. C et D superpositions des modèles 3D. Pré-traitement couleur blanc et rouge. Post-traitement couleur rose et maillage triangulaire.*

Concernant les effets d'une chirurgie sur les structures osseuses ainsi que sur les tissus mous, l'équipe (Motta AT, 2010) propose de les étudier. Avec leur méthode, il est possible d'évaluer l'évolution des condyles, du menton, du maxillaire et de la dentition avant et après une chirurgie. Les modèles 3D sont construits et superposés par une méthode entièrement automatique où l'algorithme identifie et compare les niveaux de gris des deux structures en trois dimensions avec pour référence la base pré-chirurgicale du crâne. L'évaluation des

directions de déplacement se fait visuellement par des cartes en couleur et semi-transparentes des modèles superposés. Ainsi, des mesures précises peuvent être produites.

De plus, (Carvalho, 2010) montre les changements en trois dimensions de la position et du remodelage des rami mandibulaires, des condyles et du menton au retrait de la gouttière en immédiat post-opératoire et un an après l'avancée mandibulaire chirurgicale.

Avec plus de précision, (Almeida RC, 2011) étudie l'évolution et la stabilité des tissus mous après une chirurgie d'avancée mandibulaire. L'évaluation des changements des tissus mous pendant et après la chirurgie exige une analyse et une superposition 3D en raison de la complexité du comportement des tissus mous et de la difficulté de mesurer des asymétries en deux dimensions. Finalement, cette étude suggère que la réponse 3D des tissus mous à la chirurgie d'avancement mandibulaire est nettement variable suivant les patients.

Enfin, (Kim, 2012) compare des techniques chirurgicales avec l'analyse des déplacements inter-segmentaux après recul mandibulaire en fonction du système de fixation qui peuvent être une miniplaque avec ancrage mono-cortical, trois vis d'ancrage bi-cortical ou encore une vis d'ancrage bicortical et deux vis résorbables.

L'impact sur les tissus mous a aussi été très étudié. Une équipe analyse par exemple les changements des tissus mous sur le visage des patients après une chirurgie de type Le Fort I (Hwang DS, 2012).

Pour conclure, nous observons sur la (fig.55) ci-dessous qu'à l'aide d'un logiciel spécifique, il est possible d'observer les modifications du contour osseux du massif-facial d'un patient ayant subi une intervention chirurgicale. Il s'agit d'une superposition réalisée sur le secteur orbitaire de l'image cranio-faciale (zone rouge).

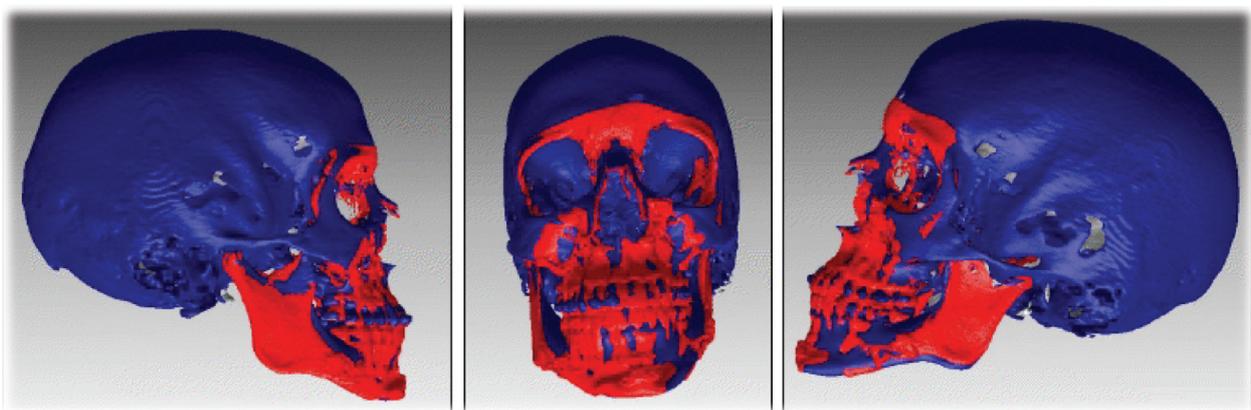


Figure 55 : Superposition recalée sur le secteur orbitaire d'une image cranio-faciale (Rapid form®) : post-thérapeutique/pré-traitement pour évaluation chirurgicale

## IV. Discussion

### A. Un bilan en matière de diagnostic

La démarche diagnostique est désormais enrichie par la photographie numérique, par l'accès à des moulages virtuels et par les images radiographiques numériques en deux et trois dimensions. Ainsi, la prise d'empreinte peut se faire sans matériaux spécifiques et l'analyse des moulages est possible directement sur ordinateur avec la possibilité de réaliser des mesures, des coupes ou encore des set-up virtuels. Ces apports peuvent être discutés de plusieurs points de vue. Nous nous intéressons successivement aux aspects réglementaires, à la dimension sanitaire et au domaine de la recherche.

Au niveau réglementaire, à ce jour, l'utilisation du numérique pour les modèles et les analyses est possible, le seul document de référence disponible actuellement est une recommandation de l'ANAES (Le dossier du patient en odontologie - mai 2000). Dans celui-ci, le paragraphe IV.7.2, page 47, indique que *les moulages font partie intégrante du dossier du patient (...) Il existe des systèmes informatiques de numérisation qui permettent d'archiver en 3 dimensions les moulages. Cette méthode est récente et l'exploitation à long terme de ces images pose le problème de leur archivage dans un format qui pourrait être lu, même de nombreuses années plus tard.* Ainsi, depuis 2000, les moulages 3D ont la même valeur médico-légale que ceux en plâtre mais leur sauvegarde semble poser problème. Nul doute que dans les années qui viennent de nouvelles réglementations permettront de construire un cadre pour l'utilisation généralisée du numérique.

Au niveau de la santé publique, les dangers des radiations sont omniprésents depuis toujours dans l'esprit des praticiens et des patients. Avec le développement de l'imagerie 3D en ODF, il est important de prendre en compte la problématique de la radioprotection afin d'utiliser ces nouvelles technologies 3D dans le cadre de protocoles cliniques spécifiques, en sachant que la majorité des informations visuelles recueillies avec ces systèmes n'ont pas encore été liées à une classification de diagnostic.

Au niveau de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée, des perspectives nouvelles sont explorées par les chercheurs et les entreprises du secteur pour améliorer et mettre à disposition des logiciels de diagnostic toujours plus riches, précis et ergonomiques, des caméras intra-orales, aussi précises pour capturer l'intégralité des dents de la cavité buccale que pour réaliser des photographies extra-buccales de très bonne qualité. La précision des systèmes, la reproductibilité, la fiabilité des machines sont désormais des avancées acquises. Par exemple, très récemment, au niveau de la prise d'empreinte numérique, la société Medentico® a présenté le iTray®, porte-empreinte numérique qui se présente comme un plateau d'impression qui combine les avantages de la technologie numérique avec la précision de l'impression analogique classique moderne (MEDENTICO).

De plus, le développement de la céphalométrie 3D est très prometteur. L'analyse quantitative suivie depuis les années 1990 à l'Université de Toulouse permet d'offrir aux chercheurs de nombreux paramètres pour définir et caractériser le massif facial d'un patient. L'enjeu majeur réside dans le développement d'une véritable biométrie 3D qui pourra surmonter ses contraintes rigoureuses et souvent contradictoires, comme par exemple des paramètres n'excédant pas la douzaine pour permettre au lecteur une appréhension immédiate (Treil J, 2000) (Faure J M.-S. C.-J., 2008).

En matière de diagnostic, dès aujourd'hui, chaque praticien peut avoir accès à l'éventail d'informations numériques disponibles grâce au flux numérique. Cependant chaque progrès potentiel contient ses inconvénients : sauvegarde (dans le cloud ou ailleurs), virus, mise à jour sont les futurs problèmes.

## **B. Un bilan en matière de thérapeutique et d'évaluation**

Les techniques thérapeutiques et d'évaluation orthodontique bénéficient de l'avancée du numérique : les moyens issus de la conception et de la fabrication assistée par ordinateur (CFAO) couplée à l'utilisation des moulages virtuels permettent une nouvelle prise en charge du patient.

Pour l'appareillage orthodontique, les traitements à vocation esthétique doivent être utilisés par des praticiens formés à ces techniques particulières, dans des situations dentaires spécifiques et sur des patients montrant une coopération satisfaisante. Il ne s'agit donc pas de traitement plus « facile à exécuter » malgré une visualisation des mouvements dentaires et la création d'un modèle 3D du résultat escompté pour le patient.

En ce qui concerne la chirurgie, la création de gouttières numérisées est une avancée qui nécessite actuellement une durée de fabrication encore trop importante pour devenir un standard de création pour tous les chirurgiens maxillo-faciales. Néanmoins la possibilité de pré-visualiser et de simuler une chirurgie est certainement un point positif pour les praticiens qui peuvent facilement travailler de manière collégiale par le partage de fichiers numériques.

D'autre part, les techniques chirurgicales issues des apports du numérique se développent depuis quelques années (références Pubmed présentes à partir de 2009). Compte tenu de son impact moindre sur les tissus osseux, nous pouvons penser son utilisation ne va aller qu'en augmentant.

Discuter de l'évaluation numérique revient à évoquer les outils 3D désormais disponibles. En pratique, actuellement, le praticien fait appel aux comparaisons de données céphalométriques 2D et utilise le 3D pour la superposition de modèles numériques. Le recalage de modèles numériques, le recalage d'images issues de CBCT du massif maxillo-facial ou le recalage d'images de tissus mous du patient ne sont pas encore démocratisés dans la prise en charge quotidienne. Mais leur utilisation importante en recherche et leur utilité nous invitent à croire qu'elles deviendront incontournables dans les années à venir.

## V. Conclusion

Dans ce mémoire de thèse, nous présentons l'apport des technologies du numérique – l'apport du numérique – pour l'orthopédie dento-faciale en essayant de couvrir l'ensemble du domaine : les dimensions historiques et techniques, les nouvelles solutions actuelles pour le diagnostic, les avancées en matière de thérapeutique orthodontique et chirurgicale, ainsi que les grandes tendances de la recherche.

Le numérique fait désormais partie du quotidien des cabinets dentaires : il est devenu un allié pour les praticiens qui utilisent tous, en plus des applications de gestion, des logiciels de traitement d'images et d'analyses céphalométriques. Et certains praticiens font déjà appel à des caméras optiques, à des appareils de radiographie 3D ou encore à des imprimantes 3D. Dans cette thèse, nous montrons que grâce au numérique, le patient bénéficie et bénéficiera de plus en plus d'éléments de diagnostics, de simulations et de traitements plus précis, plus efficaces, plus rapides et confortables.

Le numérique est aussi un sujet primordial dans les domaines de la recherche fondamentale et de la recherche clinique : par exemple, comme nous l'évoquons, le traitement des images tridimensionnelles avec analyse biométrique 3D du massif facial est désormais possible.

Dans le domaine de l'orthopédie dento-faciale, le bilan de l'apport du numérique est spécifiquement riche et l'avenir prometteur. Et même si cette affirmation peut être reprise pour tous les secteurs de l'activité du monde, elle a une connotation particulière dans le domaine de la santé qui traite des sujets vitaux de l'homme, pour le patient et pour le praticien.

Ainsi, avec le numérique au cœur de son cabinet, le praticien dispose et disposera de plus en plus d'outils pour analyser, réparer et guérir. C'est dans la poursuite de cette illustre mission que l'orthodontiste se voit s'initier à de nouvelles manières.

## VI. Bibliographie

- 3M. Consulté le 20 05 2016 sur 3mfrance.fr  
[http://solutions.3mfrance.fr/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1416387786000&locale=fr\\_FR&assetType=MMM\\_Image&assetId=1361827864678&blobAttribute=ImageFile](http://solutions.3mfrance.fr/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1416387786000&locale=fr_FR&assetType=MMM_Image&assetId=1361827864678&blobAttribute=ImageFile)
- 3Shape. Consulté le 06 06 2016 sur 3Shape.com  
<http://www.3shape.com/new+products/orthodontic+system/cad+software+lab+scanners>
- Adolphs N, Liu W, Keeve E, Hoffmeister B. RapidSplint: virtual splint generation for orthognathic surgery - results of a pilot series. *Comput Aided Surg.* 2014;19(1-3):20-8.
- Almeida RC, Cevidanes LH, Carvalho FA, Motta AT, Almeida MA, Styner M, Turvey T, Proffit WR, Phillips C. Soft tissue response to mandibular advancement using 3D CBCT scanning. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2011 April;40(4):353-9.
- Aynechi N, Larson BE, Leon-Salazar V, Beiraghi S. Accuracy and precision of a 3D anthropometric facial analysis with and without landmark labeling before image acquisition. *Angle Orthod.* 2011 Mar;81(2):245-52.
- Bachelet J.T, Cliet J.Y, Chauvet-Picard J, Bouletreau P. Surgical splints, place in orthognathic surgery and perspectives. *Rev Orthop Dento Faciale.* 2016;50:71-76.
- Baron P. Invisible and almost invisible orthodontic appliances. *Orthod Fr.* 2014 Mar;85(1):59-91.
- Barreto MS, Faber J, Vogel CJ, Araujo TM. Reliability of digital orthodontic setups. *Angle Orthod.* 2016 Mar;86(2):255-9.
- Barthelemi S, Hyppolite MP, Palot C, Wiechmann D. Components of overbite correction in lingual orthodontics: molar extrusion or incisor intrusion? *Int Orthod.* 2014 dec;12(4):395-412.
- Beers AC, Choi W, Pavlovskaja E. Computer-assisted treatment planning and analysis. *Orthod Craniofac Res.* 2003;6(1):117-25.
- Bettega G, Payan Y, Mollard B, Boyer A, Raphaël B, Lavallée S. A simulator for maxillofacial surgery integrating 3D cephalometry and orthodontia. *Comput Aided Surg.* 2000;5(3):156-65.
- Boileau, M.-J. *Orthodontie de l'enfant et du jeune adulte Tome 1.* Elsevier Masson. 2011.
- Bourriau J, Bidange G, Foucart JM. Measurement errors in 2D cephalometrics. *Orthod Fr.* 2012 Mar;83(1):23-36.
- Carvalho, F.A, Cevidanes, L.H, da Motta, A.T, Almeida, M.A, and Phillips C. Three-dimensional assessment of mandibular advancement 1 year after surgery. *Am J Orthod Dentofacial Orthop,* 2010;137(4): S53 e1-12.
- Cavézian R, Pasquet G. Imagery and orthodontics: trends, present and future. *Orthod Fr.* 2008 Mar;79(1):3-12.
- Cavézian R, Pasquet G. *Cone beam : Imagerie diagnostique en odontostomatologie.* ELSEVIER MASSON. 2011;115-148.
- Cazier S, Moussally C. Description of the various impression systems. *Rev Odont Stomat.* 2013;42:217-118.

- Cevidanes LH, Bailey LJ, Tucker GR Jr, Styner MA, Mol A, Phillips CL, Proffit WR, Turvey T. Superimposition of 3D cone-beam CT models of orthognathic surgery patients. *Dentomaxillofac Radiol.*2005;34(6):369-75.
- Cevidanes LH, Heymann G, Cornelis MA, DeClerck HJ, Tulloch JF. Superimposition of 3-dimensional cone-beam computed tomography models of growing. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*2009;136(1):94-9.
- Cevidanes LH, Styner M, Proffit WR. Three-dimensional superimposition of the skull base for the longitudinal evaluation of the effects of growth and of treatment. *Orthod Fr.* 2009;80(4):347-57.
- Cevidanes LH, Tucker S, Styner M, Kim H, Chapuis J, Reyes M, Proffit W, Turvey T, Jaskolka M. Three-dimensional surgical simulation. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;138(3):361-71.
- Cevidanes LH, Motta A, Proffit WR, Ackerman JL, Styner M. Cranial base superimposition for 3-dimensional evaluation of soft-tissue changes. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*2010.137(4):S120-9.
- Cevidanes LH, Alhadidi A, Paniagua B, Styner M, Ludlow J, Mol A, Turvey T, Proffit WR, Rossouw PE. Three-dimensional quantification of mandibular asymmetry through cone-beam computerized tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011. 111(6):757-70.
- Chen G, Chen S, Zhang XY, Jiang RP, Liu Y, Shi FH, Xu TM. Stable region for maxillary dental cast superimposition in adults, studied with the aid of stable miniscrews. *Orthod Craniofac Res.* 2011 May;14(2):70-9.
- Cho MY, Choi JH, Lee SP, Baek SH. Three-dimensional analysis of the tooth movement and arch dimension changes in Class I malocclusions treated with first premolar extractions: a guideline for virtual treatment planning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*2010;138(6):747-57.
- Choi DS, Jeong YM, Jang I, Jost-Brinkmann PG, Cha BK. Accuracy and reliability of palatal superimposition of three-dimensional digital models. *Angle Orthod.* 2010 Jul;80(4):497-503.
- Choi JI, Cha BK, Jost-Brinkmann PG, Choi DS, Jang IS. Validity of palatal superimposition of 3-dimensional digital models in cases treated with rapid maxillary expansion and maxillary protraction headgear. *Korean J Orthod.* 2012 Oct;42(5):235-41.
- Chouraqui JF, Moussally C. Les différents systèmes d'empreinte optique : comment faire son choix ? *Réalités Cliniques.* 2015;26(4):283-293.
- Chung RR, Lagravere MO, Flores-Mir C, Heo G, Carey JP, Major PW. A comparative analysis of angular cephalometric values between CBCT generated lateral cephalograms versus digitized conventional lateral cephalograms. *Int Orthod.* 2009 Dec;7(4):308-21.
- Dahan S. Les gouttières chirurgicales : intérêt et techniques de réalisation. *l'Orthodontie Bioprogressive.* 2011 Jun:41-50.
- Djeu G, Shelton C, Maganzini A. Outcome assessment of Invisalign and traditional orthodontic treatment compared with the American Board of Orthodontics objective grading system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2005 Sep;128(3):292-8.
- Farronato G, Salvadori S, Nolet F, Zoia A, Farronato D. Assessment of inter- and intra-operator cephalometric tracings on cone beam CT radiographs: comparison of the precision of the cone beam CT versus the latero-lateral radiograph tracing. *Prog Orthod.* 2014;6:15.

- Faure J, Marshal-Sixou C, Dah-Jouonzo H, Oueiss A, Baron P. Three-dimensional 14 point-cephalometric analysis: compensation of maxillofacial dysmorphisms. *Orthod Fr.* 2008 Dec;79(4):251-61.
- Faure J, Oueiss A, Marchal-Sixou C, Braga J, Treil J. Three-dimensional cephalometry: applications in clinical practice and research. *Orthod Fr.* 2008 Mar;79(1):13-30.
- Faure J, Oueiss A, Treil J, Braga J. Étude en morphométrie géométrique des asymétries faciales : rapports avec les formes basicrâniennes et les pathologies maxillo-faciales ou occlusales. *Rev Orthop Dento faciale.* 2013;47:155-171
- Foucart JM, Felizardo R, Pizelle C. Radiation Protection in Orthodontics: relevant data. *Orthod Fr.* 2012 Mar;83(1):3-10.
- Fuhrmann R, Feifel H, Schnappauf A, Diedrich P. Integration of three-dimensional cephalometry and 3D-skull models in combined orthodontic/surgical treatment planning. *J Orofac Orthop.* 1996 Feb;57(1):32-45.
- Grauer D. *Three-Dimensional Applications in Orthodontics.* 2010.
- Grauer D. and Proffit W.R, Accuracy in tooth positioning with a fully customized lingual orthodontic appliance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.*2011;140(3):433-43.
- Güth JF, Keul C, Stimmelmayer M, Beuer F, Edelhoff D. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. *Clin Oral Investig.* 2013 May;17(4):1201-8.
- Hammoudeh JA, Howell LK, Boutros S, Scott MA, Urata MM. Current Status of Surgical Planning for Orthognathic Surgery: Traditional Methods versus 3D Surgical Planning. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2015 Mar;3(2):e307.
- Hiro Toshiaki. Présentation de huit cas d'orthodontie linguale soumis en vue de l'examen de l'European Board of Orthodontists. *International Orthodontics.* 2008 Mars;6(1): 53-132.
- Hwang DS, Kim YI, Park SB, Lee JY. Midfacial soft tissue changes after leveling Le Fort I osteotomy with differential reduction. Cone-beam computed tomography volume superimposition. *Angle Orthod.* 2012 May;82(3):424-31
- Incrapera AK, Kau CH, English JD, McGrory K, Sarver DM. Soft tissue images from cephalograms compared with those from a 3D surface acquisition system. *Angle Orthod.* 2010;80(1):58-64.
- Invisalign. Consulté le 05 2016 sur Invisalign.fr  
<http://www.invisalign-professional.fr/discover/product-ranges>
- Kapila SD, Nervina JM. CBCT in orthodontics: assessment of treatment outcomes and indications for its use. *Dentomaxillofac Radiol.* 2015 Jan;44(1).
- Kapoor P. Photo-editing in Orthodontics: How Much is Too Much? *Int J Orthod Milwaukee.* 2015;26(3):17-23.
- Kim YI, Park SB, Jung YH, Hwang DS, Lee JY. Evaluation of intersegmental displacement according to osteosynthesis method for mandibular setback sagittal split ramus osteotomy using cone-beam computed tomographic superimposition. *J Oral Maxillofac Surg.* 2012 Dec;70(12):2893-8.
- Kolokitha OE, Topouzelis N. Cephalometric methods of prediction in orthognathic surgery. *J Maxillofac Oral Surg.* 2011 Sep;10(3):236-45.

Kuncio D, Maganzini A, Shelton C, Freeman K. Invisalign and traditional orthodontic treatment postretention outcomes compared using the American Board of Orthodontics objective grading system. *Angle Orthod.* 2007 Sep;77(5):864-9.

Lecocq G. Digital impression-taking : Fundamentals and benefits in orthodontics. *International Orthodontics.* 2016 Jun;14(2):184-94.

Leifert MF, Leifert MM, Efstratiadis SS, Cangialosi TJ. Comparison of space analysis evaluations with digital models and plaster dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009 Jul;136(1):1-4.

Lestrel, Pete E. Biological Shape Analysis. 2015.

Liu DX, Liu H, Lü T. Application of three dimensional registration based on CT data for orthodontics. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.*2010;28(2):119-23.

Maret D. *Morphométrie haute résolution des germes dentaires : Evaluation du Cone Beam CT en tant qu'outil de mesure.* 2010 Thèse Toulouse.

Mazzoni S, Badiali G, Lancellotti L, Babbi L, Bianchi A, Marchetti C. Simulation-guided navigation: a new approach to improve intraoperative three-dimensional reproducibility during orthognathic surgery. *J Craniofac Surg.* 2010 Nov;21(6):1698-705.

MEDENTIC. Consulté en 06 2016 sur Medentic.de  
<http://www.medentic.de>

Moss JP, Ismail SF, Hennessy RJ. Three-dimensional assessment of treatment outcomes on the face. *Orthod Craniofac Res.* 2003;6(1):126-31.

Motta AT, de Assis Ribeiro Carvalho F, Oliveira AE, Cevidanes LH, de Oliveira Almeida MA. Superimposition of 3D cone-beam CT models in orthognathic surgery. *Dental Press J Orthod.* 2010 Mar;1(15):39-41.

Miller RJ, Kuo E, Choi W. Validation of Align Technology's Treat III digital model superimposition tool and its case application. *Orthod Craniofac Res.* 2003;6 Suppl 1:143-9.

Naftel AJ, Trenouth MJ. Stereo-assisted landmark detection for the analysis of changes in 3-D facial shape. *Med Inform Internet Med.* 2004;29(2):137-55.

Nanda V, Gutman B, Bar E, Alghamdi S, Tetradis S, Lulis AJ, Eskin E, Moon W. Quantitative analysis of 3-dimensional facial soft tissue photographic images: technical methods and clinical application. *Prog Orthod.* 2015;16:21.

Navarro Rde L, Oltramari-Navarro PV, Fernandes TM, Oliveira GF, Conti AC, Almeida MR, Almeida RR. Comparison of manual, digital and lateral CBCT cephalometric analyses. *J Appl Oral Sci.* 2013 Mar;21(2):167-76.

Nguyen CX, Nissanov J, Ozturk C, Nuveen MJ, Tuncay OC. Three-dimensional imaging of the craniofacial complex. *Clin Orthod Res.* 2000 Feb;3(1):46-50.

Nur RB, Çakan DG, Arun T. Evaluation of facial hard and soft tissue asymmetry using cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2016 Feb;149(2):225-37.

ORISLINE. Consulté en 05 2016 sur Orisline.com  
<http://www.orisline.com/en/>

Oueiss A, Pages C, Treil J, Braga J, Baron P, Faure J. Study of asymmetries in the severe antero-posterior disharmonies. *Orthod Fr.* 2010 Sep;81(3):235-244.

- Papé Rd, Pizelle C, Foucart JM. Measurement errors in 3D cephalometrics: about the buccal craniofacial analysis. *Orthod Fr.* 2012 Mar;83(1):37-44.
- Park SH, Yu HS, Kim KD, Lee KJ, Baik HS. A proposal for a new analysis of craniofacial morphology by 3-dimensional computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006 May;129(5): 600.e23-34.
- Patzelt SB, Bishti S, Stampf S, Att W. Accuracy of computer-aided design/computer-aided manufacturing-generated dental casts based on intraoral scanner data. *J Am Dent Assoc.* 2014 Nov;145(11):1133-40.
- Pauls AH. Therapeutic accuracy of individualized brackets in lingual orthodontics. *J Orofac Orthop.* 2010 Sep;71(5):348-61.
- Penin X. La céphalométrie Procuste. *Orthod Fr.* 2006;77:407-415.
- Rangel FA, Maal TJ, Bergé SJ, van Vlijmen OJ, Plooi JM, Schutyser F, Kuijpers-Jagtman AM. Integration of digital dental casts in 3-dimensional facial photographs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008 Dec;134(6):820-6.
- Reynolds Mathew, Reynolds Michael, Adeeb Samer, El-Bialy Tarek. 3-D Volumetric Evaluation of Human Mandibular Growth. *Open Biomed Eng J.* 2011;5:83-89.
- Sadiq Z, Collyer J, Sneddon K, Walsh S. Orthognathic treatment of asymmetry: two cases of "waferless" stereotactic maxillary positioning. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2012 Mar;50(2):27-9.
- Sandler J, Murray A. Clinical photographs--the gold standard. *J Orthod.* 2002 Jun;29(2):158-61.
- Schulein TM. Significant events in the history of operative dentistry. *J Hist Dent.* 2005 Jul;53(2):63-72.
- Sforza C, Laino A, D'Alessio R, Grandi G, Catti F, Ferrario VF. Three-dimensional facial morphometry of attractive adolescent boys and girls. *Prog Orthod.* 2007;8(2):268-81.
- Shorey R, Moore K. Clinical digital photography : implementation fo clinical photography for everyday practise. *J Calif Dent Assoc.* 2009 Mar;37(3):179-83.
- Sifakakis I, Pandis N, Makou M, Katsaros C, Eliades T, Bourauel C. A comparative assessment of forces and moments generated by lingual and conventional brackets. *Eur J Orthod.* 2013 Feb;35(1):82-6.
- Sifakakis I, Pandis N, Makou M, Eliades T, Katsaros C, Bourauel C. A comparative assessment of torque generated by lingual and conventional brackets. *Eur J Orthod.* 2013 Jun;35(3):375-80.
- Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014 Jun;145(6):728-36.
- Treil J, Casteigt J, Borianne P, Faure J. 3D cephalometry. *Orthod Fr.* 2000 April;71(2):153-4.
- Triaca A, Minoretti R, Saulacic N. Mandibula wing osteotomy for correction of the mandibular plane: A case report. . *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2010 April;48(3):182-4.
- Tucker S, Cevidanes LH, Styner M, Kim H, Reyes M, Proffit W, Turvey T. Comparison of actual surgical outcomes and 3-dimensional surgical simulations. *J Oral Maxillofac Surg.* 2010 Oct;68(10):2412-21.

- Vardimon AD, Robbins D, Brosh T. In-vivo von Mises strains during Invisalign treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2010 Oct;138(4):399-409.
- Waard O, Baan F, Verhamme L, Breuning H, Kuijpers-Jagtman AM, Maal T. A novel method for fusion of intra-oral scans and cone-beam computed tomography scans for orthognathic surgery planning. *J Craniomaxillofac Surg*. 2016 Feb;44(2):160-6.
- Weissheimer A, Menezes LM, Koerich L, Pham J, Cevidanes LH. Fast three-dimensional superimposition of cone beam computed tomography for orthopaedics and orthognathic surgery evaluation. *Int J Oral Maxillofac Surg*. 2015 Sep;44(9):1188-96.
- Westerlund A, Tancredi W, Ransjö M, Bresin A, Psonis S, Torgersson O. Digital casts in orthodontics: a comparison of 4 software systems. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2015 April;147(4):509-16.
- White AJ, Fallis DW, Vandewalle KS. Analysis of intra-arch and interarch measurements from digital models with 2 impression materials and a modeling process based on cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2010 Apr;137(4):456.e1-9.
- Wiranto MG, Engelbrecht WP, Tutein Nolthenius HE, van der Meer WJ, Ren Y. Validity, reliability, and reproducibility of linear measurements on digital models obtained from intraoral and cone-beam computed tomography scans of alginate impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2013 Jan;143(1):140-7.
- Wong BH. Invisalign A to Z. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2002 May;121(5):540-1.
- Yang WM, Ho CT, Lo LJ. Automatic Superimposition of Palatal Fiducial Markers for Accurate Integration of Digital Dental Model and Cone Beam Computed Tomography. *J Oral Maxillofac Surg*. 2015 Aug;73(8):1616.e1-10.
- Zinser M, Zoeller J. Computer-Designed Splints for Surgical Transfer of 3D Orthognathic Planning. *Facial Plast Surg*. 2015 Oct;31(5):474-90.
- Zribi A, Faure J. Contribution of three dimensional cephalometry in the study of determining morphological parameters for facial esthetics. *Orthod Fr*. 2014 Mar;85(1):51-8.

## VII. Iconographies

Figure 1 : Photographie patient - vue de face	7
Figure 2 : Photographie patient - vue de profil	7
Figure 3 : Photographie patient – analyse du sourire	7
Figure 4 : Occlusion secteur 1/4	7
Figure 5 : Occlusion vue frontale	7
Figure 6 : Occlusion 2/3	7
Figure 7 : Scanner extra-orale 3Shape®	9
Figure 8 : Prise d’empreinte numérique	10
Figure 9 : Planmeca® - PlanScan®	10
Figure 10 : iTERO® Element®	11
Figure 11 : Dental Wings® - Dwio®	11
Figure 12 : Set-up numérique	14
Figure 13 : Panoramique dentaire	15
Figure 14 : Téléradiographie de profil	15
Figure 15 : Appareillage CBCT Planmeca®	16
Figure 16 : Image reconstruite d’un visage humain	17
Figure 17 : Tracés céphalométriques	18
Figure 18 : Logiciel Oris®	19
Figure 19 : Charpente maxillo-faciale – analyse céphalométrique 3D	21
Figure 20 : Scanner cranio-facial pré-chirurgical avec tracés céphalométriques	22
Figure 21 : Scanner cranio-facial de face et de profil avec les points de repères trigéminaux et les paramètres d'asymétrie les plus marquants	23
Figure 22 : Superposition 3D de la mandibule	25
	75

Figure 23 : Acquisition CBCT	27
Figure 24 : Moyenne d'acquisitions de saisie de surface 3D	28
Figure 25 : Superposition d'image 3D pour évaluation	30
Figure 26 : Logiciel Proface® Planmeca®	31
Figure 27 : Superposition de l'image de modèle dentaire inférieur à la région dentaire inférieure de l'image CBCT du massif facial	32
Figure 28 : Visualisation d'une canine incluse sur CBCT	33
Figure 29 : Appréciation du carrefour aéro-pharyngé sur CBCT	33
Figure 30 : Quantification de l'asymétrie mandibulaire pour un patient en utilisant la superposition 3D	34
Figure 31 : Gouttières Invisalign® portées	39
Figure 32 : Simulation d'expansion d'arcade dentaire sur ClinCheck®	40
Figure 33 : Impression 3D de gouttières chirurgicales numériques	42
Figure 34 : Logiciel CFAO de gouttières chirurgicales via Dolphin Imaging®	43
Figure 35 : Attaches en cire sur tige de coulée	46
Figure 36 : Attaches et arc en place	46
Figure 37 : Choix des attaches	47
Figure 38 : Superposition de modèles	47
Figure 39 : Insignia®	49
Figure 40 : Crochets, taquets Invisalign®	51
Figure 41 : Acquisition 3D	54
Figure 42 : Simulation 3D montrant les lignes d'ostéotomies	54
Figure 43 : Images 3D des tissus mous pré-op	54
Figure 44 : Simulation 3D des résultats prévus sur les tissus mous après chirurgie	54
Figure 45 : Protocole d'analyse d'images 3D utilisé pour la simulation chirurgicale virtuelle	55
	76

Figure 46 : Chirurgie guidée	55
Figure 47 : Ostéotomie de chin wing	56
Figure 48 : Ostéotomie de chin wing modifiée	57
Figure 49 : Après superposition, appréciation des déplacements 3D via des cartes de couleurs	59
Figure 50 : Superposition de modèles maxillaires	60
Figure 51 : Echelle colorimétrique – superposition modèles maxillaires	61
Figure 52 : Superposition tissus mous de patients	62
Figure 53 : Superposition du modèle initial et final maxillaire	62
Figure 54 : Superposition d'images CBCT pour évaluation chirurgicale	63
Figure 55 : Superposition recalée sur le secteur orbitaire d'une image cranio-faciale (Rapid form®) : post-thérapeutique/pré-traitement pour évaluation chirurgicale	64



## Approbation – Improbation

Les opinions émises par les dissertations présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, sans aucune approbation ou improbation de la Faculté de Chirurgie dentaire (1).

Lu et approuvé,

Vu,

Nice, le

Le Président du jury,

Le Doyen de la Faculté de  
Chirurgie Dentaire de l'UNS

Professeur Armelle MANIERE

Professeur Armelle MANIERE

(1) Les exemplaires destinés à la bibliothèque doivent être obligatoirement signés par le Doyen et par le Président du Jury.

## *Serment d'Hippocrate*

*En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'Hippocrate,*

*Je promets et je jure, au nom de l'Être Suprême, d'être fidèle aux lois de l'Honneur et de la probité dans l'exercice de La Médecine Dentaire.*

*Je donnerai mes soins gratuits à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.*

*Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui se passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.*

*Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon Devoir et mon patient.*

*Je garderai le respect absolu de la vie humaine dès sa conception.*

*Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'Humanité.*

*Respectueux et reconnaissant envers les Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leurs pères.*

*Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses,*

*Que je sois couverte d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.*

**Elisa Chignoli**

# **NOUVEAUX APPORTS DES TECHNOLOGIES NUMERIQUES EN ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE**

**Thèse :** Chirurgie Dentaire, Nice, 2016, n°42-57-16-32

**Directrice de thèse :** Docteur Arlette OUEISS

**Mots clés :** orthopédie dento-faciale, orthodontie numérique, diagnostic, thérapeutique, 3D.

**Résumé :**

L'*orthopédie dento-faciale (ODF)*, née au milieu du XIXème siècle, s'est développée avec la science informatique dès l'apparition de la photographie numérique dans les années 1970. On peut parler désormais d'ODF *numérique*.

Cette thèse a pour but de faire un point sur les apports du numérique en ODF dans l'aide au diagnostic et en terme de thérapeutique, ainsi que de mettre en avant les outils disponibles, y compris dans le domaine de la recherche, pour l'évaluation et le suivi thérapeutique.

La première partie de cette thèse décrit les principaux moyens numériques disponibles pour l'analyse du patient : la photographie numérique, le *scanner* intra-oral et extra-oral, et l'exploitation de modèles virtuels numériques. Elle présente aussi, au niveau radiographique, en plus de données céphalométriques bidimensionnelles (2D), l'analyse biométrique tridimensionnelle (3D) et les images tridimensionnelles de surface et/ou osseuses du patient.

Dans la deuxième partie, nous traitons de l'apport du numérique dans les thérapeutiques orthodontiques et chirurgicales, ainsi que de l'utilisation des acquisitions 3D pour l'évaluation et le suivi thérapeutique.

La troisième partie discute de façon synthétique de l'avenir du numérique pour l'ODF.