

2m 11, 3005.6

Université de Montréal

Système 3D assisté par ordinateur :
Aide aux diagnostic et plan de traitement en orthodontie

par

Stéphanie Induni

Département de santé buccale

Faculté de médecine dentaire

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M. Sc.)
en médecine dentaire, option orthodontie

Mai 2002

© Stéphanie Induni, 2002



WU
5
U58
2002
v.002

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Le présent mémoire, intitulé :

Système 3D assisté par ordinateur :
Aide aux diagnostic et plan de traitement en orthodontie

présenté par :

Stéphanie Induni

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Docteur Claude Remise _____
Professeur Sébastien Roy _____
Docteur Daniel Kandelman _____
Professeur Jean Meunier _____

Mémoire accepté le : _____

SOMMAIRE

« Πάντα ρεῖ » tout coule, tout passe disait Héraclite et que le torrent orthodontique coule vite!

Nous assistons actuellement à une évolution considérable des moyens techniques mis à la disposition des praticiens pour traiter leurs patients et aujourd'hui l'orthodontiste se situe au carrefour de progrès importants dans les domaines aussi variés que ceux de la micro-informatique, la micro-mécanique, l'électronique ou la métallurgie.

Aussi loin que l'on puisse remonter dans le temps de l'histoire de l'orthodontie, l'élaboration du diagnostic et du plan de traitement nécessite l'analyse d'exams complémentaires. L'obtention de moulages orthodontiques constitue l'opération de nécessité absolue pour l'étude de la malocclusion.

Récemment, un intérêt particulier s'est développé pour les modèles numériques en trois dimensions suite à l'introduction de services de numérisation des moulages orthodontiques classiques. Dans le but d'une commercialisation rapide, peu d'études concernant ce nouvel arsenal diagnostique ont été réalisées. La première partie de ce travail a ainsi pour objectifs de tester les programmes actuellement sur le marché et d'évaluer la fiabilité du système de mesures dentaires proposé.

Si l'on se place dans une démarche prospective, cette technologie permettrait l'introduction de nouveaux outils de diagnostic et de traitement afin d'orienter la thérapeutique vers une approche plus précise et personnalisée. La seconde partie de ce travail concerne ainsi le développement d'un programme de « set-up », une maquette dentaire prévisionnelle, numérique en trois dimensions basé sur un équilibre morpho-fonctionnel individuel.

Dans un premier temps, les mêmes moulages orthodontiques ont été envoyés aux sociétés EMODEL et ORTHOCAD afin de les numériser. Les modèles digitaux obtenus, reçus par Internet en quelques jours, ont ensuite été visualisés sur les interfaces développées par chacune de ces compagnies. Afin de quantifier la fiabilité

des différentes méthodes proposées, trois séries de mesures ont été successivement effectuées par le truchement d'un pied à coulisse digital, du programme Emodel et enfin du programme Orthocad. Pour chaque méthode, toutes les dents ont été mesurées cinq fois par le même opérateur et une valeur moyenne a pu être calculée. Le pied à coulisse étant l'outil classiquement employé dans la pratique orthodontique, il a servi de référence pour valider les nouveaux systèmes commerciaux.

Évalués dans leur ensemble, les systèmes se sont avérés extrêmement fiables puisque le coefficient inter-classe Emodel/Pied à coulisse a pour valeur 99,8% et celui Orthocad/Pied à coulisse est de 98,9%. Cependant, une évaluation cette fois-ci de chacune des mesures dentaires prises individuellement permet de mettre en évidence un écart à la moyenne plus important pour Orthocad que pour Emodel. Cet écueil est très probablement inhérent à la technique disponible, Emodel permet des mesures en trois dimensions alors que pour Orthocad les modèles sont fixes en vue occlusale soit en deux dimensions.

Dans la deuxième partie de ce travail, une application possible de l'utilisation des modèles 3D est présentée. Basé sur les recherches en cours et sur les connaissances orthodontiques actuelles, un programme informatique de set-up a pu être développé.

La stratégie pour la réalisation du set-up virtuel repose sur des principes identiques à ceux utilisés classiquement auxquels s'ajoutent les procédés de vision pour la modélisation et la visualisation des modèles. Les moulages numérisés par Emodel ont ainsi été insérés dans le programme VTK (Visualization ToolKit) et traités pour l'élaboration de ce projet. Pour la conception du set-up, certaines fonctions graphiques de la bibliothèque VTK ont pu être utilisées alors qu'une grande quantité de nouvelles applications ont été programmées en TCL/TK dans le but de développer un programme spécifique et parfaitement adapté aux besoins des orthodontistes. En ce qui concerne les données mathématique et numérique, elles ont été traitées par le programme Mathematica qui est un logiciel de calculs formel et numérique.

Chaque étape de la procédure de la réalisation du set-up est décrite :

- Le mode de visualisation,
- La projection des modèles sur la radiographie céphalométrique,
- La segmentation individuelle des dents,
- Le choix de la forme d'arcade,
- Les points de repères dentaires pour permettre l'alignement,
- L'alignement automatique des dents,
- L'évaluation de l'occlusion.

À la lumière des différentes recherches effectuées, certaines recommandations en vue de l'amélioration à la fois des programmes disponibles et du set-up développé peuvent être émises : tout d'abord, il serait souhaitable de vérifier par une étude à grande échelle la validité scientifique des produits commercialisés. Deuxièmement, il apparaît essentiel de calculer la précision réelle de chaque système en prenant en compte le procédé de numérisation, la mise en occlusion des modèles, le programme de visualisation et enfin l'outil permettant d'effectuer les mesures. Troisièmement, les études devraient s'intéresser au développement de nouveaux algorithmes pour mettre au point un système automatisé, ce qui diminuerait considérablement le temps nécessaire pour la réalisation du set-up. Quatrièmement, de nouvelles études pourraient exploiter ce travail pour concevoir un programme commercialisable. Finalement, de grandes précautions devraient être prises lors de la présentation de ces nouvelles images au patient et des études supplémentaires permettraient d'estimer l'interprétation et les attentes de nos patients face à un tel outil de simulation de traitement.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIERES	VI
Liste des tableaux	X
Liste des figures.....	XI
Liste des sigles et abréviations.....	XVI
REMERCIEMENTS.....	XVIII
DÉDICACES	XX
1. INTRODUCTION	23
2. REVUE DE LITTÉRATURE	26
2.1. CONFECTION DE MODÈLES ORTHODONTIQUES EN PLÂTRE	26
2.1.1. <i>Technique d’empreinte</i>	<i>26</i>
2.1.2. <i>Cire d’occlusion</i>	<i>28</i>
2.1.3. <i>Fabrication des modèles d’étude en plâtre</i>	<i>28</i>
2.1.4. <i>Montage sur articulateur.....</i>	<i>31</i>
2.2. UTILISATION DES MODÈLES D’ÉTUDE ORTHODONTIQUES	32
2.2.1. <i>Fréquence</i>	<i>32</i>
2.2.2. <i>Intérêts des modèles d’étude</i>	<i>32</i>
2.2.3. <i>Avantages des modèles en plâtre.....</i>	<i>33</i>
2.2.4. <i>Inconvénients des modèles en plâtre</i>	<i>33</i>
2.2.5. <i>Législation</i>	<i>35</i>
2.3. APPLICATIONS PRATIQUES DE L’USAGE DE MODÈLES D’ÉTUDES	
ORTHODONTIQUES	36
2.3.1. <i>Données fournies par l’analyse des modèles d’étude</i>	<i>36</i>
2.3.2. <i>Occlusogramme</i>	<i>39</i>
2.3.3. <i>Technique du montage tridimensionnel (set-up ou wax set-up).....</i>	<i>45</i>

2.4.	ÉTUDE DES MODÈLES ORTHODONTIQUES ORIGINAUX.....	54
2.4.1.	<i>Observation rigoureuse.....</i>	54
2.4.2.	<i>Instruments de mesure.....</i>	54
2.4.3.	<i>Grilles en plastique</i>	55
2.5.	ÉTUDE DES MODÈLES ORTHODONTIQUES SUR UN SUPPORT 2D	56
2.5.1.	<i>Pantographe dentaire.....</i>	56
2.5.2.	<i>Traceur occlusal.....</i>	57
2.5.3.	<i>Photocopie des moulages</i>	57
2.5.4.	<i>Photographies des moulages.....</i>	59
2.5.5.	<i>Numérisation 2D des moulages dentaires.....</i>	60
2.6.	VERS UNE ÉTUDE DE MODÈLES ORTHODONTIQUES 3D.....	67
2.6.1.	<i>Support 2D</i>	67
2.6.2.	<i>Premières images 3D</i>	70
2.7.	ANALYSE DE MODÈLES EN TROIS DIMENSIONS.....	73
2.7.1.	<i>Principales techniques d'acquisition des images 3D.....</i>	74
2.7.2.	<i>Applications en orthodontie</i>	77
2.7.3.	<i>Modèles électroniques en trois dimensions disponibles en pratique orthodontique</i>	93
3.	OBJET DE L'ÉTUDE.....	114
4.	MATERIEL ET MÉTHODES.....	117
4.1.	MATÉRIELS.....	117
4.1.1.	<i>Modèles digitaux 3D</i>	117
4.1.2.	<i>Radiographie</i>	122
4.1.3.	<i>Pied à coulisse.....</i>	122
4.1.4.	<i>Matériel informatique.....</i>	122
4.2.	MÉTHODES	124
4.2.1.	<i>Vérification de la validité des modèles digitaux.....</i>	124
4.2.2.	<i>Méthode pour le set-up.....</i>	128
5.	RESULTATS	134
5.1.	VALIDITE DES MESURES EFFECTUEES SUR LES MODELES DIGITAUX	134

5.1.1.	<i>Mesures effectuées par le truchement du pied à coulisse</i>	<i>134</i>
5.1.2.	<i>Mesures effectuées par le truchement d'Emodel.....</i>	<i>136</i>
5.1.3.	<i>Mesures effectuées par le truchement d'Orthocad.....</i>	<i>138</i>
5.1.4.	<i>Fiabilité</i>	<i>140</i>
5.1.5.	<i>Comparaison des mesures par la technique de Bland et Altman.....</i>	<i>140</i>
5.2.	PRESENTATION DU PROGRAMME DE SET-UP VIRTUEL	142
5.2.1.	<i>Modélisation du modèle 3D</i>	<i>142</i>
5.2.2.	<i>Visualisation du modèle 3D</i>	<i>142</i>
5.2.3.	<i>Animation des modèles.....</i>	<i>147</i>
5.2.4.	<i>Modèles en occlusion</i>	<i>149</i>
5.2.5.	<i>Segmentation des dents</i>	<i>150</i>
5.2.6.	<i>Projection des modèles sur la radiographie</i>	<i>154</i>
5.2.7.	<i>Système de coordonnées des dents</i>	<i>157</i>
5.2.8.	<i>Matérialisation des plans de référence sur la radiographie.....</i>	<i>163</i>
5.2.9.	<i>Calcul des inclinaisons incisives.....</i>	<i>164</i>
5.2.10.	<i>Choix de la forme d'arcade.....</i>	<i>165</i>
5.2.11.	<i>Alignement dentaire</i>	<i>168</i>
5.2.12.	<i>Mise en application de la technique de contraintes pour le problème de set-up. 173</i>	
5.2.13.	<i>Résultats pour Sébastien B.</i>	<i>179</i>
5.2.14.	<i>Cas de Catherine G.</i>	<i>182</i>
6.	DISCUSSION.....	190
6.1.	DE L'UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE VISION 3D EN ORTHODONTIE	190
6.1.1.	<i>EMODEL.....</i>	<i>190</i>
6.1.2.	<i>ORTHO CAD.....</i>	<i>192</i>
6.1.3.	<i>De la recherche à une utilisation du système de mesures en pratique quotidienne</i>	<i>196</i>
6.2.	SET-UP.....	197
6.2.1.	<i>Évaluation du programme de set-up développé.....</i>	<i>197</i>
6.2.2.	<i>Avantages du set-up assisté par ordinateur</i>	<i>207</i>

6.2.3.	<i>Introduction d'images virtuelles dans la pratique orthodontique.....</i>	<i>209</i>
7.	CONCLUSION.....	215
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	220
9.	ANNEXES.....	229
9.1.	ANNEXE 1 : CHARTE POUR ÉVALUER LA DYSHARMONIE DENTO-DENTAIRE, LE GATWD.....	229
9.2.	MÉTHODE POUR LA RÉALISATION DE L'OCCLUSOGRAMME À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL.....	230
9.3.	TAILLE DES MODÈLES RECOMMANDÉ PAR EMODEL POUR LA NUMÉRISATION.....	232

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 4-1 :TEST DE FIABILITÉ.....	127
TABLEAU 5-1 MESURES DENTAIRES AVEC LE PIED À COULISSE, SÉBASTIEN B.	134
TABLEAU 5-2 MESURES DENTAIRES AVEC LE PIED À COULISSE, CATHERINE G.....	135
TABLEAU 5-3 MESURES DENTAIRES AVEC EMODEL, SÉBASTIEN B.....	136
TABLEAU 5-4 MESURES DENTAIRES AVEC EMODEL, CATHERINE G.....	137
TABLEAU 5-5 MESURES DENTAIRES AVEC ORTHOCAD, SÉBASTIEN B.....	138
TABLEAU 5-6 MESURES DENTAIRES AVEC ORTHOCAD, CATHERINE G.	139

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2-1: MODÈLES TAILLÉS CONVENTIONNELLEMENT.	29
FIGURE 2-2 : ORIENTATION ET TAILLE DES MODÈLES SELON SIMON.	30
FIGURE 2-3 : TAILLE DES MODELES SELON SASSOUNI.	31
FIGURE 2-4: ANALYSE D'ESPACE	38
FIGURE 2-5: VISUALISATION PAR L'OCCLUSOGRAMME.	43
FIGURE 2-6: OCCLUSOGRAMME IDÉAL SELON WHITE.	44
FIGURE 2-7 : ÉTAPES DU SET-UP.....	47
FIGURE 2-8 :SET-UP FINAL	48
FIGURE 2-9: INSTRUMENTS DE MESURE.	54
FIGURE 2-10: A ET B : SYMETROSCOPES.	55
FIGURE 2-11 : ARCADES MILLIMÉTRÉES DE WHITE.....	56
FIGURE 2-12:PANTOGRAPHE DENTAIRE.....	57
FIGURE 2-13: TRACEUR OCCLUSAL.	57
FIGURE 2-14: HIGHLANDS TRIM.	59
FIGURE 2-15: SYSTÈME PHOTOGRAPHIQUE DE BURSTONE.	60
FIGURE 2-16:POINTS À SÉLECTIONNER (118) DANS LE PROGRAMME MODELS DE BEGOLE (1979).....	61
FIGURE 2-17: SCHÉMA ET ANALYSE D'ESPACE DU PROGRAMME D'ANALYSE D'ESPACE DE YEN (1991).	62
FIGURE 2-18: MÉTHODE.....	62
FIGURE 2-19: EXEMPLE DE TRACÉ D'OCCLUSOGRAMME	63
FIGURE 2-20: MODÈLES ET RADIOGRAPHIES SCANNÉS ET	64
FIGURE 2-21 : SET-UP SELON BIGGERSTAFF,.....	66
FIGURE 2-22: SET-UP SELON BURSTONE.	66
FIGURE 2-23: MÉTHODE DE FABRICATION D'UN HOLOGRAMME PAR RÉFLEXION.	68
FIGURE 2-24: RÉGION CACHÉE LORS DE L'OBSERVATION D'UN HOLOGRAMME.	70
FIGURE 2-25: REFLEX METROGRAPH.	71
FIGURE 2-26 :TECHNIQUE DU MICROSCOPE DÉCRITE PAR BHATIA ET HARRISON	72

FIGURE 2-27: PRINCIPE DE L'ANALYSE STÉRÉO.....	74
FIGURE 2-28: PRINCIPE DU SHAPE FROM SHADING.	75
FIGURE 2-29: PRINCIPE DE LUMIÈRE STRUCTURÉE.	76
FIGURE 2-30 : PRINCIPE DE LUMIÈRE STRUCTURÉE AVEC PROJECTION DE MOTIFS.....	76
FIGURE 2-31: TRACÉ OBTENU AVEC UN STÉRÉOPHOTOGRAPHE.....	77
FIGURE 2-32: MODÈLES 3D OBTENUS PAR AYOUB.	78
FIGURE 2-33: MÉTHODE UTILISÉE PAR DIRKSEN.....	78
FIGURE 2-34: IMAGES 3D SELON LA TECHNIQUE DE DIRKSEN.....	79
FIGURE 2-35: MATÉRIEL EMPLOYÉ PAR YAMANY.....	79
FIGURE 2-36: EXEMPLES D'IMAGES OBTENUES PAR LA TECHNIQUE DU SHAPE FROM SHADING.....	80
FIGURE 2-37 : METHODE DE YAMAMOTO, A : PRINCIPE, B : EXEMPLE.....	80
FIGURE 2-38: EXEMPLES DE MODELES 3D (ALCANIZ, 1997).	81
FIGURE 2-39: RÉGIONS VISIBLES ET CACHÉES EN LUMIÈRE STRUCTURÉE.	81
FIGURE 2-40: MODÈLES OBTENUS PAR KURODA (MOTOHASHI,1999).....	82
FIGURE 2-41:TECHNIQUE DE DIGITALISATION INTRA-ORALE DE COMMER.	82
FIGURE 2-42: A : QUATRE NUMÉRISATIONS (A) POUR RECONSTRUIRE L'IMAGE GLOBALE (B).	83
FIGURE 2-43: TECHNIQUE DE GOSHTASBY.....	84
FIGURE 2-44 : TECHNIQUE DE	85
FIGURE 2-45: PRINCIPE DE SÉPARATION DES DENTS SELON LAURENDEAU.	86
FIGURE 2-46: GRAPHIQUE DES COORDONNÉES EN Z. (LAUREDEAU, 1991).....	87
FIGURE 2-47:TECHNIQUE DE	88
FIGURE 2-48: PROCÉDÉ DE SÉPARATION DES DENTS SELON YAMANY (1997.).....	88
FIGURE 2-49: TECHNIQUE DE RECONNAISSANCE DES DENTS SEMI-AUTOMATIQUE.	89
FIGURE 2-50: QUANTIFICATION DU MOUVEMENT ORTHODONTIQUE.....	90
FIGURE 2-51: PROGRAMME DE SET-UP PRÉSENTÉ PAR ALCANIZ.....	91
FIGURE 2-52: TECHNIQUE DU SET-UP SELON MOTOHASHI.....	92
FIGURE 2-53: SET-UP FINAL SELON MOTOHASHI.....	93
FIGURE 2-54: MODÈLE 3D OBTENU AVEC UN.....	94
FIGURE 2-55 :PRÉSENTATION DE ORTHOCAD.....	97

FIGURE 2-56 :PRÉSENTATION DE EMODEL.	101
FIGURE 2-57 : PRÉSENTATION DE SURESMILE	104
FIGURE 2-58: TECHNIQUE INVISALIGN.	108
FIGURE 2-59: PRINCIPE DE STÉRÉOLITHOGRAPHIE.	111
FIGURE 4-1: MODÈLES D'ÉTUDES EN PLÂTRE DE SÉBASTIEN B.	118
FIGURE 4-2: MODÈLES D'ÉTUDES EN PLÂTRE DE CATHERINE G.	119
FIGURE 4-3 : MODÈLES 3D DE SÉBASTIEN B. FOURNIS PAR EMODEL.....	120
FIGURE 4-4 : MODÈLES 3D DE SÉBASTIEN B. FOURNIS PAR ORTHOCAD.	120
FIGURE 4-5: MODÈLES 3D DE CATHERINE G. FOURNIS PAR EMODEL	121
FIGURE 4-6: MODÈLES 3D DE CATHERINE G. FOURNIS PAR ORTHOCAD.....	121
FIGURE 4-7: PIED À COULISSE	122
FIGURE 4-8: DESCRIPTION DE LA NUMÉRISATION RADIOGRAPHIQUE.....	123
FIGURE 4-9: SYSTÈME DE MESURES UTILISÉ PAR LE PROGRAMME EMODEL.....	125
FIGURE 4-10: MESURE EFFECTUÉE AVEC LE PIED À COULISSE.	127
FIGURE 4-11: DONNÉES D'ENTRÉE VALIDES POUR VTK.....	130
FIGURE 4-12: PIPELINE VTK.....	130
FIGURE 4-13: APPLICATION MÉDICALE DE VTK, VTK CONTOUR FILTER ET VTK CUTTER.....	131
FIGURE 4-14: APPLICATION EN DENTISTERIE DE VTK	131
FIGURE 5-1 :GRAPHES DE BLAND ET ALTMAN POUR SÉBASTIEN B.	140
FIGURE 5-2 :GRAPHES DE BLAND ET ALTMAN CATHERINE G.	141
FIGURE 5-3: MODÈLES DE SÉBASTIEN B. VISUALISÉS PAR LE TRUCHEMENT DE VTK.	143
FIGURE 5-4: EXEMPLES DE TEXTURE ET DE COULEURS.....	144
FIGURE 5-5 A : VUE ORTHOGRAPHIQUE, B :VUE EN PERSPECTIVE.....	145
FIGURE 5-6: VISUALISATION DES FACETTES.....	146
FIGURE 5-7: LISSAGE DES FACETTES	146
FIGURE 5-8: RÉFLEXION SPÉCULAIRE.....	147
FIGURE 5-9: VUE DE ¾ DES MODÈLES ET ZOOM SUR LE SURPLOMB HORIZONTAL.....	147
FIGURE 5-10: VUE LINGUALE SIMPLIFIÉE	148
FIGURE 5-11: MOUVEMENTS INDÉPENDANTS DES ACTEURS DE LA SCÈNE	148
FIGURE 5-12 : A : MISE EN ÉVIDENCE DES RAPPORTS D'OCCLUSION.....	149

FIGURE 5-13 :ETAPES POUR LA SEGMENTATION DENTAIRE	154
FIGURE 5-14 : NOUVEL ACTEUR, LA RADIOGRAPHIE	154
FIGURE 5-15: SUPERPOSITION DE LA RADIOGRAPHIE SUR LE MODÈLE INFÉRIEUR.....	155
FFIGURE 5-16: MODÈLE INFÉRIEUR AVEC TEXTURE.....	156
FIGURE 5-17: SUPERPOSITION DE LA RADIOGRAPHIE SUR LE MODELE SUPERIEUR.	156
FIGURE 5-18: MODELES D'ETUDE ASSOCIES A LEUR TEXTURE RADIOGRAPHIQUE.	156
FIGURE 5-19 : METHODE DE MOTOHASHI	158
<i>FIGURE 5-20: IMPLANTATION DE LA METHODE DE MOTOHASHI DANS VTK.....</i>	<i>159</i>
FIGURE 5-21 :AXES REPÉRÉS POUR UNE MOLAIRE	160
FIGURE 5-22 : POINTS ET AXES REPÉRÉS POUR UNE CANINE.	160
FIGURE 5-23 : POINTS ET AXES REPÉRÉS POUR UNE INCISIVE.	160
FIGURE 5-24 : PROBLÈME DE POSITIONNEMENT DU POINT C SUR UNE MOLAIRE.....	162
FIGURE 5-25 : SOLUTION POUR LE POSITIONNEMENT DE C SUR UNE MOLAIRE	162
FIGURE 5-26 : AJOUT DE PLANS POUR DÉTERMINER LE DIAMÈTRE MÉSIO-DISTAL	162
FIGURE 5-27 POSITIONNEMENT ADÉQUAT DES POINTS A ET A'.....	163
FIGURE 5-28 :TRACÉ DES PLANS SUR LA RADIOGRAPHIE NUMÉRISÉE.	164
FIGURE 5-29 : CALCUL DES INCLINAISONS INCISIVES.	165
FIGURE 5-30 : TECHNIQUE POUR INDIVIDUALISER LA FORME DE LA CORTICALE OSSEUSE	165
FIGURE 5-31 : REPÉRAGE DES POINTS D'INTERSECTION ENTRE LES AXES DENTAIRE LONGS ET LE PLAN DE LA CORTICALE OSSEUSE.....	166
FIGURE 5-32 : FORME D'ARCADE INFÉRIEURE OBTENUE PAR LA LOI DES MOINDRE- CARRÉES POUR LE PATIENT SÉBASTIEN B.	167
FIGURE 5-33: POINTS ET FORME D'ARCADE SUPÉRIEURE POUR SÉBASTIEN B.....	167
FIGURE 5-34:SYSTÈME D'AXES DENTAIRE	168
FIGURE 5-35: MISE EN ÉVIDENCE DES 3ROTATIONS POSSIBLES PAR DENT.	169
FIGURE 5-36: MISE EN ÉVIDENCE DES 3 TRANSLATIONS POSSIBLES PAR DENT.	169
FIGURE 5-37 : SCHÉMATISATION DES FONCTIONS DE COÛT À DEUX DIMENSIONS POUR 4 CONTRAINTES (A, B,C, D)	171
FIGURE 5-38: RÉSULTATS POUR LA CONTRAINTE INCLINAISON DES INCISIVES À 90°..	173
FIGURE 5-39 :RÉSULTATS POUR LA CONTRAINTE DE SYMÉTRIE	174

FIGURE 5-40 : RÉSULTATS DE LA CONTRAINTE DE FORME D'ARCADE	174
FIGURE 5-41 :RÉSULTATS POUR LA CONTRAINTE DE CHAÎNE	175
FIGURE 5-42 : RÉSULTATS DE LA CONTRAINTE DE NORMALES	176
FIGURE 5-43 : RÉSULTATS POUR 4 CONTRAINTES.	177
FIGURE 5-44 : RÉSULTATS POUR 4 CONTRAINTES.	178
FIGURE 5-45 : RÉSULTATS POUR SÉBASTIEN B.	180
<i>FIGURE 5-46 : RÉSULTATS POUR CATHERINE G., ARCADE SUPÉRIEURE.</i>	<i>184</i>
FIGURE 5-47 :RÉSULTATS POUR CATHERINE G., ARCADE INFÉRIEURE.	186
FIGURE 5-48 : RÉSULTATS DE L'OCCLUSION POUR CATHERINE G.	188
FIGURE 6-1: VISUALISATION DES FACETTES ET D'UN ARTEFACT.	191
FIGURE 6-2: VISUALISATION DES TRANCHES.	193
FIGURE 6-3: MODÈLES RÉEXPÉDIÉS PAR ORTHOCAD APRÈS MODÉLISATION.	194
FIGURE 6-4 : SYSTÈME DE MESURES DENTAIRES D'ORTHOCAD.....	195
FIGURE 6-5: AU SUJET DU DIAMÈTRE MÉRIO-DISTAL	200
FIGURE 6-6 :CONSÉQUENCES DU PROBLÈME DE POSITIONNEMENT DES POINTS A ET A'DANS LA TECHNIQUE DE MOTOHASHI.....	201
FIGURE 6-7 : SOLUTION POUR ÉVITER UNE LINGUALISATION PRÉMOLAIRE TROP IMPORTANTE.....	201

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

”	Pouce (lorsqu’il suit un nombre)
\$	Dollars
°C	Degré Celsius
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions
Al.	Collaborateurs
ATM	Articulation Temporo-Mandibulaire
CAD	Computer Aided Design (conception assistée par ordinateur)
CAM	Computer Aided Design (fabrication assistée par ordinateur)
CCD	Charged Coupled Device (dispositif de couplage de charge)
CD	Disque Compact
CEREC	Chairside Economical Restoration Esthetics Ceramics
Δ	Discriminant
Dpi	Dot per inch (nombre de points par pouce)
DSL	Digital Subscriber Line (boucle locale d’abonnés)
g	Gramme
ICC	Coefficient de Corrélacion Inter-classe
ICM	Intercuspitation Maximale
Inc.	Incorporée
Kb	Kilobase
MB	Mégabase
MHz	Mégahertz
Min	Minute
mm	Millimètre
N	Newton
OB	Overbite (surplomb vertical)
OC	Occlusion Centrée

OJ	Overjet (surplomb horizontal)
OO	Orienté Objet
p	Seuil de signification statistique
Pan	Panoramique
RC	Relation Centrée
SFS	Shape From Shading (photoclinométrie)
STL	Standard Template Library
TCL	Tool Commande Langage (langage de commande utilitaire)
TP	Tooth Positionner
VTK	Visualization ToolKit

REMERCIEMENTS

La thèse constitue une expérience intense, passionnante et marquante; je désire remercier chaleureusement l'aide, l'appui et le support qui m'ont été accordés tout au long de mon projet. Je tiens à remercier mon directeur, Docteur Claude Remise, mon co-directeur, Sébastien Roy, docteur Daniel Kandelman, Monsieur Jean Meunier et Monsieur Pierre Rompré.

En premier lieu je souhaite rendre hommage à mon directeur de thèse **Dr Claude Remise**, lorsque vous m'avez accepté au sein du programme d'orthodontie, vous m'avez permis de réaliser un de mes rêves les plus chers, je vous en serai éternellement reconnaissante.

Votre compétence et votre générosité ont contribué à enrichir ma réflexion orthodontique et m'ont aidée tout au long de mon cours. Quels que soient mes projets, mes objectifs sont d'être fidèle aux valeurs que vous m'avez inculquées durant ce programme : honnêteté dans la pratique orthodontique (et ailleurs) et qualité de traitement.

Pour tous ces points et bien d'autres, infiniment merci.

Sébastien, tout d'abord un grand merci d'avoir accepté ce projet sans la moindre hésitation.

Qu'il s'agisse de science ou d'états d'âmes, nous avons beaucoup partagé: joies, traversée du désert, excitation, soulagement, petits riens. Merci pour toute cette énergie, ces idées, ces intuitions.

Je suis aussi consciente des heures de travail que tu as consacrées et t'en remercie infiniment.

Ton amour de la recherche, ton inépuisable curiosité, ton enthousiasme et ta patience avec les étudiants m'ont impressionné tout au long de ce projet.

Docteur Daniel Kandelman, merci d'avoir spontanément accepté de participer à la correction de ce mémoire à titre de président rapporteur et d'y avoir consacré votre temps précieux.

Monsieur Jean Meunier, merci de me faire l'honneur de participer au jury de cette maîtrise et d'avoir accepté si spontanément de participer à ce travail.

Monsieur Pierre Rompré, merci de m'avoir aidée à franchir une étape importante de ma maîtrise, soit l'analyse statistique des résultats.

DÉDICACES

Ma reconnaissance la plus profonde s'adresse à **mes Parents** qui m'ont transmis le goût d'apprendre et de parfaire mes connaissances. Qu'ils reçoivent toute ma gratitude pour m'avoir soutenue et encouragée tout au long de mes études. Pour toutes ces années où vous vous m'avez guidée et apportée amour et réconfort, je vous transmets aujourd'hui tous mes remerciements et mon amour.

Philippe, tu m'as inspiré ce projet, tu as su prendre soin de moi malgré mes sautes d'humeur, être compréhensif durant ces trois années et plus que patient. Je veux te remercier de m'avoir accordé un support indéfectible et d'avoir traversé avec moi les moments difficiles de la rédaction de ce mémoire. Plus que tout, je désire te dire que la vie commence demain.

A mon frère **Charles** qui a su accepter avec humour les contraintes de toutes ces heures d'études et qui m'a supporté durant ces quelques mois de rédaction,

A ma sœur **Alexandra** qui m'a toujours soutenue et m'a apporté un soutien outre-atlantique quotidien,

A mon frère **Sébastien** qui a su me rappeler les priorités et m'encourager,

A tous les trois,

Pour notre complicité et nos coups de tête,

Pour ce temps où nous avons été séparés,

Vous resterez toujours les soleils de ma vie.

A ma **grand-mère** qui a toujours pris du temps pour m'encourager, tu vois 3 ans, ce n'était pas si long...

A **Louis** pour m'avoir enduré durant mon cours. Pour tes conseils (orthodontiques et autres), ta générosité, nos chicanes sur la langue française, nos rires et notre amitié au quotidien, un énorme merci.

J'ai rencontré dans ma vie très peu de personnes de ta qualité, sois certain que je ne l'oublierai jamais.

A **Henri**, pour nos téléphones interminables et son soutien de chaque minute durant ce cours.

Aux **professeurs** et **cliniciens** du département d'orthodontie qui ont participé à ma formation, je tiens à vous remercier et vous assurer de ma reconnaissance pour la qualité de votre enseignement.

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

L'histoire montre que l'orthodontie progresse comme un fleuve qui change sans cesse d'orientation au gré de ses méandres. A chaque tournant, ceux qui se laissaient aller au fil du courant sont rejetés sur le bord. Ils avaient sous-estimé l'âge de leurs concepts, l'inertie de leur formation et le poids de la routine.

L'informatique a une place prépondérante dans notre quotidien et l'orthodontiste, soucieux d'orienter au mieux ses thérapeutiques, doit se préparer à utiliser les nouveaux outils de diagnostic et de traitement. Il est cependant difficile de faire des choix d'ordre technique et ceux-ci doivent s'effectuer sous la forme d'une approche prospective. La prospective consiste à se placer dans l'avenir pour trier dans le présent des faits porteurs et significatifs afin de dégager ce qui sera notre approche thérapeutique dans les années à venir.

Pour Fauchard qui réalisa le premier traitement orthodontique en 1723, des répliques des arcades dentaires étaient essentielles avant toute thérapeutique. Rapidement, les moulages orthodontiques en plâtre se sont imposés et font désormais partie intégrante de notre profession. Leur analyse circonstanciée est une nécessité absolue dans notre cheminement diagnostique.

A l'heure actuelle, pour établir son diagnostic, l'orthodontiste analyse les examens complémentaires constitués par les radiographies, les photographies et les moulages orthodontiques. Au cours des dix dernières années, la popularité de la numérisation n'a cessé d'augmenter dans la profession orthodontique et le nombre de produits disponibles sur le marché s'est multiplié. Pour que le dossier du patient soit entièrement numérique, depuis peu les modèles d'étude en plâtre sont accessibles sous forme numérisée tri-dimensionnelle. En relation directe, deux sociétés offrent un tel service aux orthodontistes.

Pour mettre en valeur la place des moulages orthodontiques, la revue de littérature qui suit décrit leur rôle et l'évolution de l'exploitation de leurs données et de leur analyse avec le développement des technologies.

Par la suite, en se référant à nos lectures et nos études, un projet de développement de set-up virtuel a été élaboré. Dans un premier temps sont rapportés les objectifs de cette étude, le matériel et les méthodes utilisés. Puis les résultats de notre recherche sont présentés de manière détaillée en prenant de soin de discuter de la pertinence des différentes options à chaque étape du programme.

Finalement, à cette description du programme fait suite une discussion des choix effectués pour optimiser nos résultats et de la place d'un tel outil dans les bureaux d'orthodontie.

CHAPITRE DEUX

REVUE DE LITTERATURE

2. REVUE DE LITTÉRATURE

L'orthodontiste ne peut se limiter au souvenir qu'il a de l'occlusion durant l'examen clinique, c'est pourquoi les modèles d'étude fournissent un fidèle enregistrement tridimensionnel de l'occlusion d'un patient à un moment donné.

L'importance de cet outil diagnostique a d'ailleurs été fort bien soulignée par Graber:

No matter how astute you are, no matter how carefully you look into your dental mirror, no matter how you bend your head to get a better view of the patient's mouth as he sits in the dental chair with his jaws spread apart, you cannot achieve the degree of accuracy and attain the completeness that an analysis of study models will permit-no, will actually demand. (Graber, 1972)

2.1. CONFECTION DE MODÈLES ORTHODONTIQUES EN PLÂTRE

Afin de disposer d'informations précises et fiables, une méthode rigoureuse doit être adoptée pour la confection des modèles d'étude orthodontiques.

2.1.1. Technique d'empreinte

Certaines précautions sont à prendre en ce qui concerne le matériau, le support et la réalisation des empreintes.

2.1.1.1. Matériau

Le matériau d'empreinte le plus courant est l'alginate pour sa précision, son coût et sa facilité de manipulation.

2.1.1.2. Support

Les porte-empreintes sont faits d'aluminium, d'acier, de polystyrène ou de plastique et sont fabriqués en plusieurs tailles et formes. En général, ils contiennent des perforations pour maintenir l'alginate. Le choix de la taille est effectué de

manière à ce qu'il soit à environ 5mm des surfaces labiales et linguales. Le porte-empainte inférieur doit recouvrir la zone rétro-molaire en distal de la troisième molaire alors que le supérieur s'étend distalement au-delà des troisièmes molaires et couvre la partie antérieure du palais mou juste au-delà des fossettes palatines. Un porte-empainte préfabriqué ne convient pas toujours parfaitement et doit être plié pour donner un contour idéal. (Roswick, 1974)

Après avoir effectué la sélection des porte-empaintes, on réalise leurs coffrages en ajoutant de la cire sur la périphérie. Sur le porte-empainte inférieur, de la cire est additionnée au niveau des parties postérieures. Pendant que la cire est encore molle, le porte-empainte est placé en bouche pour enregistrer la zone rétromolaire. Ce parfait ajustement de cire évite au matériau d'empainte de couler de son support et empêche d'enfoncer excessivement le porte-empainte exerçant alors une trop grande pression sur les tissus avoisinants. Le porte-empainte supérieur est coffré dans la portion recouvrant le palais afin de prévenir la coulée de l'alginat dans la gorge (Roswick, 1974).

2.1.1.3. Réalisation des empreintes

Il est conseillé de réaliser l'empainte inférieure en premier afin que le patient se familiarise avec cette nouvelle sensation. Le porte-empainte est positionné d'arrière vers l'avant afin que la cire entre en contact avec la zone rétro-molaire et que l'excès d'alginat soit expulsé vers l'avant. Ceci évite d'emprisonner l'air responsable de bulles. Lors de la prise du matériau, il faut manipuler les lèvres et les joues afin de réaliser l'empainte des freins et des tissus musculaires alentour. (Roswick, 1974).

L'empainte supérieure est aussi accomplie en position couchée, ceci pour éviter au patient de régurgiter. Dans cette position, les muscles contrôlant la trachée et l'œsophage ainsi que les glandes salivaires sont au repos. Le porte-empainte est inséré par l'arrière et basculé vers les dents antérieures afin que l'alginat soit expulsé vers l'avant. Il est nécessaire là encore d'enregistrer les tissus environnants en maintenant le porte-empainte d'une main et en manipulant joues et lèvres de l'autre main. En plaçant un doigt sur le palais, on peut demander au patient de fermer ses lèvres pour enregistrer la région musculaire antérieure. (Roswick, 1974)

Les empreintes exécutées sont conservées à l'humidité pour éviter toute déformation avant d'être coulées en plâtre.

De manière anecdotique, d'autres techniques d'empreintes ont été décrites. Wolk expose une toute nouvelle technique d'empreinte, the Duplex Dental System. Le porte empreinte Duplex permet de prendre simultanément une empreinte de l'arcade supérieure et inférieure. D'après l'expérience de l'auteur, les patients préfèrent cette méthode (Wolk, 1985).

2.1.2. Cire d'occlusion

Un articulé d'occlusion, en cire ou en polysiloxane, est essentiel afin de reproduire les rapports précis entre les modèles supérieur et inférieur. Il peut être réalisé en relation centrée ou en intercuspidation maximale selon la situation clinique à reproduire sur les modèles. Une différence RC/OC de plus de deux millimètres dans le sens antéro-postérieur ou latéral nécessite deux enregistrements, un en RC et un en OC.

2.1.3. Fabrication des modèles d'étude en plâtre

Graber précise qu'une des choses qui impressionne le plus un parent dans un cabinet d'orthodontie est de voir des modèles d'étude blancs, brillants, parfaitement taillés, aux angles précis et bien polis (Graber, 1994).

Ce n'est pas seulement pour faire plaisir aux parents qu'un moulage des dents est réalisé. En plus de fournir un enregistrement précis d'une condition particulière à un moment donné, ces modèles constituent un excellent moyen de communication avec un confrère, les parents ou le patient lui-même.

Pour toutes ces raisons, il est important d'apporter soin et rigueur dans la confection des modèles d'étude dont nous allons brièvement décrire les étapes.

2.1.3.1. Coulée des modèles

Bennett suggérait que les dents du modèle soient en plâtre artificiel et la base en plâtre. Cette combinaison était économique et augmentait la solidité mais elle ne donnait pas une satisfaction esthétique à 100%. En conséquence, la première recommandation est de couler la portion anatomique et la base avec le même plâtre afin de ne pas présenter de ligne de démarcation. Il est essentiel d'utiliser un plâtre dur, blanc, dit orthodontique, pour la résistance des modèles. (Bennett, 1931)

Le détail de la réalisation de la coulée n'est pas le sujet de cette étude et les précautions d'usage sont à appliquer afin d'éviter les bulles et les déformations.

2.1.3.2. Taille des modèles

➤ Taille conventionnelle ou d'Angle

Les moulages sont taillés en respectant les impératifs suivants :

- Les faces supérieure du moulage supérieur et inférieure du moulage inférieur sont meulées parallèlement au plan d'occlusion ;
- Les moulages sont réunis à l'aide d'une cire d'occlusion et leurs dos sont meulés perpendiculairement au plan d'occlusion ;
- Les bords postérieurs sont également meulés perpendiculairement à la suture palatine médiane.
- Les modèles dentaires sont habituellement taillés de manière à ce que leurs bases soient symétriques. Ceci permet d'analyser plus facilement la forme d'arcade et de détecter une asymétrie de l'arcade dentaire.

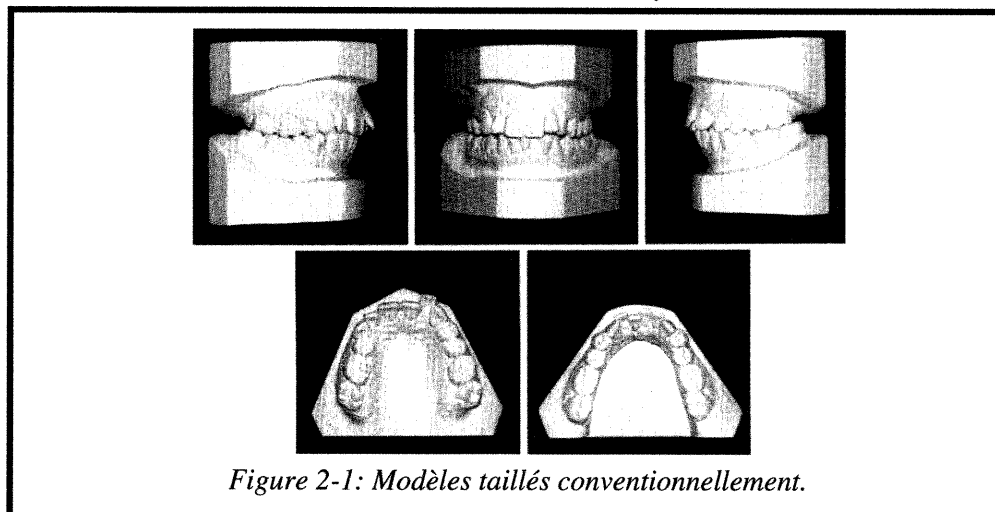
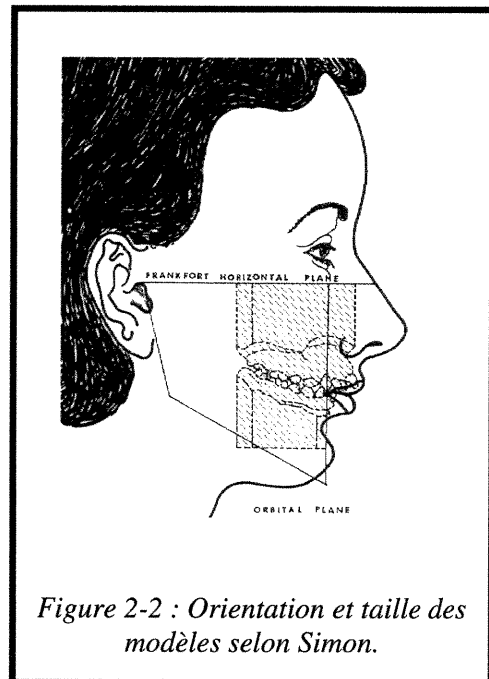


Figure 2-1: Modèles taillés conventionnellement.

➤ Taille selon Simon

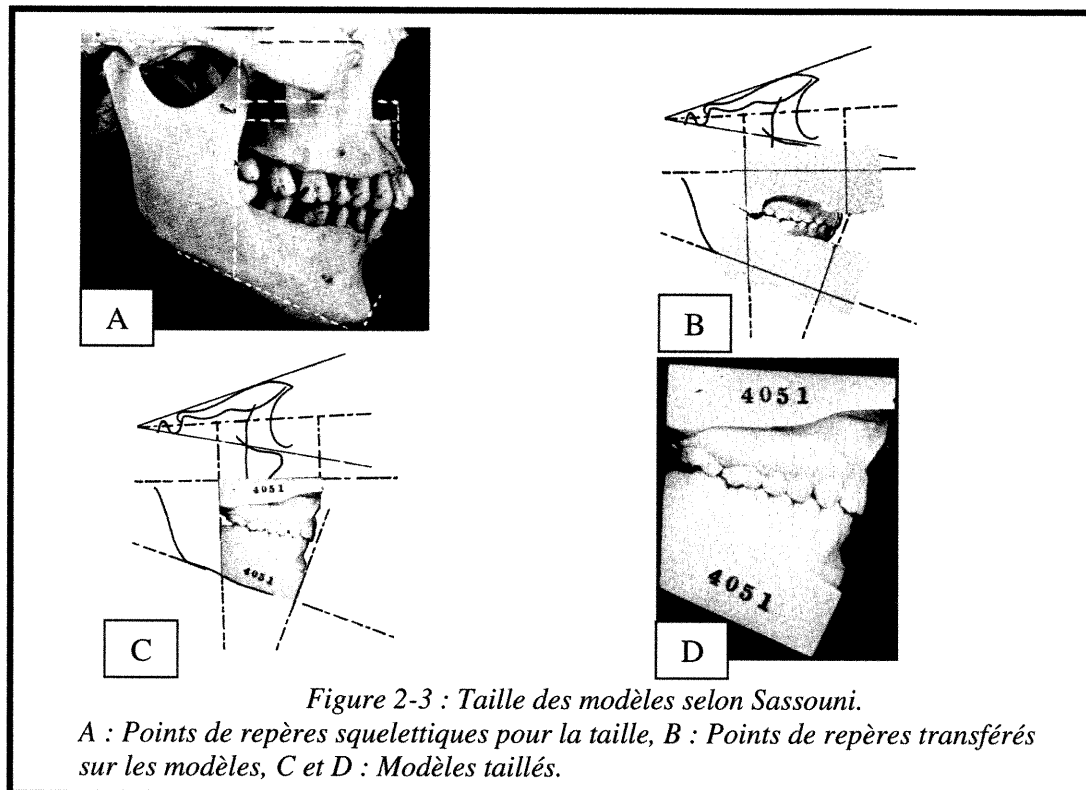
Simon, privilégiant une approche gnathostatique, a choisi d'orienter la dentition par rapport à des repères anthropométriques afin de mieux mettre en évidence la relation entre la dentition et la face du patient. Les bases des modèles sont taillées parallèlement au plan de Francfort, ainsi le plan d'occlusion des modèles d'étude établit un angle avec la base du modèle similaire à celui établi entre le plan d'occlusion naturel et le plan de Francfort. (Graber, 1994)



➤ Taille selon Sassouni

Dans la même idée, certains auteurs comme Sassouni ont proposé de tailler la base du modèle supérieur parallèle au plan palatin et celle du modèle inférieur parallèle au plan mandibulaire. (Sassouni, 1971)

L'idée est séduisante puisqu'elle fait référence à des points de repère familiers et utilisés fréquemment par l'orthodontiste sur le tracé céphalométrique. L'inconvénient technique majeur est que les modèles ainsi taillés ne peuvent être posés verticalement sur une table sans tomber. De ce fait, un tel concept a dû être abandonné avec l'utilisation de modèles classiques en plâtre mais pourrait être une application attrayante des modèles 3D sur ordinateur.



2.1.3.3. Finition

La finition comprend trois phases afin d'obtenir des modèles d'étude idéaux :

- Suppression des bulles;
- Polissage;
- Savonnage.

2.1.4. Montage sur articulateur

La nécessité de monter les modèles sur articulateur est un débat continu. Profitt pense qu'il y a deux situations qui exigent une telle procédure :

- Décalage RC/OC
- Trajectoire anormale de la mandibule

Chez l'adolescent en croissance, le montage n'est généralement pas essentiel puisque les contours de l'ATM ne sont pas entièrement développés. Par contre, un tel montage trouve son indication chez l'adulte présentant des symptômes de dysfonction temporo-mandibulaire ou dans un cas ortho-chirurgical. (Profitt, 2000)

2.2. UTILISATION DES MODÈLES D'ÉTUDE ORTHODONTIQUES

2.2.1. Fréquence

L'article de McGuinness fait état de l'emploi de modèles en plâtre par 124 orthodontistes. Tous les orthodontistes réalisent des modèles à l'étape initiale, 25% durant le traitement, 91% en fin de traitement actif, 39% à la fin de la rétention et 46% après la rétention. (McGuinness, 1992)

2.2.2. Intérêts des modèles d'étude

- Visualisation aisée en trois dimensions de la malocclusion
- Outil diagnostique

La corrélation des informations qu'il fournit avec celles des radiographies intra-orales et du céphalogramme procure des éléments essentiels pour l'élaboration du diagnostic. La classification de la malocclusion, la relation d'arcade, le surplomb horizontal, le surplomb vertical enregistrés durant l'examen clinique peuvent être corroborés par une analyse fine des modèles en plâtre.

- Outil pour l'élaboration du plan de traitement

Les mesures de longueur d'arcade, d'espace disponible, de Bolton sont réalisés plus aisément et précisément sur le modèle qu'en bouche.

- Outil d'évaluation thérapeutique

Une série de modèles permet de constater l'évolution du traitement et constitue un outil inestimable pour l'évaluation de la progression du traitement ou de la situation clinique. C'est un enregistrement longitudinal de l'état dentaire et des tissus

avoisinants à un moment donné qui permet d'intercepter des changements néfastes qui apparaissent parfois lentement.

➤ Outil d'évaluation post-traitement

Par comparaison des modèles initiaux et finaux, l'orthodontiste peut plus aisément apprécier les effets de la thérapeutique utilisée et estimer les mouvements réalisés.

➤ Moyen de communication

Lors des présentations aux conférences et lors des tables cliniques, des modèles parfaitement taillés sont essentiels. De plus, la communication avec le patient et ses parents est améliorée.

2.2.3. Avantages des modèles en plâtre

Jusqu'à récemment, les modèles en plâtre étaient le seul moyen disponible pour représenter précisément la malocclusion. Les caractéristiques qui en font un outil de choix sont :

- Une production courante, prévisible et facile;
- Une manipulation aisée;
- La possibilité de les monter sur articulateur;
- Un coût peu élevé: 20-25 dollars américains.

2.2.4. Inconvénients des modèles en plâtre

- Le stockage

Ils présentent un problème de stockage du fait de leur taille et de leur poids. Sur les 124 orthodontistes interrogés par Mc Guinness, 80% manquent d'espace pour leur

archivage et 25% déclarent les conserver loin de leur unité de travail. (McGuinness, 1992)

La durée moyenne de stockage est de 6,44 ans (la durée médico-légale dans le pays où est réalisée l'étude est de 7 ans) mais idéalement les orthodontistes soulignent leur désir de les conserver indéfiniment si un moyen moins encombrant leur était proposé. (Mc Guinness, 1992)

Ils doivent être rangés et ne sont pas toujours directement accessibles, ce qui peut poser un véritable problème de logistique dans les hôpitaux ou les pratiques de grand volume.

➤ La main d'œuvre

Leur réalisation nécessite une main-d'œuvre fastidieuse.

➤ La fragilité

Ils sont cassables, facilement ébréchés. A titre d'exemple, 50% des modèles reçus par la poste pour le Dental practice board arrivent fracturés. (Harradine, 1990)

Plusieurs techniques pour la protection des modèles ont été suggérées comme l'utilisation de la stéarine, l'application de savon ou de vernis. Boersma présente en détails un procédé pour réaliser des modèles d'étude incassables en résine. Il s'agit de duplicatas de modèles en plâtre parfaitement taillés et savonnés. Une empreinte en silicone est réalisée, celle-ci est coulée en résine à prise à froid. A cette dernière est ajoutée de la poudre de plâtre ou du kieselguhr pour réduire la rétraction de prise et un pigment blanc pour donner une apparence plâtre blanc à la résine transparente. Les modèles obtenus ont une apparence similaire aux modèles utilisés classiquement mais une dureté de surface quatre fois supérieure et une masse diminuée. (Boersma, 1967)

Cependant, deux inconvénients majeurs peuvent être mis en évidence; les modèles perdent de leur précision lorsqu'ils sont dupliqués et le procédé est coûteux en temps et en matériaux.

Pour contourner ces défauts, on recherche des matériaux à appliquer qui pourraient augmenter la solidité et la dureté de surface. Martin et Mc Ewen ont pour objectif de trouver un matériau qui améliore la dureté de surface et la résistance à l'impact, scelle la surface contre la saleté et améliore l'apparence tout en étant facile à appliquer, durable, bon marché et ne dissimulant pas les détails du modèle d'étude. Une couche d'acrylique semble répondre à ces impératifs. Plonger les modèles dans une solution d'acrylique donne les meilleurs résultats mais un spray d'acrylique est d'application plus aisée. (Martin, Mc Ewen, 1970)

➤ La duplication

Comme nous l'avons indiqué ci dessus, il est complexe de dupliquer des moulages en conservant la précision initiale nécessaire à l'exploitation circonstanciée des données.

2.2.5. Législation

Au Canada, les modèles en plâtre doivent être conservés 5 ans après la dernière écriture au dossier.

Machen, dans une série d'articles, a souligné l'importance de posséder et de conserver les modèles d'étude en particulier chez les patients adultes dont la denture a été détériorée par des problèmes parodontaux, des soins orthodontiques antérieurs ou encore des caries. De même, lors de traitements associant orthodontie et chirurgie, la conservation de l'ensemble des données est primordiale et permet de se protéger en cas de litige. (Machen, 1989 a,b,c,d)

2.3. APPLICATIONS PRATIQUES DE L'USAGE DE MODÈLES D'ÉTUDES ORTHODONTIQUES

Graber pense qu'après un examen clinique minutieux, la plus grande attention à apporter concerne la réalisation des modèles d'étude. Ces moulages représentent l'outil diagnostique et pronostique le plus important puisqu'ils contiennent toutes les informations dentaires, osseuses et des tissus mous du patient. (Graber, 1994)

2.3.1. Données fournies par l'analyse des modèles d'étude

Leur analyse est plus objective que l'examen clinique et permet de confirmer une impression clinique.

2.3.1.1. Analyse qualitative

- Analyse du palais : forme, profondeur, largeur. Ces observations sont à corrélérer avec la forme faciale du patient, le type de respiration ou encore l'origine des occlusions croisées.
- Analyse des éléments osseux : épaisseur de l'os alvéolaire, relation des dents avec la base apicale osseuse.
- Analyse des attachements musculaires : insertion du frein, attachements musculaires, morphologie de la papille interdentaire.
- Analyse dentaire : Les points essentiels à déterminer sont la rotation, la malposition, la taille, la forme, la version, l'inclinaison, la sur-éruption, la sous-éruption, la présence de facettes d'abrasion, l'absence et la rétention. Les inclinaisons axiales des incisives, canines (bucco-linguales et mésio-distales) et molaires (bucco-linguales et mésio-distales) sont particulièrement étudiées.
- Analyse d'arcade
 - Forme : l'arcade peut être qualifiée de triangulaire, carrée ou en U.

- Symétrie : outre la symétrie de la forme d'arcade, il faut porter attention aux asymétries à l'intérieur de l'arcade dentaire, ainsi sont évalués la largeur des segments buccaux droits versus gauches, le déplacement mésial des segments buccaux et les déplacements latéraux des incisives.
 - Courbe de Spee et courbe de Monson sont qualifiées d'un état de normalité à celui de sévérité. On établit le nombre de plans dentaires lors d'une observation du moulage dans le plan sagittal.
 - La présence de diastèmes ou de chevauchement est notée, de plus on évalue leur localisation et leur importance.
- Analyse inter-arcade : Cette analyse est réalisée dans les trois sens de l'espace; la relation est définie dans les sens transversal, sagittal et frontal.
- Pour la transverse, les occlusions croisées sont qualifiées précisément et leurs origines dentaire et/ou squelettique identifiées.
 - Pour la relation antéro-postérieure, on note les classes molaires droite et gauche, les classes canines droite et gauche et le surplomb horizontal.
 - Pour la relation dans le sens vertical, les béances antérieures et postérieures sont relevées ainsi que le surplomb vertical.
 - Une attention particulière est portée à la coordination des arcades.
- Classification de la malocclusion selon la classification d'Angle.

2.3.1.2. Analyse quantitative

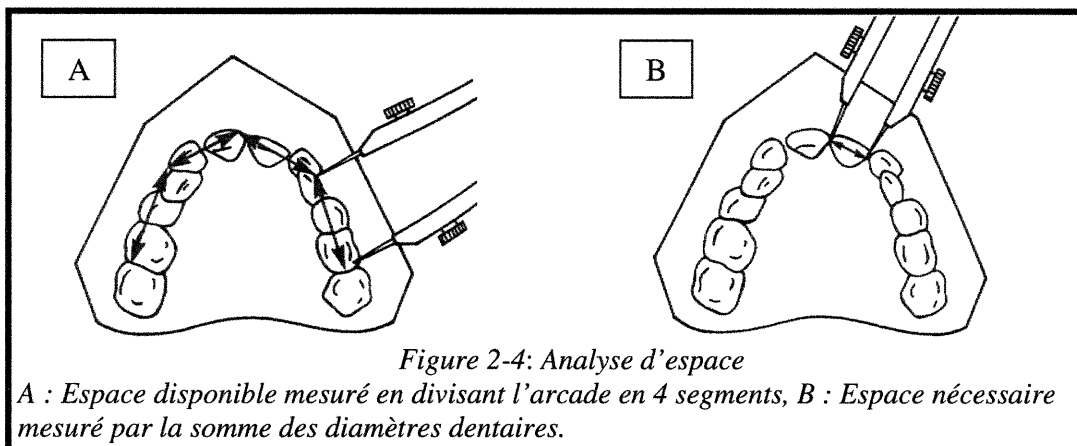
- Mesure du surplomb horizontal : distance en millimètres entre la partie labiale des incisives mandibulaires et le bord incisif des incisives supérieures.
- Mesure du surplomb vertical : distance en millimètres entre les incisives supérieures et les incisives inférieures mesurée dans un plan perpendiculaire au plan occlusal. Cette valeur est souvent exprimée en pourcentage,

quantifiant la portion des incisives mandibulaires recouvertes par les incisives maxillaires.

- Mesure des classes molaires et canines
- Évaluations de la ligne médiane incisive par rapport à la médiane du modèle, des lignes médianes dentaires supérieure versus inférieure : la concordance est notée, toute déviation est mesurée en millimètres
- Largeurs des dents: Les dents sont mesurées individuellement; cette donnée joue un rôle important dans les malocclusions, particulièrement dans les analyses d'espace, les analyses de dysharmonies dento-maxillaire ou dento-dentaire.
- Distance intercanine
- Distance intermolaire
- Longueur d'arcade

2.3.1.3. Analyse d'espace ou dento-maxillaire

Il est important de quantifier l'espace nécessaire versus disponible. L'espace nécessaire est la somme des diamètres mésio-distaux mesurés entre les points de contacts dentaires de prémolaire à prémolaire. L'espace disponible est mesuré en général en divisant l'arcade en quatre segments et en mesurant chaque segment individuellement. (Profitt, 2000)



Ces valeurs sont des données dentaires brutes. L'analyse d'espace est complète lors de la prise en compte du nivellement de la courbe de Spee, des corrections de l'inclinaison incisive et de la courbe de Monson, de la modification de la forme d'arcade ou encore de la croissance. Toutes ces données font référence à un examen de choix qui sera décrit plus tard : l'occlusogramme.

2.3.1.4. Analyse dento-dentaire

La dysharmonie dento-dentaire est souvent évaluée par l'analyse de Bolton qui permet de quantifier un excès dentaire supérieur ou inférieur sur les six dents antérieures ou sur l'ensemble de l'arcade.

Plus récemment Ho et Freer ont développé le GATWD, Graphical Analysis of Tooth Width Discrepancy, qui donne un ratio moyen ainsi que les deux déviations standards pour neuf sous groupes dentaires.(Annexe 1)

Bien que cette méthode soit rigoureuse et qu'elle permette de localiser précisément la dysharmonie, elle nécessite une main d'œuvre importante. Elle sera préférentiellement effectuée avec un pied à coulisse électronique relié à un ordinateur comprenant le programme afin de diminuer les erreurs de transfert de mesures ou de calculs. (Ho, Freer, 1999)

2.3.2. Occlusogramme

A partir des moulages, Burstone a élaboré une construction qui permet d'examiner les relations entre les arcades sur une vue occlusale ; il l'a dénommée "occlusogramme".

Ce document évalue la dimension horizontale et précise les observations de la dimension antéro-postérieure. Il consiste à tracer chaque arcade dentaire sur un transparent, puis à les superposer pour les mettre en occlusion.

2.3.2.1. Intérêts

Les intérêts des occlusogrammes se situent aussi bien dans l'élaboration du diagnostic que dans la représentation des objectifs de traitement. En ce qui concerne le diagnostic, ils permettent la visualisation :

- de l'origine et de l'étendue des déviations des médianes incisives ;
- des décalages transversaux et des différences de forme d'arcade;
- des décalages antéro-postérieurs (mésioposition) ;
- de l'ampleur des rotations dentaires droites et gauches ;
- des encombrements dissymétriques entre deux hémi-arcades ;
- des rapports occlusaux initiaux et de leurs éventuelles variations avec la croissance.

Au niveau du plan de traitement, ils permettent de préciser :

- la position de l'incisive inférieure;
- la longueur d'arcade ;
- la largeur et la forme d'arcade; l'occlusogramme permet de développer une forme d'arcade naturelle, idéale et individualisée;
- le choix de remplacement de la médiane incisive ;
- les indications d'extractions;
- la quantité d'ancrage ;
- les dysharmonies dento-dentaires à l'intérieur des arcades ;
- les relations occlusales finales entre les arcades ;
- l'établissement et la visualisation des systèmes de forces (plan de mécanothérapie);
- au cours du traitement, les objectifs obtenus et ceux restant à atteindre.

2.3.2.2. Construction

Marcotte (1976) décrit le concept et l'utilisation de l'occlusogramme mis au point par Burstone. Les occlusogrammes sont des "set-up" (montages tridimensionnels) de chaque arcade réalisés à partir de photographies de moulages. Les arcades sont décalquées sur des transparents qui sont mis en occlusion par superposition.

➤ La préparation des moulages

Les moulages sont taillés en respectant les impératifs décrits dans le chapitre taille classique des modèles.

➤ Les photographies des moulages

Les photographies des moulages maxillaire et mandibulaire sont réalisées à l'échelle 1. Préalablement, une encoche est taillée sur leur dos, ce qui permet de les placer de façon très précise sur un support en Plexiglass muni de trois points d'enregistrement de chaque côté. La superposition des occlusogrammes pourra se faire grâce à ces points placés sur la base du support et relevés sur la photographie. (Marcotte, 1976)

A l'Université de Montréal, une technique modifiée est utilisée. La ligne du raphé médian palatin se continue sur la partie postérieure du modèle supérieur. Les modèles sont ensuite placés en occlusion, cette ligne est alors prolongée sur le modèle inférieur, de manière à obtenir en final une projection de la ligne du raphé médian sur le modèle inférieur. Les photographies sont réalisées en utilisant cette ligne du raphé médian comme référence, ce qui permet une superposition simplifiée des calques supérieur et inférieur. (Remise, 1999) (Annexe 2)

➤ La photocopie des moulages

Faber propose une variante qui utilise la photocopie. L'enregistrement de l'occlusion est réalisé par l'intermédiaire de la cire de relation centrée selon la chronologie suivante :

- au niveau des indentations et dans l'épaisseur la plus fine, la cire est percée en trois points, répartis de la façon suivante : un antérieur, un droit et un gauche au niveau molaire ;
- la cire est ensuite reportée sur le moulage supérieur et à l'aide d'un marqueur les trois points sont retranscrits sur les dents ;
- la même opération est répétée sur l'arcade inférieure ;

- ces points, visibles sur la photocopie, vont permettre de faire coïncider les occlusogrammes supérieur et inférieur et d'enregistrer la relation centrée.

Les deux moulages ainsi préparés sont posés à plat et photocopiés à l'échelle 1. Les inconvénients de cette technique sont les mêmes que ceux répertoriés dans la section « photocopie des modèles ». (Faber, 1992)

➤ Le tracé des occlusogrammes

A partir des photographies ou photocopies, les arcades sont décalquées sur des transparents en relevant : les contours des dents; les bords incisifs; les cuspidés vestibulaires; les sillons occlusaux; les pointes cuspidiennes; les papilles palatines; le raphé médian ; les fossettes palatines; les points d'enregistrement de la relation centrée ; l'axe sagittal médian de la face est représenté par une flèche dessinée en avant des incisives.

➤ Le système de repère

Au niveau du transparent de l'arcade supérieure, une croix de référence est réalisée en traçant une ligne R, qui passe par le raphé médian, et sa perpendiculaire P, dessinée 2 à 3 mm en arrière des tubérosités maxillaires

➤ La superposition de l'occlusogramme mandibulaire sur l'occlusogramme maxillaire

Les occlusogrammes supérieur et inférieur sont superposés sur les points d'enregistrements et la croix de référence est transférée sur l'occlusogramme inférieur. Ces deux dernières étapes sont simplifiées dans la technique de l'Université de Montréal.

➤ Détermination de la forme d'arcade de traitement

Après avoir déterminé la position antéro-postérieure des incisives inférieures, la deuxième étape consiste à définir le futur emplacement de la médiane incisive et la forme d'arcade de traitement. L'occlusogramme permet de développer une forme d'arcade naturelle, idéale et individualisée.

La forme d'arcade est conservée dans les cas de déviation dentaire, de déviation positionnelle, et dans les cas de dissymétrie squelettique légère où le traitement chirurgical n'est pas envisagé. En revanche, face à des déviations squelettiques plus importantes, la forme d'arcade n'est pas conservée. Elle est modifiée par la correction orthodontique des compensations dento-alvéolaires et sa forme définitive est déterminée à l'aide d'un gabarit. Ensuite les deux occlusogrammes supérieur et inférieur sont superposés sans tenir compte de la croix de référence, mais en faisant correspondre les milieux, ce qui simule l'acte chirurgical. Cette procédure originale permet de visualiser les déplacements dentaires à effectuer lors de la préparation orthodontique pré-chirurgicale.

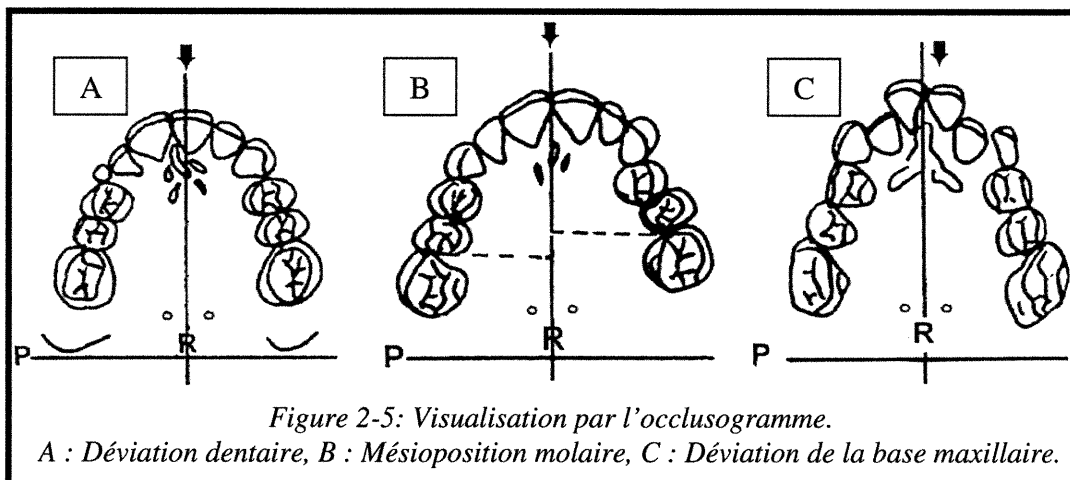
2.3.2.3. Exploitation

- Au niveau du diagnostic

Observation individuelle de chaque transparent

Sur chaque transparent de l'arcade supérieure, il est possible de visualiser :

- une déviation dentaire: elle est diagnostiquée par l'observation soit d'un encombrement plus important du côté de la déviation soit d'une agénésie ou d'une extraction;
- une mésioposition molaire ;
- une déviation de la base maxillaire ou une déviation positionnelle de la mandibule;
- une dissymétrie squelettique. (Marchal, 1998)



Superposition des deux transparents

La superposition des deux transparents va permettre d'étudier la coordination des arcades.

- Au niveau du plan de traitement

Analyse d'espace

L'occlusogramme permet au clinicien de faire des analyses d'espace, en particulier des dysharmonies dento-maxillaires. Celles-ci sont très précises et reproductibles et permettent de choisir le plan de traitement le mieux adapté au cas du patient, en particulier traitement avec ou sans extractions.

Simulation de l'occlusion

Les occlusogrammes représentent de véritables "set-up" en deux dimensions. Ils permettent de simuler si l'occlusion de fin de traitement est idéale ou encore s'il existe une dysharmonie dento-dentaire. White soutient que ce procédé personnalisé est plus fiable que les normes et moyennes de Bolton utilisées pourtant communément par les orthodontistes. L'occlusogramme idéal typique répertorie les caractéristiques présentées sur la figure 6. (White, 1982)

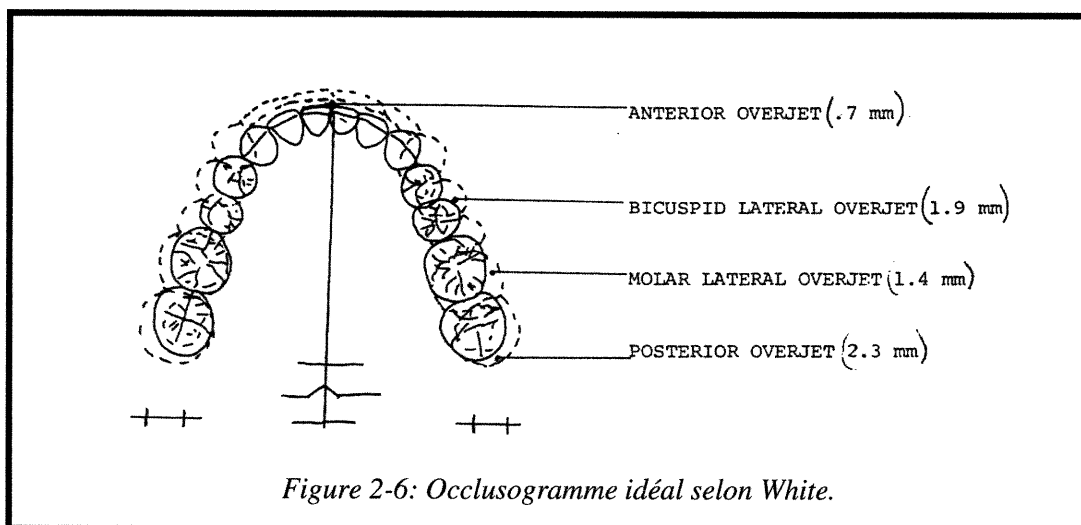


Figure 2-6: Occlusogramme idéal selon White.

Évaluation de plusieurs plans de traitement

Par cette simulation, l'orthodontiste peut tester plusieurs options thérapeutiques comme une extraction incisive. Cette technique est peu invasive, rapide et efficace.

2.3.3. Technique du montage tridimensionnel (set-up ou wax set-up)

Dans l'industrie, quand il s'agit de réaliser un bâtiment, un avion, une automobile, on soumet les données à un bureau d'études qui étudie un projet. Puis on réalise une maquette pour mieux se rendre compte de ce que sera ce projet.

Auparavant, l'orthodontiste recueillait l'ensemble des données: "la fiche d'observation, les mensurations, les examens radiographiques et céphalométriques", mais il ne disposait pas de maquette. Le set-up est précisément la maquette occlusale prévisionnelle qui lui manquait. Construite à partir de l'analyse céphalométrique et des décisions thérapeutiques, c'est une maquette grandeur nature de ce que sera la bouche à la fin du traitement. La méthode a été décrite en premier lieu par Kesling en 1945.

Le set-up consiste à découper les dents du modèle en plâtre et à les replacer, une par une, selon le plan de traitement établi. Cette technique, assez simple, ne demande pas de matériel spécial et peut se réaliser au laboratoire.

2.3.3.1. Méthode classique de réalisation d'un wax set-up

➤ Préparation des moulages

Les moulages doivent présenter une grande précision et une fidélité reproduisant les structures des faces occlusales. Lors de la prise d'empreinte, il faut prendre soin d'être le plus profond possible au niveau du vestibule afin de bien distinguer les procès alvéolaires. L'emploi d'un plâtre dur, de type plâtre "pierre", est indispensable afin que les reliefs occlusaux ne s'usent pas lors des manipulations sur l'articulateur. L'extrême dureté du plâtre permettra aussi d'obtenir une cassure nette lors de la séparation des dents à redisposer afin de faire un set-up sur moulage.

➤ Transfert des modèles sur articulateur

Idéalement, il est utile de monter les modèles sur un articulateur semi-adaptable en vue de la réalisation du set-up. Le modèle maxillaire est monté par le truchement

de l'arc facial alors que le montage du modèle mandibulaire est effectué par l'intermédiaire d'une cire d'occlusion en relation centrée.

- Phase préparatoire au set-up

Tracé préliminaire

Sans que cela soit indispensable, il est commode de tracer sur les dents, avec un compas, une ligne équidistante des bords libres ou des pointes des cuspidés de chaque dent. De même, sont tracés l'axe de la racine de chaque dent et la ligne des cuspidés vestibulaires et des bords libres de toutes les dents. Ceci permettra, au cours du montage, d'avoir un meilleur coup d'œil sur l'alignement vertical des dents, sur le parallélisme des racines et sur l'harmonieuse forme elliptique des arcades.

Par contre, il est indispensable de tracer la hauteur du trait de scie à donner sur le modèle, en moyenne 4 à 6 mm, et de numéroter les dents pour éviter toute confusion au cours du montage.

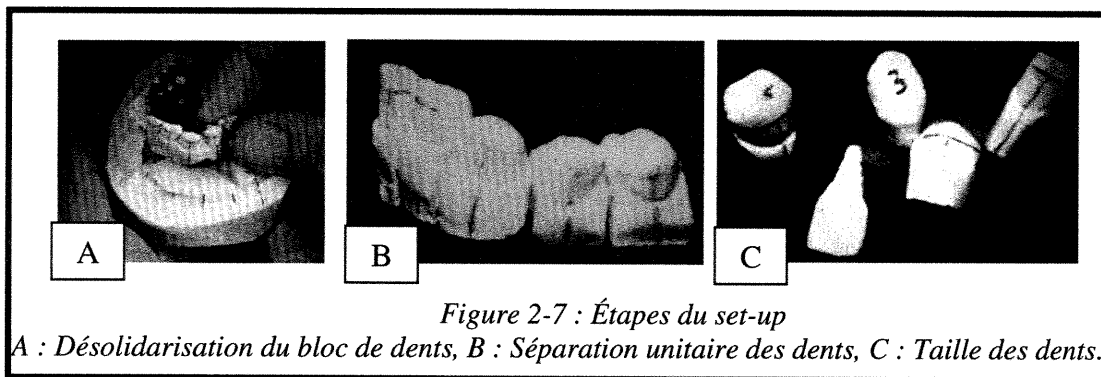
Séparation des dents

Kesling préconisait de couper selon le trait horizontal, puis de couper verticalement à travers les espaces inter-proximaux pour rejoindre le trait de scie horizontal. Mais cette technique abîmait les faces proximales des dents en plâtre et réduisait le diamètre mésio-distal.

Bailleul trouve impensable d'engager la scie, aussi mince qu'elle puisse être, entre les dents et propose donc de réaliser avec une fraise boule, une perforation de la table externe à la table interne au niveau de chaque intersection entre la ligne horizontale et la ligne verticale. La scie torsadée en plâtre est engagée dans le trou et le découpage commence en suivant le tracé. Les traits de scie verticaux ne doivent pas dépasser le septum gingival. Idéalement, la scie à plâtre sera démontée et remplacée par une fine scie à or ; les traits de scie verticaux seront prolongés jusqu'en dessous des points de contact. (Bailleul, 1967)

Il est ainsi possible de faire sauter un bloc de dents par pression digitale et par le même processus séparer les dents une à une.

Les dents sont alors traitées séparément en taillant la partie inférieure du bloc en forme de racine, soit avec un couteau à plâtre, soit à la meule. Les dents sont prêtes pour le montage.



➤ Set-up proprement-dit

Il est préférable d'aménager dans la partie édentée du modèle une gorge de rétention pour augmenter l'adhérence de la cire. Cette gorge est garnie d'un boudin de cire. Ces boudins gardent à la température ambiante une bonne plasticité qui permet de chercher plus facilement la position à donner aux dents par tâtonnements successifs.

Le set-up proprement dit peut alors commencer. Les dents sont alors déplacées ou remontées non pas dans une position idéale, mais dans la position que l'on peut obtenir par notre thérapeutique. Si les arcades sont symétriques, le set-up des deux hémi-arcades, maxillaire et mandibulaire, est suffisant. Il permet de mieux visualiser les déplacements qui seront à effectuer par rapport aux deux autres hémi-arcades non touchées.

Le point de départ est l'incisive centrale mandibulaire dont la position est déterminée par l'analyse céphalométrique et l'analyse des modèles. S'il y a supraclusion des incisives, ces dents seront montées à un niveau inférieur alors que les prémolaires seront montées an niveau supérieur de manière à niveler la courbe de Spee. Déjà à ce stade du montage, il est possible d'apprécier le déplacement à faire subir aux incisives : s'il s'agit d'une simple version coronaire on au contraire s'il s'agit de faire une gression des dents (déplacement dentaire parallèle à lui-même sans

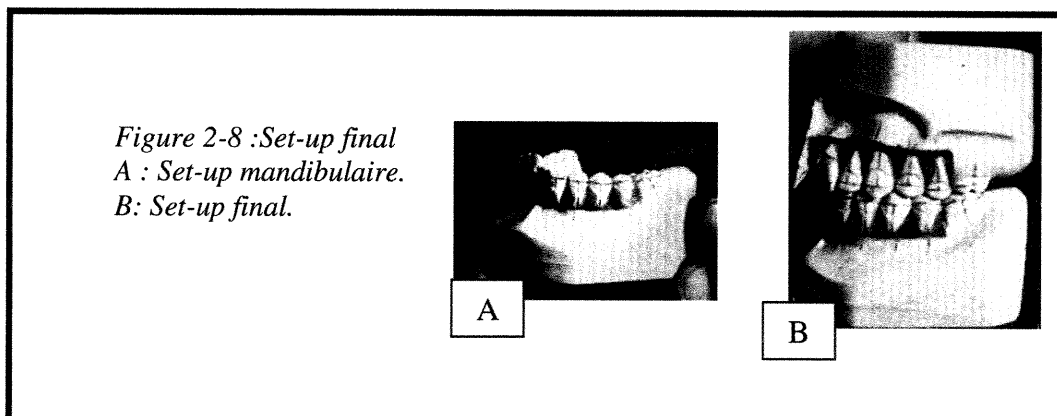
version ni rotation), ce qui suggère la notion de torque et par conséquent le choix de l'appareil le plus propre à donner ce mouvement.

Les dents suivantes sont montées sans problème particulier jusqu'à la seconde prémolaire. S'il n'y a pas la place pour la loger, il y a lieu tout d'abord de noter de combien le diastème est trop petit. Suivant le cas, on pourra envisager, soit de distaler la molaire un petit plus qu'il n'était prévu pour la préparation d'ancrage, soit d'avancer un tout petit peu plus les incisives, ceci dans le cas d'un manque de place minime. Théoriquement, le découpage de la première molaire et son positionnement se font à ce moment. Toutefois, cette dent peut être découpée dès le début du travail si elle est en malposition. Il faut alors tenir compte de son repositionnement pour calculer la place disponible.

De la même façon, on prépare le modèle et les dents de l'hémi-maxillaire supérieur. On fait glisser le modèle supérieur sur le modèle inférieur pour rétablir les rapports d'occlusion molaire, et on commence à articuler les dents.

A moins que l'on ne soit en présence d'une dysharmonie dento-dentaire, les dents se placent sans difficulté. S'il y a mésioposition d'une molaire, on commence le set-up par le côté où la molaire est située correctement. L'autre moitié du montage sera fait de la même manière.

Une dernière vérification s'impose : c'est le contrôle des dimensions transversales, en particulier au niveau des canines et des molaires, si on a eu à les déplacer. Le set-up est alors terminé. Si les modèles sont montés sur articulateur, on procède à leur équilibration.



➤ Établissement du set-up équilibré

L'équilibration du set-up se déroule en plusieurs temps: réglage des dents antéro-supérieures et postéro-supérieures puis affinement du montage en protrusion et en excursion latérale.

En résumé, le set-up équilibré fini doit avoir les caractéristiques suivantes :

- pas de prématurité, pas de proglissement ou de dérapage de fermeture.
- un maximum d'intercuspidation, avec une bonne répartition des contacts (au moins 3 points de contact au niveau de chaque dent cuspidée).
- pas d'interférences non travaillantes en latéralité droite ou gauche, de même qu'en propulsion.
- conservation de la dimension transversale (distance inter-canines et inter-molaires), à moins que l'on cherche à avoir de l'expansion.

2.3.3.2. Variantes

➤ Méthode décrite par KNIERIM

Cette méthode consiste à couler l'empreinte en 2 temps et évite le sciage horizontal.

Dans un premier temps, on coule du plâtre dans la portion des dents jusqu'à 4mm au-dessus de la gencive marginale de l'empreinte. Puis, on réalise une rainure vestibulo-linguale de 2 mm de large sur la rangée de plâtre, qui est délicatement retirée. Les racines de chaque dent sont alors séparées avec un disque et les dents sectionnées en cassant le plâtre au niveau du point de contact. Les racines sont ensuite taillées de façon à obtenir des racines plus étroites que les couronnes et les « dies » (modèles dentaires unitaires) sont réinsérées dans l'empreinte.

Dans un deuxième temps, on coule de la cire fondue jusqu'à engloutir les dies. Puis, on réalise ensuite la même rainure à la surface de la cire durcie. L'ensemble est alors investi dans un socle en plâtre.

Quand on sépare l'empreinte du modèle, les "dies" doivent rester plantés dans la cire, elle-même retenue sur le socle du modèle. (Knierim, 1975)

➤ Méthode décrite par BERY

Une technique similaire utilise des tuteurs placés avant la coulée.

Après avoir réalisé une empreinte du maxillaire et de la mandibule, on place des tenons sur chaque unité dentaire. Pour cela, on coule le plâtre sur un vibreur, légèrement au-dessus du collet des dents. Après avoir séparé individuellement les dents en plâtre, on les repositionne sur l'empreinte.

Ainsi on peut

- soit couler une couche intermédiaire de cire fondue englobant les tenons;
- soit entourer chaque tenon d'un manchon de cire ou d'un tube en plastique;
- puis l'ensemble est investi dans un socle en plâtre.

Grâce à l'espace de cire ménagé autour de chaque tenon, il devient facile de les déplacer ensuite dans les 3 sens de l'espace. (Béry, 1986)

➤ Méthode décrite par TIMSIT

Cette technique élégante évite de scier les dents et permet rapidité et précision dans la confection des modèles.

Cette méthode consiste à placer entre chaque dent des morceaux de « strips » (bandes) en acier. Puis, une empreinte à l'alginat assez liquide ou au silicone est prise avec un porte empreinte un peu plus grand tout en écartant les joues. L'empreinte ayant durci le tout est retiré. Si les "strips" restent coincés entre les dents, ils sont repositionnés sur l'empreinte. Dans chaque dent est alors coulée de la résine auto-polymérisable.

Ensuite, dans chaque dent sont enfoncés des cônes de plastique ou de laiton pour faire des tenons. Après séchage, les axes sont couronnés d'un boudin de cire et le plâtre coulé par-dessus. Sont alors obtenus des modèles avec des tenons durs et précis. (Bailleul, 1967)

➤ Méthode décrite par SEUNG

Récemment, Resnick et Seong ont proposé une technique similaire qui n'utilise que du plâtre.

Sur les empreintes à l'alginat, un fin trait de cutter est passé dans chaque espace inter-dentaire puis des séparateurs faits de films radiographiques de petites dimensions sont placés à ce niveau, séparant toutes les dents.

Du plâtre est alors coulé jusqu'à 3mm au-dessus de la gencive, pendant sa prise des tuteurs en métal sont placés au niveau de chacune des dents.

De la cire fondue est alors coulée recouvrant ces tuteurs en entier. Enfin, la base est fabriquée en coulant du plâtre par-dessus la cire.

L'empreinte peut alors être démoulée, les séparateurs enlevés et le set-up à proprement dit peut commencer, il est facilité par la chauffe des tuteurs. (Seung, 2000)

2.3.3.3. Intérêts et limites du set-up

Le set-up est un document supplémentaire: qui fournit un support maniable et commode matérialisant les objectifs de traitement dans les trois plans de l'espace. Cette maquette montre les mouvements à donner aux dents et les difficultés rencontrées pour réaliser les objectifs fixés. Ceci est important pour le bon déroulement du plan de traitement.

➤ Intérêts

Guide thérapeutique

Le déplacement à faire subir à chaque dent est mis en évidence, facilitant le choix de l'appareillage et vérifiant le plan de traitement. Des indications sont données en ce qui concerne :

- l'ancrage; il est qualifié d'ancrage A, B ou C
- l'extrusion ou l'intrusion; en identifiant si ces mouvements doivent s'effectuer au maxillaire à la mandibule ou aux deux arcades.
- les extractions; si le plan de traitement a montré qu'il fallait extraire, le set-up précise s'il est préférable d'extraire la première ou la deuxième

prémolaire, si les extractions asymétriques sont possibles, enfin si l'extraction d'une molaire très abîmée est possible. De plus, il permet de chiffrer avec précision la quantité de fermeture des diastèmes après avoir résolu le chevauchement.

Vérification de l'alignement des dents

Le set-up permet d'évaluer les dysharmonies dento-maxillaires ou dento-dentaires. En cas de dysharmonie dento-maxillaire, le rôle principal du set-up est de contrôler la possibilité d'alignement des dents. Le set-up objective encore les cas de dysharmonie dento-dentaire qui, souvent discrets, ne sont diagnostiqués que tardivement.

Mise en place de la thérapeutique

La maquette peut servir lors du façonnage des arcs utilisés. Le set-up peut être utilisé pour le positionnement des boîtiers en orthodontie linguale.

Contrôle du résultat en fin de traitement

Le traitement achevé, le set-up permet de comparer le projet avec les résultats obtenus en bouche afin d'en tirer un enseignement bénéfique dans le cadre de l'exercice professionnel.

Motivation du patient sur le choix thérapeutique

Pour le praticien, comme pour le patient, l'observation est plus aisée sur les modèles qu'en bouche. La nécessité d'appareillage ou d'extraction est parfois contestée par le jeune patient ou son entourage. Dans tous les cas, la comparaison du set-up aux moulages initiaux aidera le praticien à présenter de manière concrète les résultats qu'il pense obtenir.

Réalisation du tooth positioner

L'objectif premier du set-up de Kesling était la réalisation d'un « tooth positionner » (positionneur dentaire). Le "tooth positioner" est un appareil mobile, en matériau élastique, qui se présente comme une double gouttière enveloppant les couronnes des dents sur les deux arcades et les modelant selon le montage idéal. II

permet une contention et accessoirement la correction de malpositions mineures résiduelles.

Aujourd'hui, l'utilisation de gouttières en plastique à fin thérapeutique est le concept développé par la société Invisalign.

➤ Limites

Il ne faut pas perdre de vue que le set-up n'est qu'une maquette, une vérification du pronostic, et qu'il ne faut rien y voir d'autre, surtout pas un élément de diagnostic.

Dans l'absolu, le set-up n'est applicable que lorsque toutes les dents ont évolué. En période de denture mixte, la croissance n'est pas terminée, surtout verticalement. Cependant, certains auteurs utilisent le set-up en denture mixte. Les dents définitives encore incluses sont alors estimées et remplacées par des dents en résines de même diamètre. Dans ce cas, le set-up perd ses intérêts car les approximations du diamètre des dents définitives et de la croissance peuvent être sources d'erreurs.

Le set-up est établi d'après les diagnostics clinique et paraclinique mais ne prend pas en compte le tonus musculaire. Le praticien doit donc observer cliniquement d'éventuels problèmes du système neuro-musculaire du patient et apprécier les corrections possibles; puis, tout en tenant compte également de ses compétences, il choisit le plan de traitement pour enfin réaliser le set-up qui ne représente que le matériel osseux et dentaire.

L'inconvénient majeur réside au niveau du temps passé à réaliser le set-up et le prix de revient, s'il est fabriqué par un technicien. De plus, sa réalisation au laboratoire nécessite une collaboration étroite entre le prothésiste et le praticien.

2.4. ÉTUDE DES MODÈLES ORTHODONTIQUES ORIGINAUX

2.4.1. Observation rigoureuse

Une observation détaillée des modèles originaux, soit en occlusion, soit séparément, fournit la plus grande partie des données essentielles au diagnostic décrites précédemment.

2.4.2. Instruments de mesure

Les mesures peuvent être effectuées directement sur le modèle en plâtre avec des outils simples. Une règle, un pied à coulisse de Vernier et un compas à pointes sèches sont les instruments essentiels.

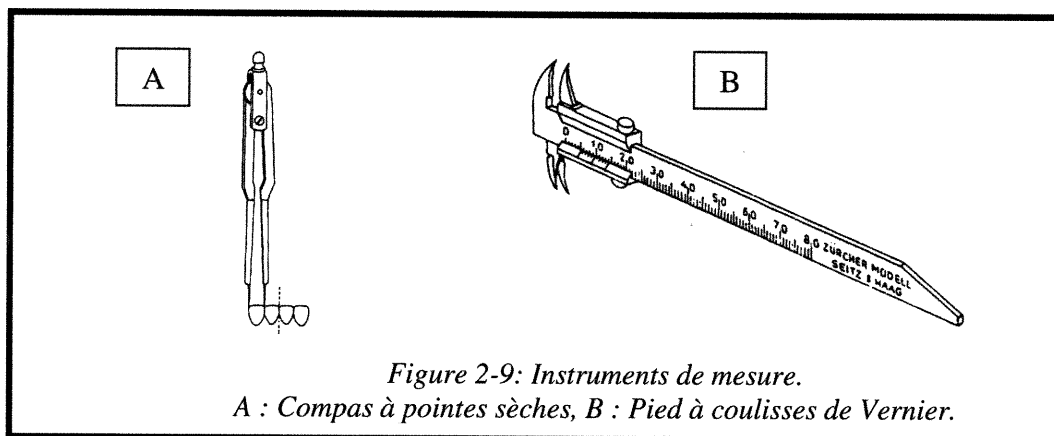


Figure 2-9: Instruments de mesure.
A : Compas à pointes sèches, B : Pied à coulisses de Vernier.

Surplombs vertical, horizontal, classe d'angle, distance inter-dentaire sont aisément mesurées avec une règle.

La largeur mésio-distale des dents est calculée avec un pied à coulisse. Moorrees décrit la méthode, le diamètre coronaire mésio-distal d'une dent est obtenu en mesurant les points de contact des surfaces proximales en maintenant le pied à coulisse parallèle à la fois au plan occlusal et aux surfaces vestibulaires. (Moorrees, 1957)

Si Hunter et Schirmer soulignent que cette mesure est fiable, précise et reproductible (Hunter, 1960; Schirmer, 1997), Burstone la considère difficile si elle

est effectuée directement sur le modèle (Burstone, 1979). En fait, certaines dents comme les secondes prémolaires supérieures et inférieures sont souvent sources d'erreurs de mesure. (Schirmer, 1997)

2.4.3. Grilles en plastique

Pour analyser la symétrie d'arcade, une grille en plastique appelée symétrisque peut être employée. En premier lieu, la ligne médiane maxillaire est tracée, la grille est placée en rapport avec cette référence. Ce système ne permet pas d'ajustements très précis mais peut être utile pour une appréciation de la situation clinique comme une disto/mésio-version dentaire, une symétrie des segments buccaux dans les sens sagittal et transversal. A la mandibule, la ligne médiane est construite à l'œil, ce qui rend, la méthode approximative.

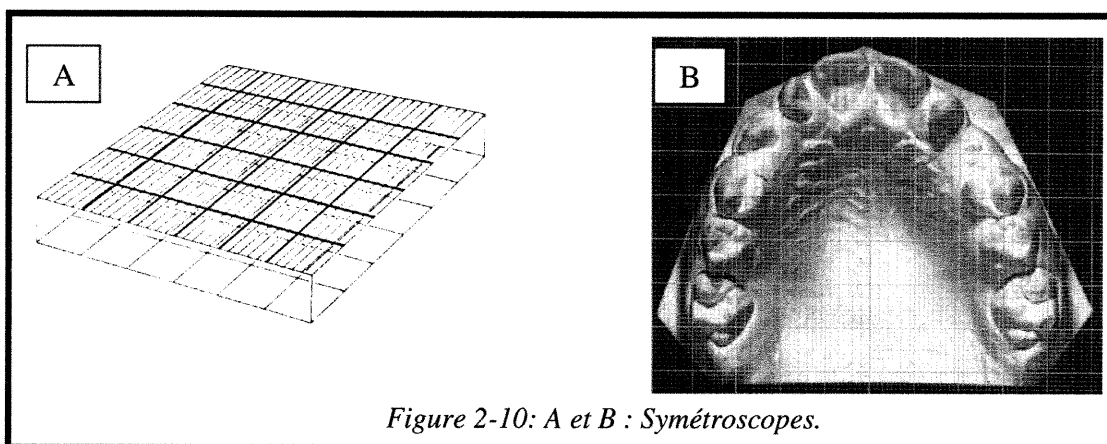


Figure 2-10: A et B : Symétrisques.

L'évaluation quantitative de la dysharmonie dento-maxillaire est souvent imprécise car elle implique un haut degré de jugement personnel. White propose une technique reproductible et objective. Se basant sur les travaux de Brader, qui décrit la forme idéale d'arcade comme une ellipse trifocale, White a développé une palette de grilles en plastique millimétrées de différentes tailles à adapter sur le modèle en plâtre. La seule mesure à réaliser pour le choix de la grille est la largeur intermolaires au niveau des deuxièmes molaires ou à défaut des premières molaires en ajoutant 4mm.

A titre d'exemple, une largeur de 60mm fait choisir l'arcade numéro 60. En général, l'arcade inférieure est une taille moindre que la supérieure. Ensuite, le diamètre mésio-distal des six dents antérieures est mesuré et retranscrit sur la grille par la pointe du compas.

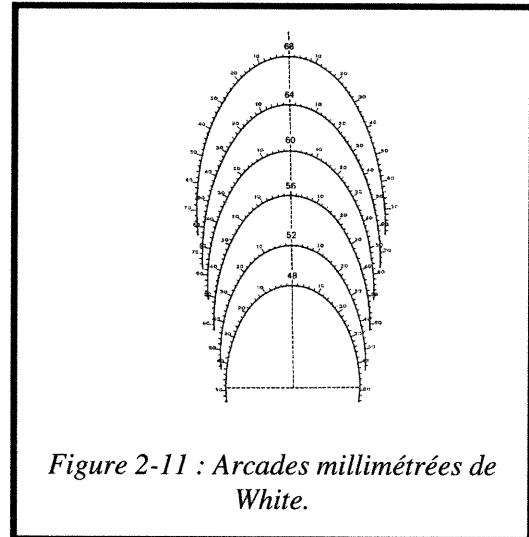


Figure 2-11 : Arcades millimétrées de White.

La valeur la plus distale de chaque quadrant est relevée. La grille est alors ajustée sur le modèle afin qu'elle soit centrée et coïncide avec les surfaces labiales des incisives mandibulaires. La valeur en millimètres de la position mésiale des premières prémolaires est notée. La quantité de longueur d'arcade nécessaire versus disponible est calculée par soustraction des deux valeurs. (White, 1977)

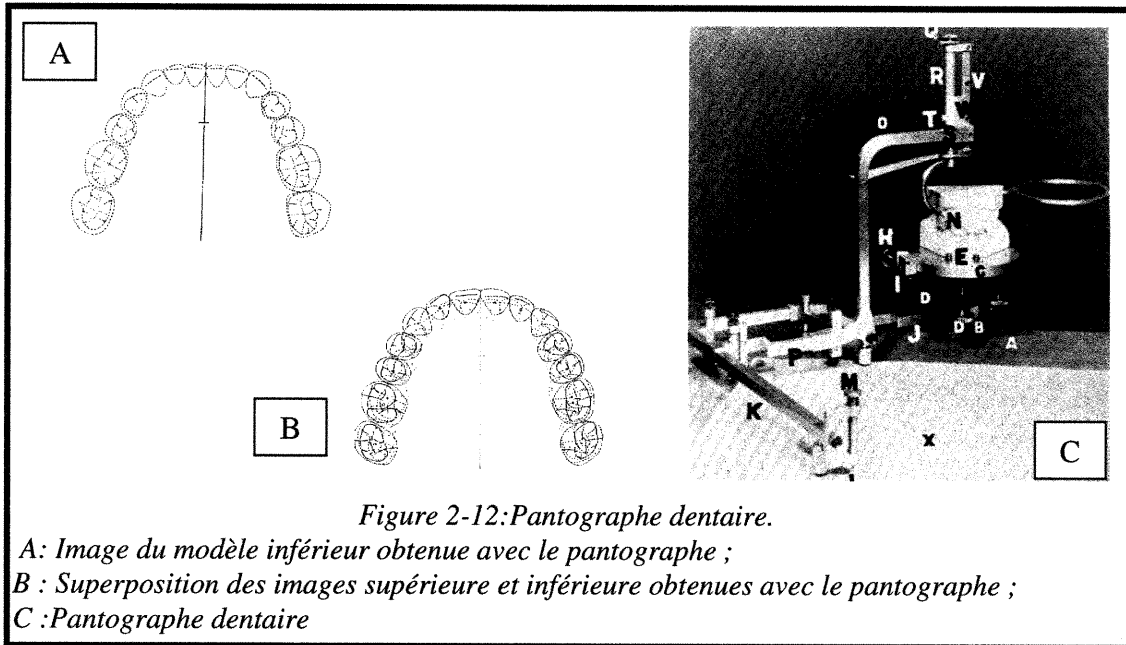
2.5. ÉTUDE DES MODÈLES ORTHODONTIQUES SUR UN SUPPORT

2D

De nombreuses techniques sont avancées pour se substituer aux vieux modèles en plâtre encombrants, lourds et fragiles. Souvent judicieuses et intéressantes, les techniques présentées ci-dessous fournissent une série de vues en deux dimensions.

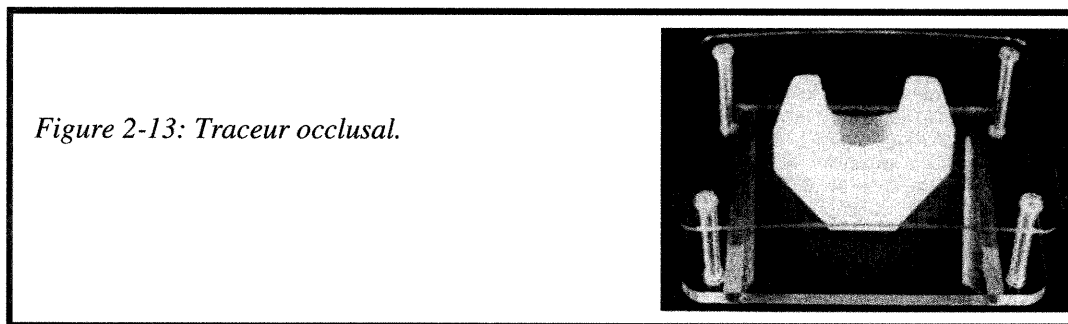
2.5.1. Pantographe dentaire

Cet appareillage volumineux et compliqué permet d'obtenir une copie précise sur papier en 1/1 de la vue occlusale des modèles. De plus, par un enregistrement de l'occlusion, les tracés obtenus peuvent être superposés afin de transcrire l'occlusion. (Stanton, Fish, Ashley-Montagu, 1931)



2.5.2. Traceur occlusal

White utilise une plaque de plastique, appelée traceur occlusal, afin de reproduire l'image du modèle en 1:1. Pour lui, cette technique est la plus fiable, la plus précise et la moins dispendieuse. (White, 1982)



2.5.3. Photocopie des moulages

Singh (1964) affirme que les instruments de géométrie utilisés par l'orthodontiste pour reproduire la forme d'arcade sont imprécis, d'utilisation fastidieuse et ne conviennent pas pour mesurer les dents. Il propose ainsi de réaliser une photocopie des modèles dentaires après avoir individualisé par des points, à

l'aide d'un crayon noir, les pointes des canines, les cuspidés buccales des premières molaires et deux points le long de la ligne médiane du palais. En effectuant des tests avec du papier millimétré, l'auteur remarque que la photocopieuse provoque un agrandissement en largeur de 0,5% au maximum et aucun en longueur. Dix modèles sont photocopiés et les mesures de largeur inter-canines, inter-molaires, longueur d'arcade sont comparées sur le modèle et la photocopie. L'auteur ne met en évidence aucune différence significative avec les modèles originaux et valide l'utilisation du photocopieur.

Yen (1991) va plus loin et utilise ce support pour calculer la largeur des dents et la longueur d'arcade et pour préfigurer la forme d'arcade finale. Il se base sur le fait que les mesures directes d'objets tridimensionnels ont un potentiel élevé d'erreur et de variabilité. Le système paraît fiable mais la précision est fort compromise lors de toute déviation dans le plan occlusal comme une forte inclinaison des dents.

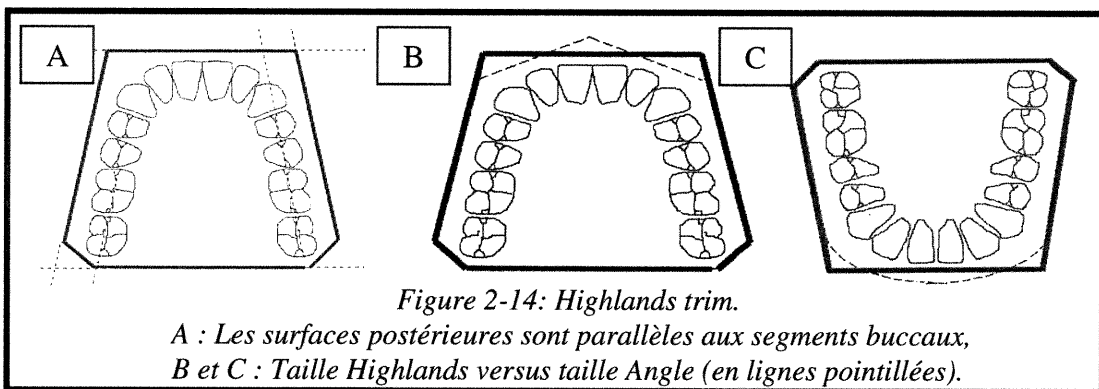
Champagne (1992), dans son étude, proscrit l'utilisation des photocopies pour le calcul de la longueur d'arcade et de toute analyse d'espace du fait de l'incapacité à dupliquer précisément un objet 3D en deux dimensions. L'auteur avance que la convexité des surfaces dentaires engendre une erreur dans le sens des augmentations de distance. Néanmoins, il conserve ce moyen pour comparer une forme d'arcade initiale et finale, se rapporter à la forme d'arcade avant traitement, communiquer avec des confrères ou encore faire une démonstration d'occlusogramme si aucune mesure n'est à réaliser.

De même, Schirmer (1990) contre-indique l'utilisation des photocopies. Au contraire de Champagne, il constate que les mesures sur le modèle sont plus larges que celles sur la photocopie, en moyenne de 4,7mm au maxillaire et 3,1mm à la mandibule pour ce qui est de la longueur d'arcade. Une telle différence est inacceptable pour une analyse orthodontique de précision et toute analyse d'espace ou de longueur d'arcade ne peut être réalisée par cet intermédiaire. L'agrandissement ou la réduction des images apparaissent quand les dents sont à distance de la surface

en verre de la machine. Les dents impactées ou non totalement éruptées sont agrandies d'autant que leur plus grande circonférence mesurable est éloignée de la surface en verre. L'impossibilité de mesurer précisément un modèle tridimensionnel dupliqué en deux dimensions peut être due à d'autres facteurs comme la structure convexe des dents, la courbe de Spee, les différences dans les inclinaisons dentaires, les déviations des dents de l'axe perpendiculaire ou la position chevauchée des dents.

Ainsi, de nombreux auteurs, comme Visessaksanti (1998) et Mc Cance (1991), conscients des erreurs de mesure que peut produire la photocopie, emploient ce document uniquement pour modèle de forme d'arcade pré-traitement ou pour former des arcs.

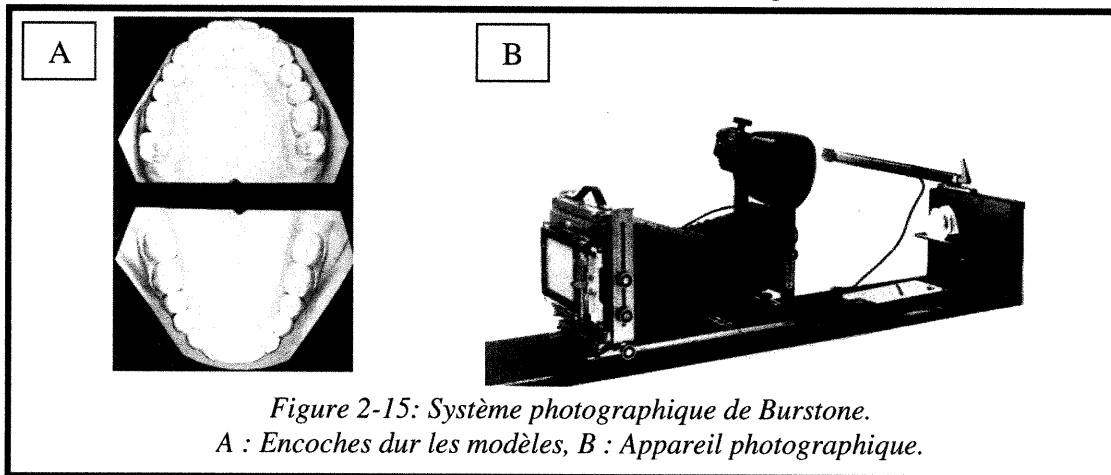
Dans ce but, Mc Cance (1991) propose une technique de taille particulière des modèles, le Highlands trim, pour faciliter leur photocopie. Cette taille est similaire à celle d'Angle mais la partie antérieure des modèles est parallèle à la postérieure. Les bords sont parallèles et le plus proche possible des segments buccaux. (McCance, 1991)



2.5.4. Photographies des moulages

L'orthoscan est un appareil photographique permettant de réaliser des photographies intra-orales 1:1 et des photographies de modèles dentaires. Malheureusement, la profondeur de champ est quasi-nulle et certaines références sur le modèle sont déformées et imprécises. (Chanda, 1973)

Burstone prône ainsi l'utilisation d'une photographie 1:1 des modèles d'étude. Avec cette technique, les inclinaisons atypiques des dents sont compensées. Le système est composé d'un appareil photographique Polaroid 4 x 5 pouces qui permet une impression quasi-instantanée en 1:1. Les modèles sont taillés en relation centrée et une encoche est effectuée sur leurs parties postérieures lorsqu'il sont en occlusion. Les modèles inférieur et supérieur sont successivement positionnés sur un rail complémentaire à l'encoche en vue occlusale et une photographie est prise de chacun. Ce procédé permet de superposer rapidement les deux images. (Burstone, 2001)



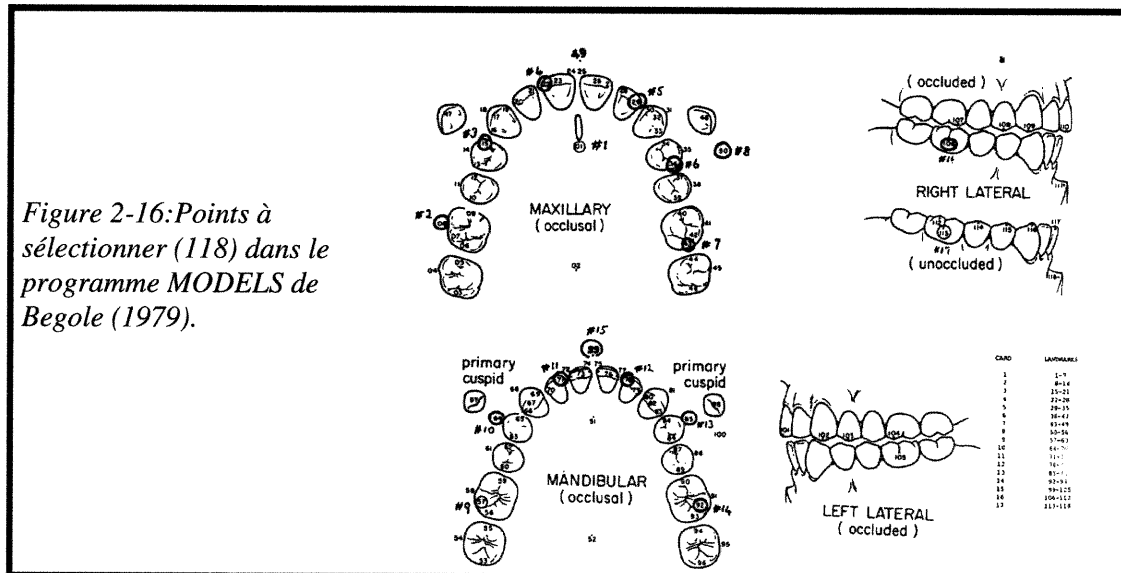
*Figure 2-15: Système photographique de Burstone.
A : Encoches sur les modèles, B : Appareil photographique.*

2.5.5. Numérisation 2D des moulages dentaires

2.5.5.1. Principe

L'évolution des technologies informatiques dans les années 1980 a offert de nouvelles perspectives pour l'obtention des données sur les moulages. Le principe de numérisation repose sur l'enregistrement d'un ensemble de points sur le modèle directement, sa photocopie ou sa photographie. L'instrument permettant l'enregistrement est relié à un ordinateur qui reçoit les informations et affiche schématiquement les points sur l'écran. La sélection de points spécifiques procure des indications au sujet des mesures dentaires et d'arcade, de la symétrie d'arcade, d'analyse d'espace...

Juste pour la digitalisation, au moins cent points sont requis dans les différents programmes développés; ce qui rend le processus long et peu applicable en pratique orthodontique quotidienne. Afin d'offrir des données dans les trois sens de l'espace, la numérisation peut s'effectuer sur les modèles en vues frontale, latérale et occlusale. Cependant il ne faut pas se méprendre, il s'agit d'un ensemble de vues en deux dimensions et non de réels modèles 3D.



2.5.5.2. Programmes

➤ Mesures orthodontiques diagnostiques

Tous les programmes informatiques proposent de calculer automatiquement l'ensemble des valeurs diagnostiques intra et inter-arcades de routine après digitalisation de points spécifiques. (Begole, 1979; Rudge, 1982; Yen,1991)

➤ Analyse d'espace

La longueur, la symétrie d'arcade et l'espace nécessaire versus disponible peuvent être étudiés. (Begole 1979 ; Yen, 1991)

Une forme d'arcade idéale et individualisée peut être déterminée selon la formule de Bonwill-Hawley et servir de référence pour la plupart des calculs d'analyse d'arcade. (Rudge, 1982)

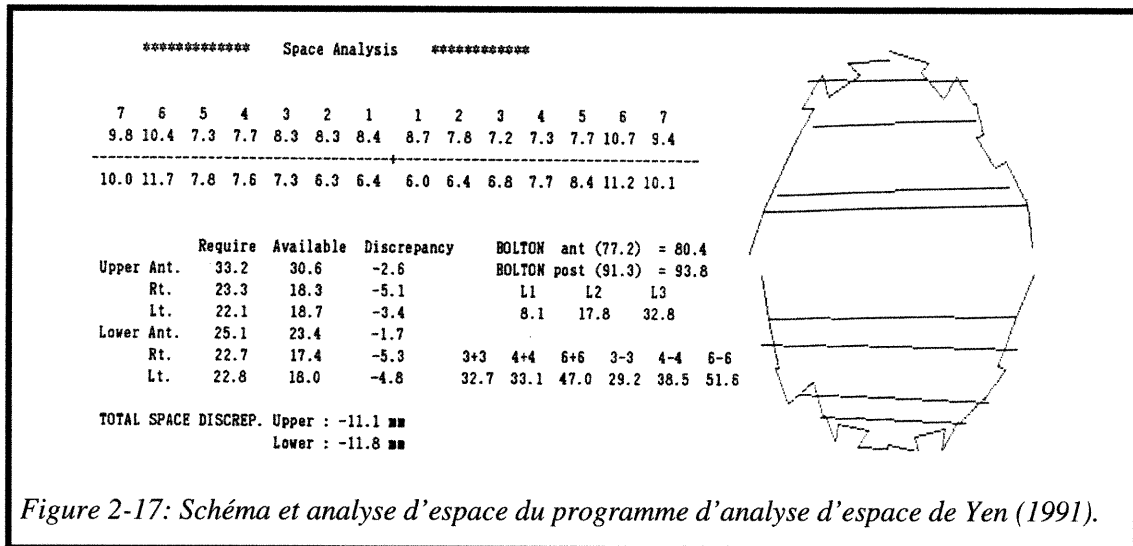


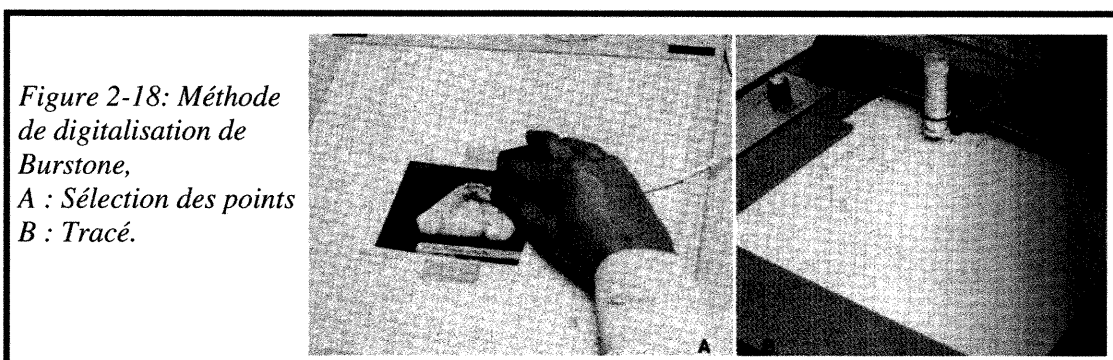
Figure 2-17: Schéma et analyse d'espace du programme d'analyse d'espace de Yen (1991).

➤ Occlusogramme 2D

Méthode de Burstone (Burstone, 1979)

Burstone, adepte de l'occlusogramme pour la réalisation du plan de traitement, a informatisé sa technique. Elle fournit les mêmes éléments que la technique standard mais est plus rapide et précise. Cet occlusogramme est qualifié de 3D car un tracé de radiographie latérale et une photographie des modèles sont utilisés. Cependant, seules les informations de la vue occlusale sont disponibles sur l'écran.

Les dents de la photographie 1:1 sont digitalisées au niveau des points de contact mésiaux et distaux ainsi qu'au niveau des pointes cuspidiennes buccales inférieures et linguales supérieures. L'ordinateur trace ensuite les dents de manière schématique.



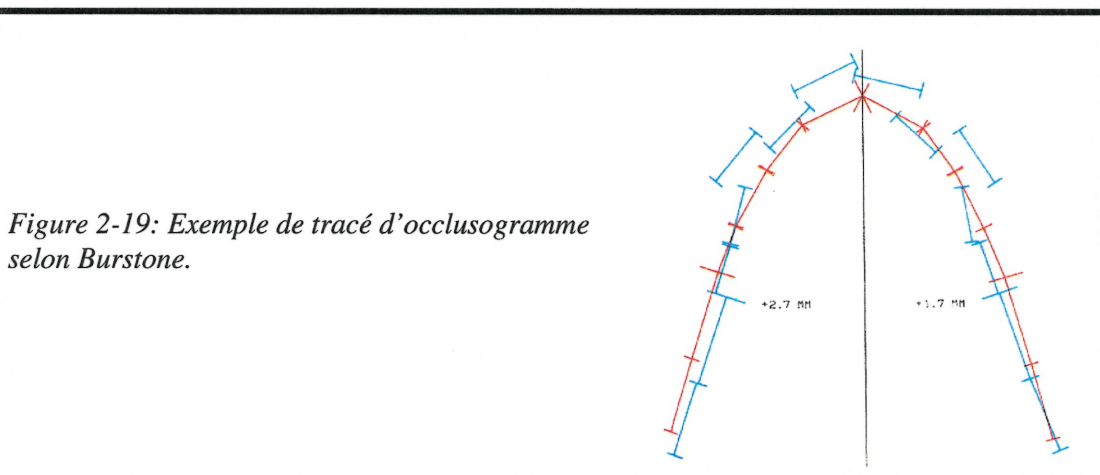
A ce stade, la largeur des dents est calculée par rapport à une moyenne donnée afin de mettre en évidence une erreur dans le processus de digitalisation ou l'existence d'une dysharmonie dento-dentaire pouvant compromettre une bonne inter-digitation finale.

La plupart des éléments pour la construction de l'occlusogramme sont décidés par l'orthodontiste selon les mêmes principes que la technique standard en fonction du cas précis et non pas selon des valeurs moyennes incluses dans le programme. Ainsi, les points suivants sont déterminés : point ligne médiane de traitement, point incisive inférieure, points pointes canines droite et gauche, points cuspidés mésio-buccales des premières et deuxièmes molaires inférieures.

L'ordinateur construit alors la forme d'arcade finale, à partir d'une formule de parabole pour la partie antérieure. A cette étape, les arcades initiale et finale inférieures apparaissent sur l'écran.

Une forme d'arcade supérieure coordonnée à l'inférieure est alors construite, la quantité d'overjet est choisie par l'orthodontiste. Celle-ci est en général de 1mm au niveau incisif et de 2mm au niveau canin.

Les dents sont placées sur les arcades finales et l'ordinateur calcule le manque d'espace dans les quatre quadrants. La décision d'extraire ou non est réalisée à ce stade. La malocclusion originale apparaît en bleu et la finale en rouge. La quantité de mouvement antéro-postérieur des molaires est notée en millimètres.



Méthode de Fiorelli (Fiorelli, 1999)

Fiorelli a développé un programme informatique pour réaliser un occlusogramme aisément et rapidement en corrélation avec la radiographie de profil. A la différence des techniques précédentes, les images ne sont pas des schémas de dents mais de réelles images des arcades dentaires. Ces images sont acquises par le truchement d'un scanner à plat qui fournit l'équivalent d'une photocopie des moulages.

Le procédé d'acquisition des données se déroule en quatre étapes :

- Digitalisation des modèles dentaires : sur les moulages inférieur et supérieur taillés classiquement sont individualisés trois points de contact assez éloignés les uns des autres. Les moulages sont alors placés sur un scanner à plat classique.
- Digitalisation de la radiographie céphalométrique de profil.
- Sélection des trois points de contact afin de simuler les relations inter-arcades lorsque les moulages apparaissent sur l'écran.
- Identification et sélection des mêmes points sur la radiographie et les moulages afin de les mettre en correspondance.

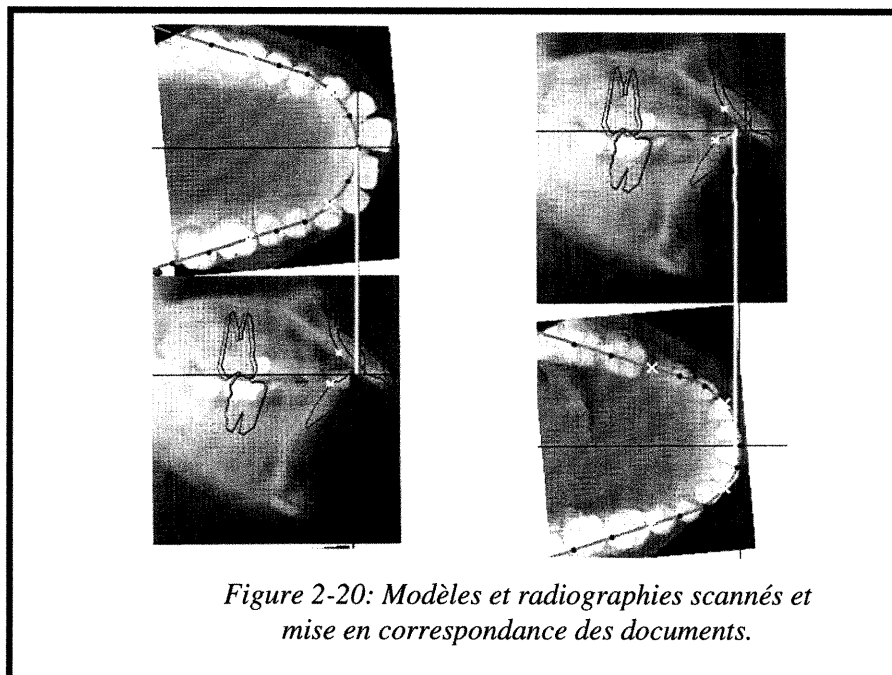


Figure 2-20: Modèles et radiographies scannés et mise en correspondance des documents.

La construction de l'occlusogramme peut alors débuter. La combinaison spatiale de la radiographie de profil et des vues occlusales des arcades permet d'obtenir des informations tridimensionnelles. Sur la radiographie, l'opérateur décide de la position finale des incisives, cette donnée est immédiatement transcrite sur la vue du moulage inférieur. L'opérateur choisit alors la ligne médiane de traitement et les dimensions transverses, ce qui permet de tracer sur les vues occlusales les formes d'arcades finales prenant en considération la modification des positions incisives et la nécessité de coordonner les arcades. Cette forme d'arcade peut être facilement ajustée par l'opérateur aussi bien dans sa portion antérieure que dans ses portions postérieures. La suite du processus est la même que pour un occlusogramme manuel. Lorsque le choix de l'option thérapeutique est réalisé, la perte d'ancrage est concrétisée par un nouveau tracé de la position molaire sur la radiographie.

Les limites principales de cette technique sont :

- le manque de précision dans l'enregistrement de l'occlusion;
- l'absence de prise en compte du coefficient d'agrandissement de la radiographie lors de la mise en correspondance avec les moulages;
- l'erreur dans la mesure des dents scannées si elles sont fortement inclinées.

➤ Set-up 2D

Méthode de Biggerstaff

Biggerstaff est le premier, en 1970, à présenter une approche informatique du set-up. Son système comprend un modèle mathématique en deux dimensions pour représenter les principaux repères anatomiques des surfaces occlusales dentaires et un programme informatique de simulations oscilloscopiques des corrections orthodontiques.

Sur des modèles en plâtre taillés conventionnellement, quelques points de repères dentaires et squelettiques sont individualisés au crayon. Ces modèles sont alors photographiés et les points de repère enregistrés en deux dimensions. Afin de reproduire l'occlusion, des points de repère du raphé médian et de sa projection orthogonale sur le modèle mandibulaire sont aussi enregistrés.

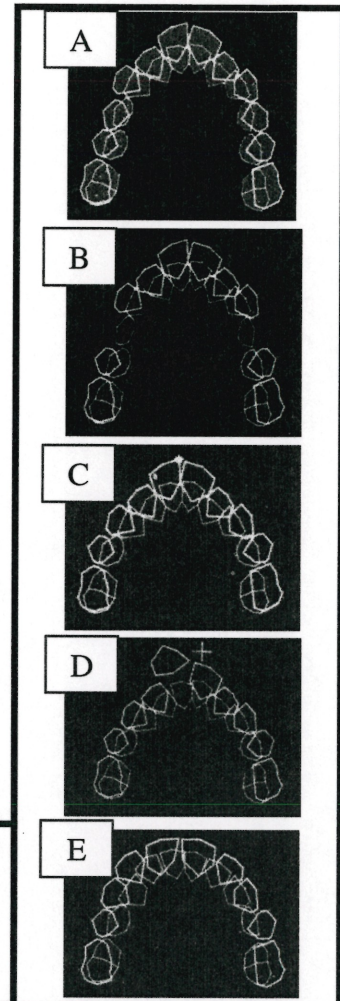
Une représentation graphique schématique des modèles en occlusion est alors disponible sur l'écran d'un oscilloscope.

Plusieurs fonctions sont disponibles :

- Extraction d'une dent ou d'un groupe de dents ;
- Rotation d'une dent ou d'un groupe de dents avec détermination du centre de rotation ;
- Translation d'une dent ou d'un groupe de dents.

Après de multiples manipulations afin de corriger toutes les dysharmonies de premier ordre, un set-up peut être obtenu.

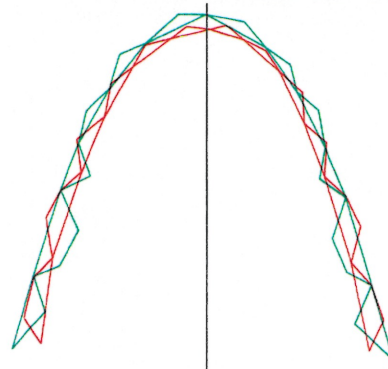
*Figure 2-21 : Set-up selon Biggerstaff,
A : Affichage après digitalisation des points, B:Extractions,
C et D: Rotation, E : Set-up final.*



Méthode de Burstone (Burstone, 1979)

En 1979, lorsque le Docteur Burstone présente son occlusogramme sur ordinateur, il y associe un programme afin de réaliser un set-up. Sur le même principe d'enregistrements de points spécifiques, une fois l'occlusogramme effectué, cet outil permet une visualisation en deux dimensions des rapports d'occlusion.

Figure 2-22: Set-up selon Burstone.



La partie en rouge est l'arcade inférieure. Sont matérialisés: les sillons mésio-buccaux et les pointes mésio-buccales et disto-buccales des cuspides.

La partie verte est l'arcade inférieure. Sont matérialisés: les sillons mésio-buccaux et les pointes mésio et disto-linguales des cuspides.

Ce set-up permet d'apprécier :

- l'occlusion molaire; dans l'exemple ci-dessus, le patient est en légère classe III dans la région molaire;
- l'occlusion canine; dans l'exemple ci-dessus elle est correcte;
- le rapport entre les cuspides buccales supérieures et les linguales inférieures;
- les rapports de largeurs bucco-linguales.

2.6. VERS UNE ÉTUDE DE MODÈLES ORTHODONTIQUES 3D

2.6.1. Support 2D

Un moyen 2D qui donne l'illusion de la troisième dimension est idéal pour le stockage des modèles et c'est dans ce but qu'a été développée l'holographie.

L'holographie est une méthode d'enregistrement et de reproduction de l'image d'un objet tridimensionnel mise au point en 1948 par Dennis Gabor.

2.6.1.1. Principe de l'holographie

Si l'on jette une pierre dans un bassin, il se produit une série d'ondes régulières qui s'étendent en cercles concentriques. La chute de deux pierres identiques en deux points différents du bassin engendrera deux ensembles de telles ondes qui vont se rencontrer et interférer. Si la crête de l'une heurte la crête de l'autre, elles vont se renforcer en une crête du double de leur hauteur. Là où une crête de l'une coïncide avec un creux de l'autre, elles vont s'annuler en une plage isolée d'eau calme. En fait, on rencontre toutes les combinaisons possibles, et le résultat final est un arrangement complexe de rides qu'on appelle un réseau d'interférences.

Les ondes lumineuses se comportent exactement de la même manière. Le type de lumière le plus pur dont nous disposons est celui produit par un laser qui envoie un faisceau dont toutes les ondes sont synchrones. Lorsque deux faisceaux laser se rencontrent, ils produisent des franges d'interférences faites de rides lumineuses et obscures qui peuvent être fixées sur une plaque photographique. Si l'un des faisceaux, au lieu de venir directement du laser est d'abord reflété par un objet, comme un modèle en plâtre, le réseau qui en résultera sera certes très complexe mais pourra encore être photographié. Cet enregistrement sera un hologramme. Une source de lumière cohérente projetée sur celui-ci permet de reconstituer l'image tridimensionnelle. Contrairement à une photographie ordinaire, un hologramme rend la dimension de profondeur et peut recréer la parallaxe (changement apparent de perspective qui se produit quand un objet est vu sous différents angles).

2.6.1.2. Utilisation du procédé d'holographie en orthodontie

En 1977, Schwaninger décrit le premier l'application de l'holographie en dentisterie. La technique rapportée nécessite un équipement coûteux et très spécifique. (Schwaninger, 1977)

Ryden puis Keating décrivent une technique simplifiée permettant d'obtenir des images holographiques de modèles d'étude à partir d'un laser mais reconstruites et donc visibles par la lumière blanche. Pour réaliser ce type d'hologramme, on place la plaque photographique entre l'objet et le laser. La lumière provenant du laser rencontre la plaque et la traverse en jouant le rôle du faisceau de référence. Puis elle poursuit son chemin, rencontre l'objet et se réfléchit vers la plaque, devenant ainsi le faisceau objet. A ce niveau, elle interfère avec le faisceau de référence et produit ainsi un hologramme. (Ryden, 1982; Keating, 1984)

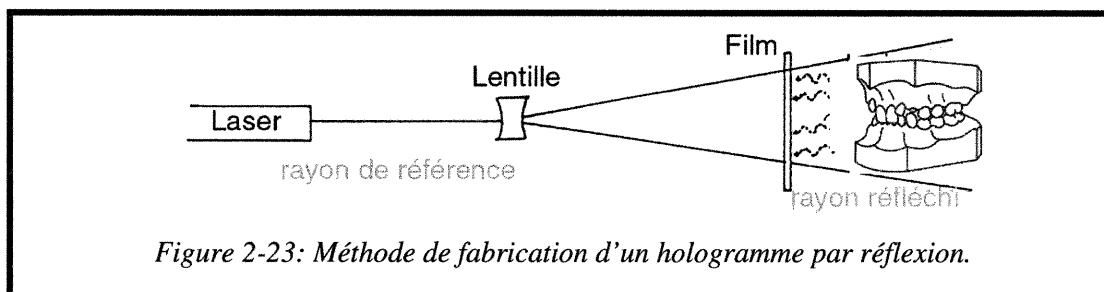


Figure 2-23: Méthode de fabrication d'un hologramme par réflexion.

La lumière réfléchié par l'hologramme donne une image, d'où le nom donné à ce procédé. Si l'hologramme par réflexion est observable à la lumière blanche, c'est parce qu'il laisse passer, sans les réfléchir, tous les rayons lumineux qui ne sont pas exactement de la même couleur que le laser qui a servi à le réaliser. Sans cet effet de filtrage, l'image serait floue et contiendrait toutes les couleurs du spectre. C'est pourquoi un hologramme observé à la lumière blanche est toujours de la même couleur que celle du laser utilisé à la prise de vue. Cette technique permet une utilisation plus aisée et accessible pour les orthodontistes.

D'un point de vue clinique, pour une analyse fine, un film holographique contient cinq vues: occlusales maxillaire et mandibulaire, frontale, latérales droite et gauche en occlusion.

Une première étude affirme que l'holographie permet aussi de réaliser des mesures précises en trois dimensions. Il est à noter qu'un seul patient fait partie de l'étude; ainsi il s'agit de résultats préliminaires. La précision est évaluée à 0,1mm. Cependant certaines difficultés demeurent, l'étude montre que des mesures telles la largeur inter-canines et la distance pointe canine-base du modèle sont difficiles à réaliser sur l'hologramme. De plus, la comparaison des mesures holographiques et de celles du modèle font suspecter une distorsion au niveau de la pointe canine qui est allongée dans sa largeur mésio-distale. (Keating, 1984)

Le coût de production d'un film holographique est similaire à celui d'un film photographique conventionnel. De plus, les films peuvent être rangés avec l'ensemble des données cliniques recueillies et ne présentent pas les inconvénients des volumineux modèles en plâtre. (Ryden, 1982)

Harradine vient compléter les travaux de Keating et réalise une étude auprès de 4 orthodontistes afin de confirmer l'intérêt clinique des hologrammes. Trois d'entre eux trouvent les hologrammes aussi informatifs et commodes que les modèles en plâtre. Les tests utilisés confirment que les hologrammes permettent des mesures précises et fiables. Cependant, plusieurs inconvénients sont soulevés :

- dans les cas de classe II division 2, en vue frontale, l'ombre des incisives maxillaires masque la région incisive mandibulaire. Ceci résulte de la technique utilisée et une vue supplémentaire serait nécessaire pour pallier à ce manque.

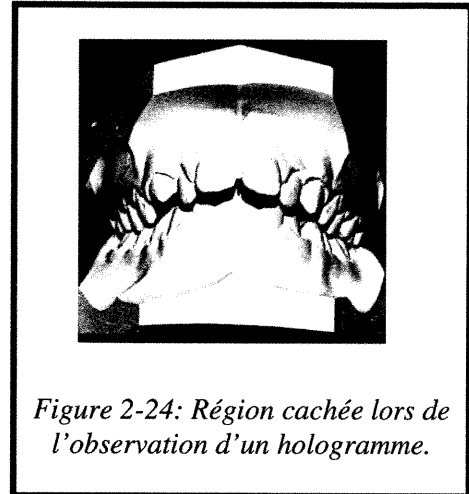


Figure 2-24: Région cachée lors de l'observation d'un hologramme.

- l'occlusion visualisée sur les hologrammes était erronée dans 4 cas sur les 56, ce qui souligne la vigilance à apporter lors de la réalisation de ces hologrammes. (Harradine, 1990)

Martensson et Ryden utilisent les hologrammes pour réaliser des superpositions. Les changements de positions dentaires sont ainsi visualisés en trois dimensions et mesurés. La précision, évaluée entre 0,03 et 0,43 mm, laisse penser que cette technique convient pour une utilisation de routine en orthodontie. (Martensson et Ryden, 1992)

2.6.2. Premières images 3D

2.6.2.1. Symétrgraphe

Korkhaus est l'un des premiers à développer un instrument mécanique pour mesurer les modèles en plâtre en trois dimensions. Cet instrument est totalement manuel, il nécessite un contact avec l'objet. Simple dans sa conception, il est lent et laborieux à l'utilisation. (Korkhaus, 1930)

Lebret utilise le symétrgraphe pour mesurer et tracer les contours transversaux et sagittaux médians du palais. Cet outil lui permet d'évaluer la croissance de cette structure anatomique, cependant il juge l'appareillage complexe. (Lebret, 1962)

2.6.2.2. Stéréographie

Van der Linden obtient les premières images 3D stéréographiques par l'intermédiaire de l'Optocom. Les coordonnées X et Y sont enregistrées en utilisant un microscope et la coordonnée Z par contact mécanique avec un modèle dentaire. Le procédé nécessite l'enregistrement de 387 points, soit approximativement 20 minutes par jeu de modèles pour un opérateur expérimenté. L'information tridimensionnelle est limitée puisque seule une perspective est disponible, de plus le matériel pour la reconstruction tridimensionnelle des images est cher et encombrant. (Van der Linden, 1972)

2.6.2.3. Reflex Metrograph

Scott, en développant le reflex metrograph, a notablement amélioré les possibilités d'effectuer des mesures 3D. Là encore il s'agit d'un système d'enregistrement de points mais sans contact direct avec l'objet.

Le principe utilisé pour le fonctionnement du Metrograph est le suivant : un objet positionné en avant d'un miroir semi-réfléchissant donne une image identique à égale distance derrière le miroir.

La mesure d'un point est effectuée en alignant un point lumineux situé à l'arrière du miroir et ce même point sur l'objet. La source lumineuse est connectée à un système coulissant de coordonnées tridimensionnelles de 30 centimètres de largeur. Le mouvement du système source lumineuse-système de coordonnées est traduit en impulsions électriques elles-mêmes transmises à l'ordinateur. (Scott, 1981)

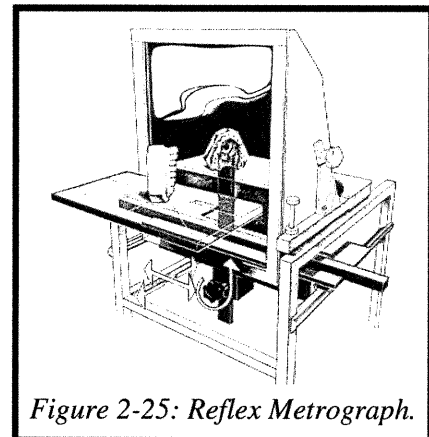


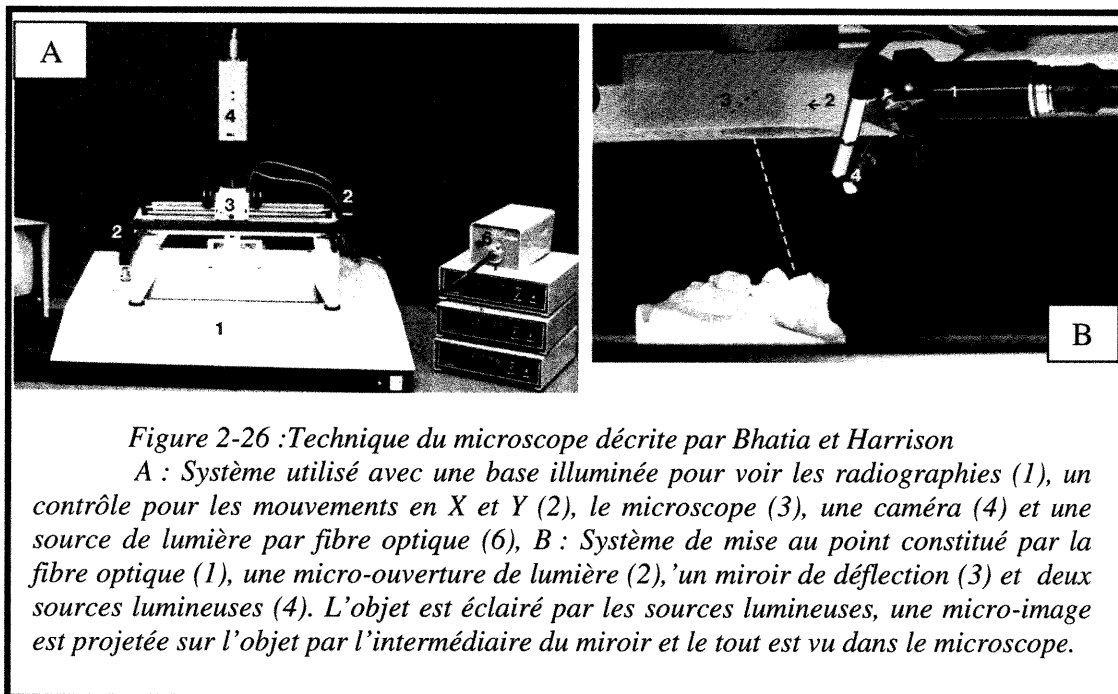
Figure 2-25: Reflex Metrograph.

Butcher, en l'utilisant directement en bouche sur les dents antérieures, a obtenu une précision de 0,128, 0,299 et 0,353mm pour les coordonnées X, Y et Z respectivement. (Butcher, 1981)

Takada et Richmond, l'employant sur des modèles en plâtre, ont testé et validé cet appareillage. Un des avantages de ce procédé est que le diamètre de la lumière est de 0,3mm et peut donc passer à travers les espaces interproximaux ou les points de contact là où un compas ne le peut pas. Cet appareil est facile à manipuler, sa résolution est de 0,1mm et sa précision pour les coordonnées en Z de 0,3mm. (Takada, 1983; Richmond, 1987)

2.6.2.4. Microscope

Bhatia et Harrison ont mis au point une technique optique avec un microscope afin d'augmenter la précision. Les coordonnées X et Y sont acquises par le mouvement du système porteur du modèle, la coordonnée Z est obtenue par le truchement du microscope. Un certain nombre de points sont utilisés pour tester la précision de cet appareil. Chaque point est observé au microscope, lorsqu'il est au focus, on en déduit sa coordonnée Z.



La précision est considérablement améliorée, elle est de 0,018, 0,017 et 0,031mm pour X, Y et Z respectivement. La procédure est longue et seule une automatisation du système le rend utilisable en pratique. (Bhatia, Harrison, 1987)

Dans toutes les techniques décrites ci dessus, l'appareil opère point par point, ce qui rend le procédé pénible. De plus seules quelques données dentaires de surface peuvent être obtenues. Ce n'est que plus récemment que la technologie a permis l'acquisition de véritables images de surface.

2.7. ANALYSE DE MODÈLES EN TROIS DIMENSIONS

Il existe de nombreux systèmes laser 3D commerciaux qui permettent de capturer des petites pièces avec grande précision et rapidité. Pourtant, ces systèmes ne conviennent pas à la géométrie dentaire qui est très complexe.

Depuis une quinzaine d'années, de nombreuses techniques pour obtenir des images dentaires 3D ont été développées. Leurs applications se divisent en deux groupes distincts : CAD/CAM « computer aided design and manufacturing » pour la réalisation de restaurations dentaires et l'orthodontie.

Dans la technologie CAD/CAM, le but recherché est l'acquisition de données d'une extrême précision d'un nombre réduit de dents. Dans cet objectif, des systèmes de digitalisation mécanique spécialement adaptés pour être utilisés directement en bouche ont été développés comme le DentiCAD (Rekow, Nappi, 1995). D'autres méthodes optiques ont été utilisées comme la mise en concordance manuelle de plusieurs vues dentaires (Ozaki, 1987), la stéréophotogrammétrie (Rekow, 1991), la technique holographique (Duret, 1988) et le principe de la triangulation qui trouve son application principale avec le célèbre CEREC (Mormann, Brandestini, 1989).

Pour notre sujet d'intérêt, l'orthodontie, le but recherché est l'acquisition de données d'une précision moindre que le CAD/CAM, soit au minimum 0,1mm, mais de l'ensemble des dents présentes en bouche.

2.7.1. Principales techniques d'acquisition des images 3D

A l'heure actuelle, trois techniques sont couramment utilisées en vision. Chacune d'entre elles est présentée alors que les variantes seront décrites individuellement lors de la présentation des articles.

2.7.1.1. Analyse stéréo ou stéréophotogrammétrie (Klette, 1998)

➤ Principe

Le principe de base est celui de la vision binoculaire. Quand deux photographies du même objet sont réalisées par deux caméras séparées par une courte distance, cela donne la perception de profondeur de cet objet. Ainsi, deux caméras sont utilisées pour capturer l'image de l'objet. Selon le principe de la parallaxe, les caméras sont à une distance telle que les images produites diffèrent.

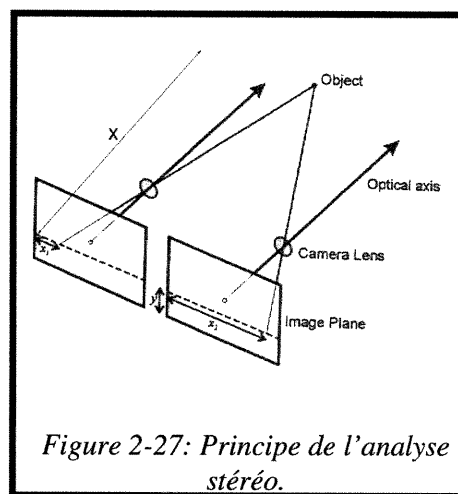


Figure 2-27: Principe de l'analyse stéréo.

Deux images de la scène sont créées et chaque point de la scène est projeté en deux points, un dans chaque caméra. Pour trouver la distance X entre un point donné et les caméras, les distances x_1 et x_2 doivent être mesurées. Ces dernières sont évaluées par une mise en correspondance des deux images. Puis, grâce aux paramètres connus tels la distance entre les caméras et leurs longueurs focales, il est possible par un simple calcul géométrique de calculer la distance X et ainsi la position dans l'espace de ce point.

➤ Applications

Bien que cette technique semble simple, elle est peu utilisée pour l'extraction des structures 3-D. Le problème principal est la mise en correspondance des deux images qui permet de calculer x_1 et x_2 . Le cerveau fusionne merveilleusement les deux images produites par les deux yeux cependant il est très difficile de construire un algorithme capable de mettre en relation les deux images d'une scène donnée. Pour

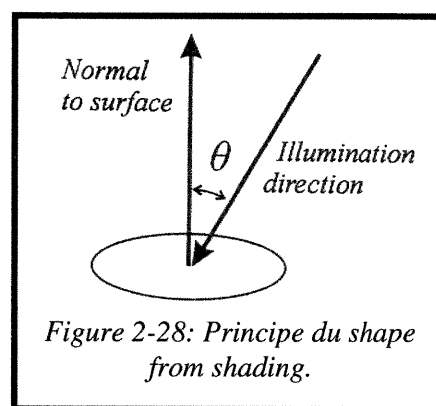
des objets aux limites géométriques bien définies, comme un angle ou une brique, le travail est simplifié, mais pour des surfaces comme la peau ou les dents, le processus est très complexe.

2.7.1.2. Shape from shading

➤ Principe

La lumière d'un objet, perçue par les yeux, dépend de trois facteurs principaux : l'illumination globale liée à l'intensité lumineuse, les propriétés de réflexion de l'objet et l'inclinaison de sa surface.

Dans cette méthode, le modèle le plus simple, lambertien est utilisé : la lumière réfléchie dépend de l'angle entre la direction de la source lumineuse et la surface de l'objet. Si la direction de la source lumineuse est connue, il est facile d'en déduire l'orientation de chaque partie de l'objet, voire la forme de l'objet.



➤ Applications

Si ce procédé semble facile, plusieurs facteurs compliquent son utilisation en pratique dentaire. Tout d'abord, pour que la loi lambertienne ci-dessus s'applique, plusieurs contraintes s'appliquent : l'objet doit être parfaitement mat et les propriétés de réflexion de la lumière doivent être similaires pour l'objet entier.

D'emblée, cette technique ne semble pas idéale pour être exécutée directement en bouche puisque les dents ne répondent pas aux principes précédents mais il ne serait pas exclu de l'utiliser sur des modèles dentaires.

Le second écueil est que la même lumière peut résulter de surfaces d'inclinaisons différentes.

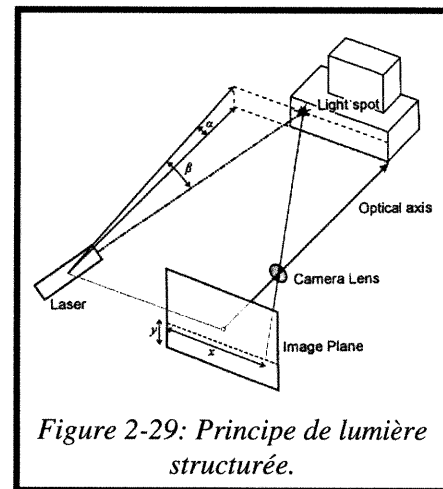
Pour répondre à ces problèmes, la technique peut être améliorée par la stéréophotométrie. Cette méthode est une extension du shape from shading. On emploie deux sources de lumière et une caméra. Deux images sont prises, une

première sous une des sources de lumière, une seconde sous l'autre source. La caméra n'est pas déplacée, il n'y a donc pas de problème de mise en correspondance comme dans la technique stéréo. La lumière réfléchiée par un point donné varie dans chaque image et ainsi plus d'informations sont fournies que dans la technique standard.

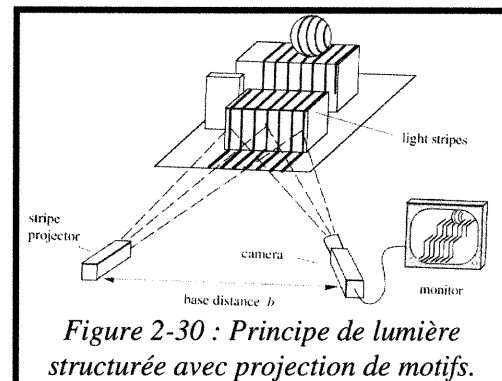
2.7.1.3. Lumière structurée

➤ Principe

La technique de lumière structurée est la projection de motifs connus de lumière sur un objet pour en déduire sa forme. La méthode la plus simple et la plus couramment employée est la projection d'un point ou d'une ligne de lumière par un laser. La caméra est fixe et la lumière balaye la scène. Par simple géométrie, selon le principe de la triangulation, il est possible de définir les coordonnées dans l'espace d'un point éclairé par le laser.



Une extension de cette technique est la projection d'un motif à rayures continu. Ceci peut être réalisé par un laser avec une lentille cylindrique ou par un projecteur.



➤ Applications

Pour obtenir un modèle 3D entier de l'objet, il est nécessaire d'obtenir plusieurs vues reconstruites de cet objet en le plaçant sur une table rotative.

Comme la revue de littérature à suivre le démontre, cette méthode est la plus communément utilisée, c'est aussi la plus rapide. Plusieurs variantes peuvent être

envisagées: multiplier le nombre de caméras pour diminuer les zones d'ombre, projeter des motifs en deux dimensions comme des rayures parallèles, des rayures colorées...

La résolution sera en relation directe avec la finesse du motif de lumière utilisé et de la résolution de l'image de la caméra.

2.7.2. Applications en orthodontie

2.7.2.1. Facteurs importants à prendre en compte pour scanner des modèles orthodontiques

Afin de mesurer les paramètres orthodontiques nécessaires à l'établissement du diagnostic, la précision des modèles scannés doit être au moins de 0,1mm.

Un problème fréquemment rencontré lors des acquisitions d'information 3D sont les lacunes retrouvées dans les images des objets numérisés. Elles sont la conséquence des zones de l'objet réfléchissant peu le rayon laser ou encore des zones non visibles par la caméra du fait de la forme de l'objet.

Pour un usage fréquent et de routine, on attend un procédé facile et rapide.

2.7.2.2. Stéréovision ou photogrammétrie

Le premier à avoir utilisé cette technique est Berkowitz en 1971. Il emploie le stéréophotographe pour disposer d'un véritable plan des reliefs de l'objet.

A l'époque, ce principe permettait d'étudier les modifications au niveau du palais lors des traitements orthodontiques chez des patients présentant des fentes labio-palatines et le syndrome d'Apert. La résolution était de 0,5mm en profondeur et 1mm en latéralité. (Berkowitz, 1971)

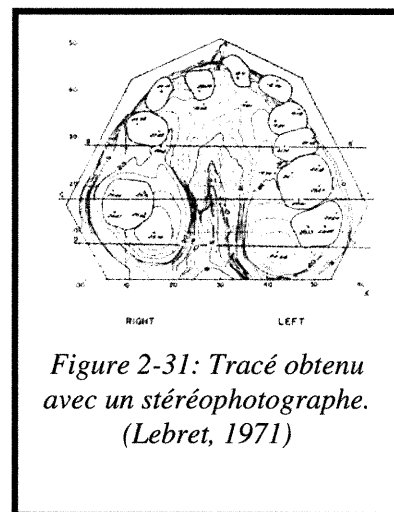
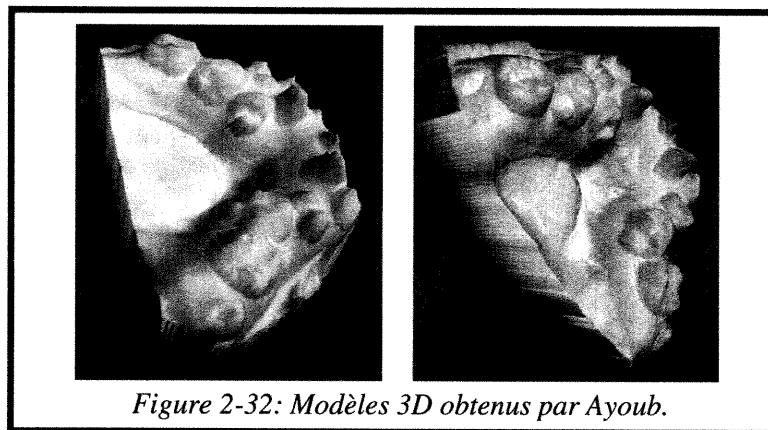


Figure 2-31: Tracé obtenu avec un stéréophotographe. (Lebret, 1971)

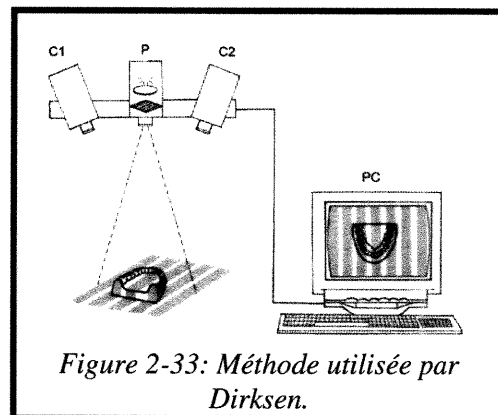
Plus récemment, Ayoub (1997) a mis au point un système pour l'acquisition d'informations 3D selon un principe photogrammétrique légèrement modifié. Afin de faciliter la mise en correspondance des images obtenues par chaque caméra, l'auteur a perfectionné la technique en capturant deux images :

- Une première sous éclairage classique.
- Une seconde en projetant une texture ou des motifs.

Le temps imparti pour une image est de 1/25 seconde. La méthode présentée est peu onéreuse; cependant la précision de 0,2mm est un peu faible pour les mesures réalisées habituellement.



Dans le même concept, Dirksen et al. (1998) ont exposé leur procédure pour l'acquisition de coordonnées 3D sur des modèles en plâtre. Celle-ci consiste en la projection de franges foncées et claires parallèles entre elles et alternantes.



Cette méthode permet de définir les coordonnées dans l'espace de 150 000 points (figure 34). La précision obtenue est de 200 microns au minimum.

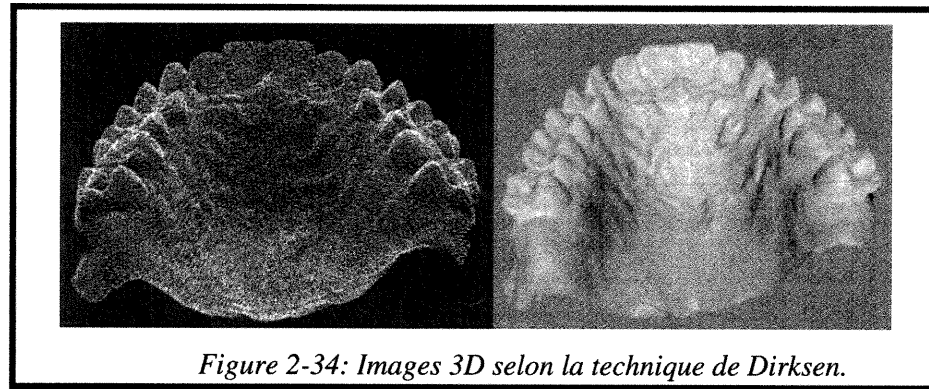


Figure 2-34: Images 3D selon la technique de Dirksen.

2.7.2.3. Shape from shading

Yamany et al. (1997) proposent un système de vision permettant la construction tridimensionnelle de l'occlusion dentaire du patient par le truchement d'une caméra intra-orale.

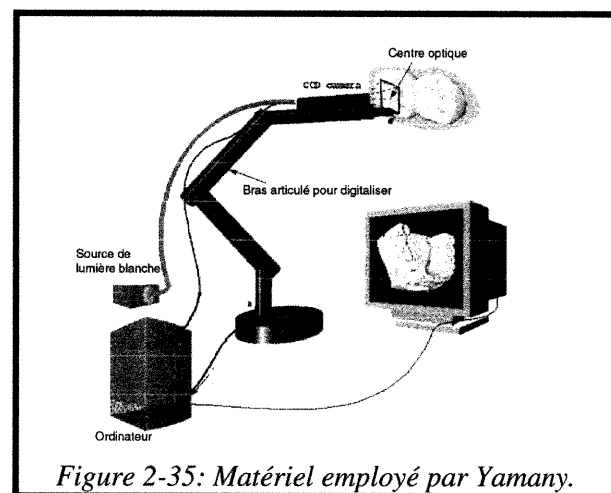
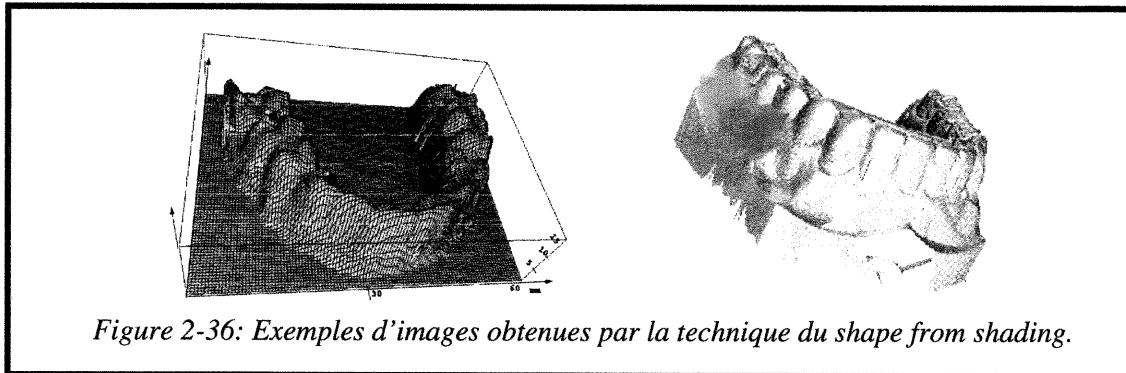


Figure 2-35: Matériel employé par Yamany.

La technique du shape from shading est utilisée afin d'extraire l'information 3D d'une séquence d'images 2D. La technique doit être adaptée car plusieurs conditions sur lesquelles se base le principe même du shape from shading ne sont pas vérifiées. Les principaux problèmes sont :

- La projection de l'objet n'est pas perpendiculaire car la caméra est trop proche de celle-ci; on utilisera donc une approximation avec une projection en perspective.
- Le système n'est pas lambertien du fait de la structure de la dent mais aussi de la pellicule salivaire déposée sur sa surface. Pour compenser cette difficulté, des filtres sont utilisés.
- La source lumineuse de la fibre optique doit être la seule présente.

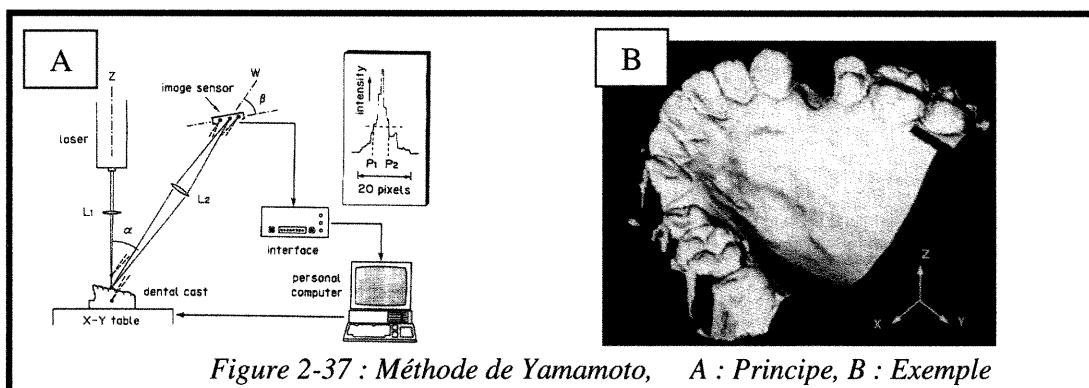
La précision des images est évaluée à 0,23mm cependant face aux multiples difficultés rencontrées dans cette technique, de nombreuses approximations sont effectuées.



2.7.2.4. Lumière structurée

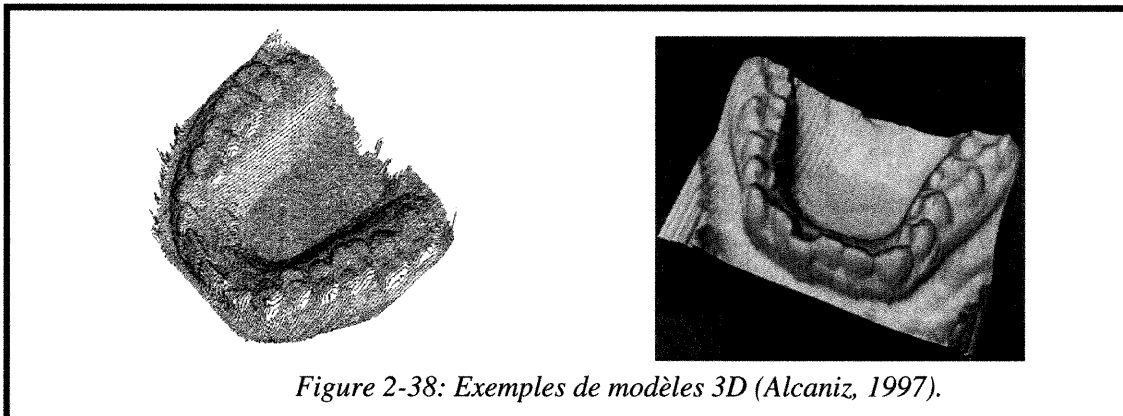
La majeure partie des articles repose sur une technologie conçue selon le principe de la lumière structurée.

Yamamoto (1991) a décrit son système d'obtention d'images en trois dimensions de modèles en plâtre. Un rayon laser est projeté sur le modèle en plâtre, l'intensité de lumière réfléchie est recueillie par le détecteur d'image. Cette information est transmise à un ordinateur qui calcule la profondeur en relation directe avec l'intensité. Pour les coordonnées X et Y, le modèle est placé sur une table et le mouvement de celui-ci lors du scanning est directement contrôlé par l'ordinateur. Cet appareil est donc automatique. La durée pour scanner une arcade est de 13 minutes et la précision est de 0,1mm dans le plan horizontal et 0,05mm en profondeur. Cependant, la portion latérale des dents n'est pas disponible. La perte de données dans cette région est due à la forme de l'arcade dentaire qui ne permet pas au rayon laser placé au-dessus du modèle d'atteindre cette zone. (Yamamoto, 1991)

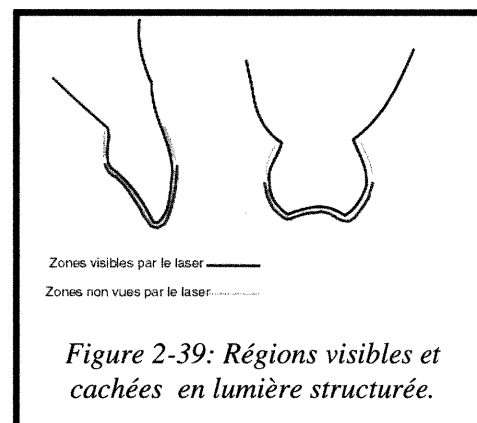


Kuroda (1996) a décrit l'acquisition de modèles 3D par l'intermédiaire d'un scanner laser. L'appareillage est composé d'un laser projetant un rayon sur le modèle dentaire, de deux caméras vidéos enregistrant les rayons réfléchis, d'une table X-Y et d'une table R pour réaliser une rotation du modèle. Quarante minutes sont nécessaires pour l'acquisition d'une arcade dentaire, la taille de l'image est de 1Mb. La précision est bonne puisqu'elle est évaluée à 0,05mm. Le problème principal est la difficulté à mesurer certaines régions anatomiques comme le vestibule au niveau incisif lorsque les incisives sont sévèrement buccalées.

Alcaniz (1997), dans le cadre du projet Magallanes, propose un système similaire pour obtenir une digitalisation 3D à partir d'une empreinte ou d'un modèle en plâtre. La précision est de 0,1mm, 0,29mm et 0,19mm pour les axes X, Y et Z respectivement.

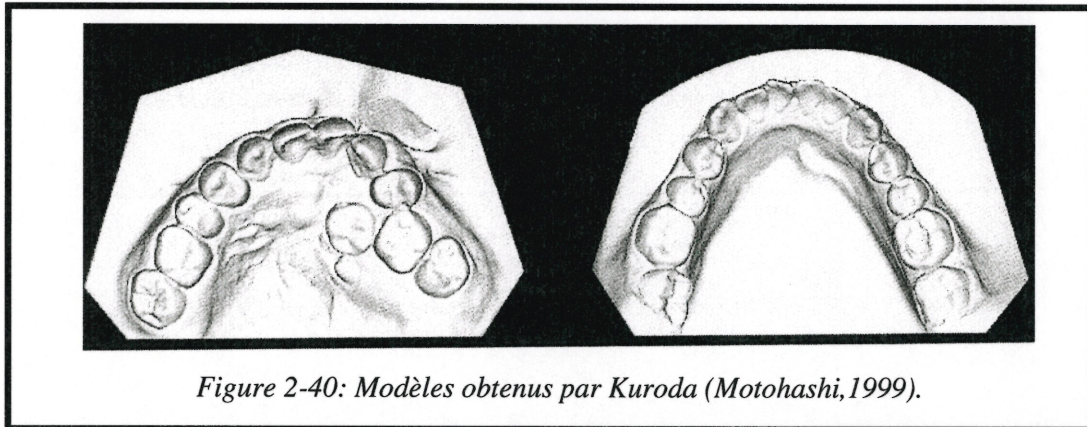


La carence principale de ce système est la perte de données des régions latérales du modèle. Ainsi, certaines zones ne sont pas visibles par les caméras du fait de la concavité des dents.

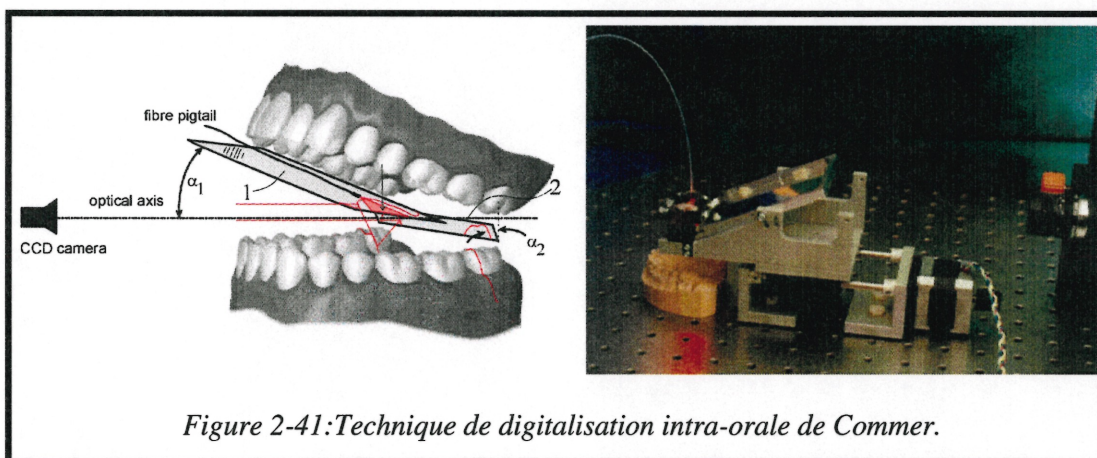


Pour minimiser les secteurs de perte de données sur l'image en trois dimensions, Kuroda améliore son système et propose, en 1999, de scanner le modèle dentaire selon deux directions différentes : sagittalement et antéro-postérieurement.

Les données sont ensuite assemblées pour reconstituer une image complète. 5000 points par seconde sont enregistrés et il faut compter 90 minutes pour l'obtention d'un jeu de modèles électroniques.



Commer (2000) a développé un prototype afin de scanner les dents directement en bouche. Il est constitué d'un laser, d'une caméra CCD, d'un ordinateur et de miroirs pour compenser le fait que certaines zones dentaires ne sont pas visibles directement lors d'une digitalisation intra-orale.



Certaines qualités en font un outil intéressant :

- Il n'est plus utile de réaliser une empreinte ou encore un modèle en plâtre.
- L'appareil ne devra rester en bouche que 1 à 2 minutes, ce qui est équivalent au temps nécessaire pour la prise d'empreinte à l'alginate.
- La précision est satisfaisante, environ 0,04 mm.

Pendant, si la théorie rend ce concept acceptable pour une utilisation directement en bouche, il n'en est pas de même en pratique. En effet, l'appareil est trop encombrant et n'a, pour l'instant, été utilisé que sur des modèles en plâtre. Sa taille devrait être réduite d'au moins 20% pour espérer réaliser des scanners intra-oraux. Si un des deux miroirs était supprimé, la tension pour le patient serait moindre mais au moins 25% de l'information serait perdue. Ce prototype, même s'il est prometteur, reste donc à améliorer.

Hirogaki (2001) propose de numériser les données du modèle en plâtre dans quatre directions différentes, puis de reconstruire une image globale. Ainsi, quatre données sont obtenues : côtés droit et gauche, région occlusale et région labiale antérieure.

Ce procédé permet d'augmenter la précision et la qualité de l'image dans les régions d'encombrement important où la définition est en général moindre.

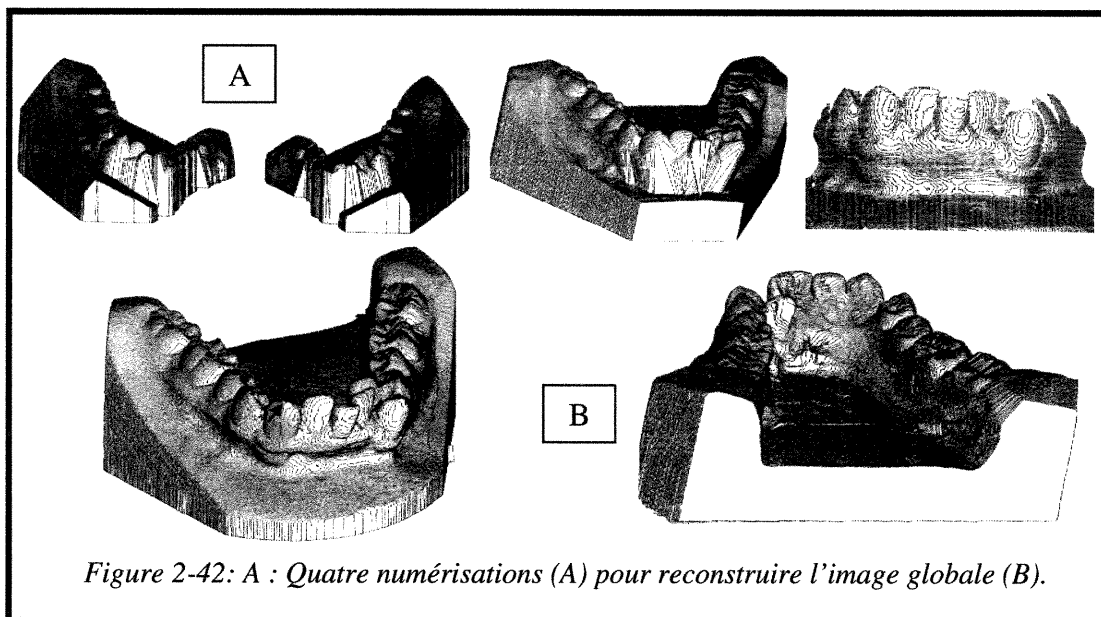
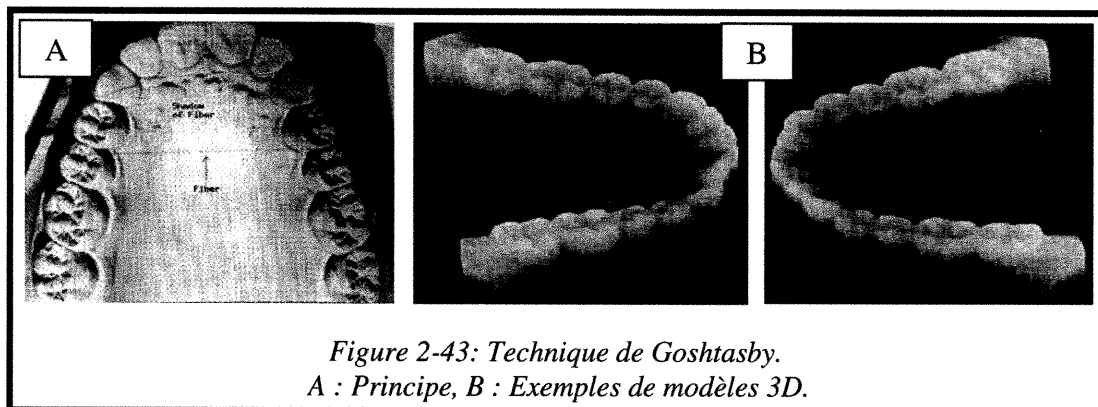


Figure 2-42: A : Quatre numérisations (A) pour reconstruire l'image globale (B).

2.7.2.5. Lumière structurée soustractive :

En 1997, Goshtasby a développé un système d'acquisition de modèles 3D original. A l'inverse du principe de lumière structurée classique, l'objectif n'est pas d'enregistrer un point lumineux sur l'objet mais un manque de lumière. Illuminant l'objet, la lumière blanche utilisée est bloquée à un endroit précis par une fibre très fine comme un cheveu, créant une ombre sur le profil de l'objet.

La fibre balaye l'objet et la géométrie de chaque ombre qui en résulte est enregistrée par la caméra pour déterminer les coordonnées 3D de l'objet en se basant sur le principe de triangulation. La résolution est de 100 microns et la durée de manipulation est de 20 minutes.



*Figure 2-43: Technique de Goshtasby.
A : Principe, B : Exemples de modèles 3D.*

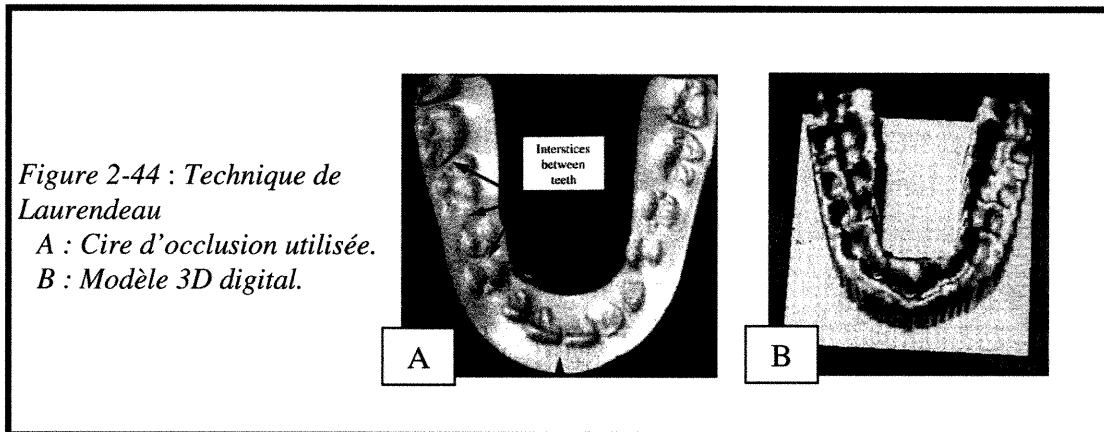
2.7.2.6. Absorption de lumière

Une méthode originale, décrite par Laurendeau (1991), emploie la cire d'occlusion pour l'acquisition des images des deux arcades. Le principe est basé sur l'absorption de lumière dans un milieu dispersif et utilise des caméras CCD standard.

La luminosité perçue par un observateur est fonction des positions de la source, de l'observateur et de l'objet, de l'orientation de la surface de l'objet relativement à la source et à l'observateur, des propriétés physiques du milieu dispersif et des propriétés de réflexion de la surface de l'objet.

Par des choix judicieux du milieu de dispersion et de la géométrie d'acquisition de l'image, il est possible de trouver la profondeur des points à la surface d'un objet et ainsi le profil 3D de cet objet.

Le principal problème de ce procédé est qu'il autorise seulement la reconstruction de la partie occlusale des dents et non de la géométrie globale ou encore de la limite gingivo-dentaire. De plus, l'appareillage est encombrant pour une utilisation de routine.



2.7.2.7. Programmes développés en recherche

L'association de l'informatique et de modèles 2D permet de réaliser les mesures classiques des paramètres orthodontiques et peut servir d'outil de communication, mais l'acquisition de véritables modèles électroniques en trois dimensions permet d'accéder à de nouvelles informations comme la simulation de traitement et l'étude du mouvement dentaire.

➤ Mesures de distances

Motohashi (1999) a comparé le diamètre mésio-distal de toutes les dents d'un modèle en plâtre et du même modèle digitalisé. Aucune différence significative n'a pu être mise en évidence et la différence maximale entre les deux méthodes utilisées était de 0,2 mm.

Commer (2000) qui a réalisé des tests similaires de précision pour des distances entre deux points de référence est arrivé aux mêmes conclusions. Cependant, l'auteur précise que la valeur utilisée est une moyenne de mesures répétées, et qu'une mesure prise individuellement peut avoir une différence maximale de 0,6mm. Il impute une telle valeur à la résolution et à la précision limitées par numérisation laser.

Alcaniz (1997), utilisant comme Motohashi et Commer la lumière structurée, a conclu que les mesures digitales peuvent se substituer aux mesures manuelles tout en conservant une grande précision.

Cependant, Hirogaki (2001), reconstruisant une image globale à partir de plusieurs vues, a mené une étude sur la précision des mesures après avoir digitalisé six modèles, celle-ci s'est avérée seulement de 0,3 mm.

➤ Séparation des dents

Comme le précise Laurendeau (1991), bien qu'il soit simple pour l'œil humain de séparer les dents, c'est une tâche complexe à réaliser avec un algorithme de vision. La méthode qu'il utilise est propre à sa technique décrite ci-dessus.

En premier lieu, l'ordinateur trouve un rectangle circonscrivant les zones d'indentations. Ensuite, un point postérieur médian est défini. L'ordinateur trace toutes les lignes ayant pour origine ce point et reliant l'extrémité buccale et linguale de l'empreinte. Pour ce faire, il considère que les régions buccales et linguales correspondent à des coordonnées Z faibles puisque la cire n'est pas mordue à ces endroits alors que les dents correspondent

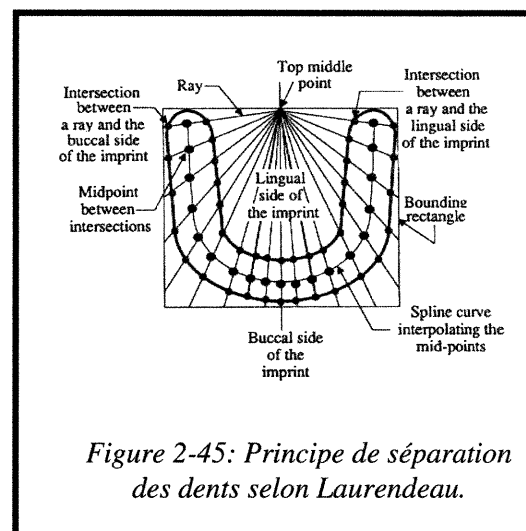


Figure 2-45: Principe de séparation des dents selon Laurendeau.

à des régions dont les coordonnées en Z sont importantes. Le centre de chacun des segments "point buccal-point lingual" est ensuite individualisé.

L'ensemble de ces 19 points définit la courbe de l'arcade pour l'empreinte. Sur cette courbe, les coordonnées en Z sont lues et traduites sur un graphique. Les pics de large amplitude correspondent aux interstices entre les dents, les vallées correspondent aux dents et les plateaux correspondent à une absence de dent ou encore à un espace large entre deux dents

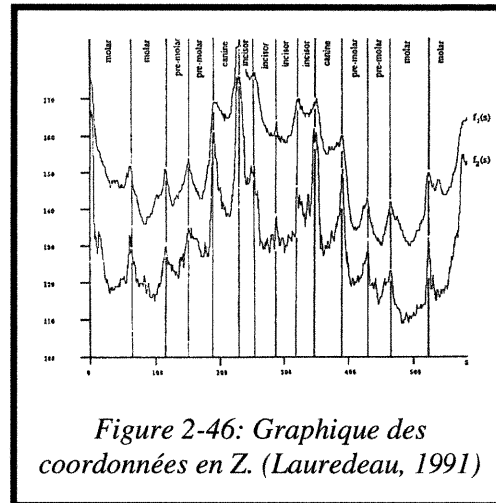
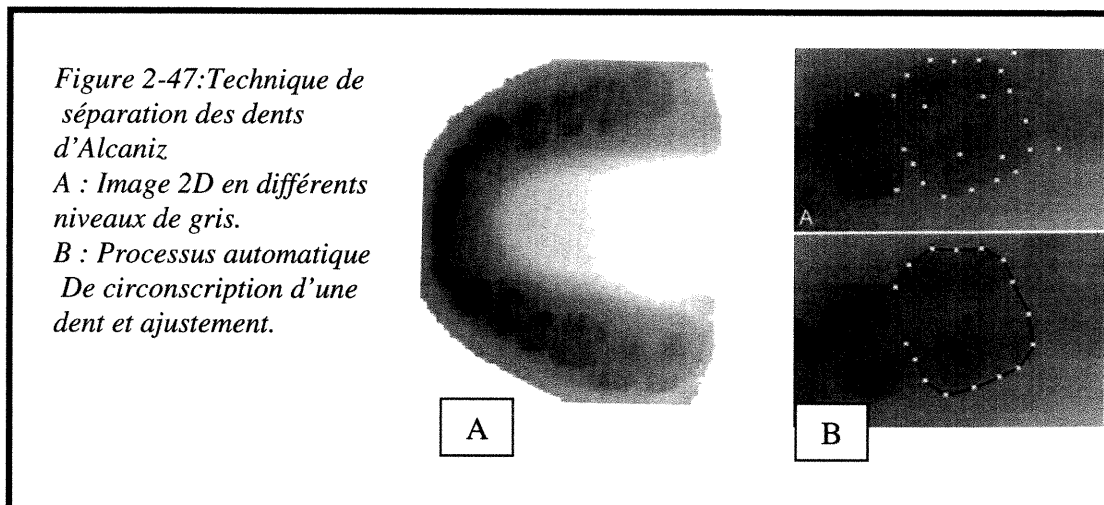


Figure 2-46: Graphique des coordonnées en Z. (Lauredeau, 1991)

La technique est novatrice et insolite mais elle nécessite l'intervention d'une lecture de graphiques parfois complexes et menant à des erreurs d'interprétation; de plus, elle semble difficile à appliquer lors de malocclusions sévères et lorsqu'une dent est fortement inclinée ou en dehors de l'arcade.

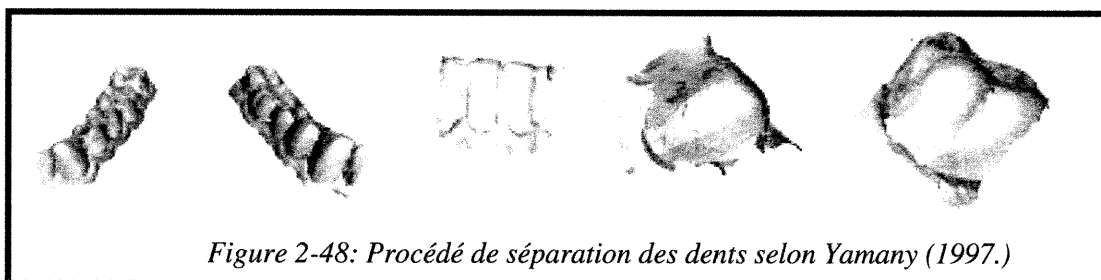
Alcaniz (1997) réalise cette segmentation en séparant la dent de la gencive. Il a adopté un système semi-automatique, qu'il juge plus fiable qu'un système totalement automatique, dans lequel le manipulateur identifie la dent et sa position.

Le travail s'effectue sur une image 2D où les coordonnées en Z sont matérialisées par différents niveaux de gris : la numérisation étant obtenue d'une empreinte, les niveaux blancs sont les points les plus proches et les niveaux noirs sont les points les plus éloignés. Le système demande au clinicien de localiser plus ou moins précisément le centre des dents en commençant par la dent la plus postérieure à gauche et en balayant l'arcade vers la droite. De cette manière, la position et le type des dents sont facilement identifiés. Un processus automatique pour circonscrire la dent est alors activé. Il est basé sur un contour circulaire approximatif en fonction de la largeur moyenne d'un type de dent, du centre et des différents niveaux de gris. Quelques erreurs peuvent apparaître à ce niveau mais le clinicien a la possibilité de réaliser des ajustements avant de définir la forme définitive.



Cette méthode, relativement simple sur les prémolaires et sur les molaires, se complique lors de la segmentation des incisives et des canines plus sujettes aux zones d'ombre.

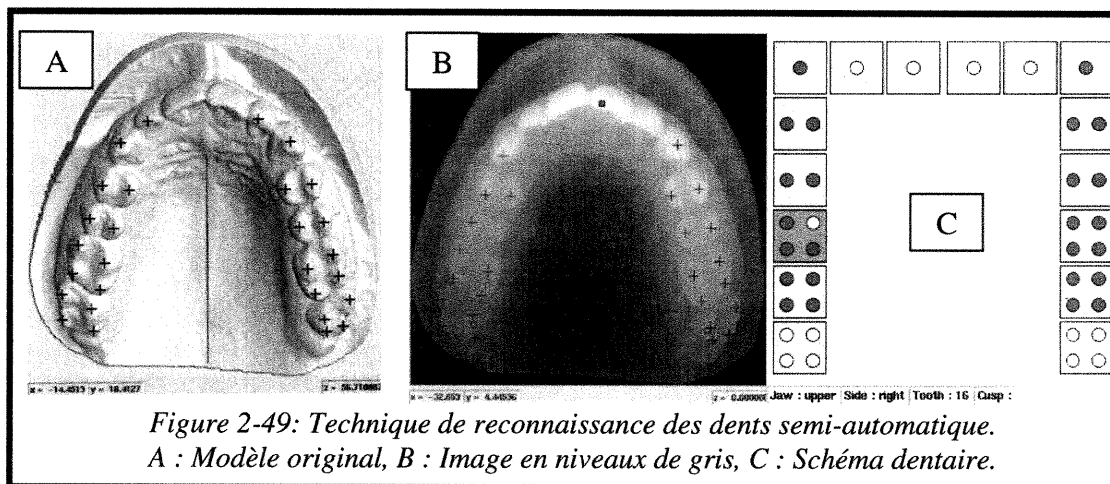
Yamany (1997) utilise les données nécessaires à la technique de *shape from shading* lors de l'acquisition des images pour séparer les dents. Il s'intéresse aux changements de direction des normales de deux régions voisines. Par un algorithme assez complexe, il peut ainsi séparer les segments postérieurs de l'antérieur et, pas à pas, chaque dent individuellement.



Une technique moins aléatoire est de réaliser la séparation des dents selon un mode manuel. Motohashi (1999) utilise un programme de visualisation 3D qui possède un outil pour couper individuellement les dents. Il a ensuite créé un programme pour mémoriser cette segmentation, ce qui permet ainsi d'extraire facilement ces dents si besoin est.

➤ Reconnaissance des dents

Dirksen (1998) a développé un outil de localisation semi-automatique des cuspidés dentaires et du point inter-incisif. Du fait des grandes variations anatomiques dentaires, il semble impossible de mettre au point un programme totalement automatique de reconnaissance de structures dentaires spécifiques. Sa technique est tout à fait particulière, sa première partie est effectuée sur des modèles en deux dimensions selon un axe X, Y. Deux images sont disponibles, une en différents niveaux de gris et une originale. Parallèlement, sur un schéma, sont identifiées les cuspidés dentaires.



Le clinicien sélectionne une cuspide sur le schéma et l'identifie sur les deux images disponibles, ceci permet de fournir des coordonnées bi-dimensionnelles à chaque cuspide identifiée.

La suite du travail s'effectue sur les modèles en trois dimensions. Si on considère qu'un $Z=0$ correspond à la partie inférieure du modèle, le programme informatique est alors capable d'identifier le point de coordonnée Z la plus élevée, à proximité du point cuspide identifié à l'étape précédente. Ceci permet une identification précise tri-dimensionnelle de chaque cuspide. Pour les incisives, cette technique peut être adaptée pour calculer leurs largeurs mésio-distales et leur orientation. Le point interincisif est déterminé de la même manière à une hauteur définie comme l'interpolation linéaire des hauteurs des deux incisives adjacentes.

➤ Mouvements orthodontiques

Yamamoto (1991), afin d'évaluer l'amplitude des mouvements dentaires, choisit pour chaque dent un point de référence situé au centre de la face occlusale. Il définit le mouvement orthodontique comme l'ensemble des paramètres de translation et de rotation définissant le mouvement d'un point donné.

Commer (2000) et Yamamoto suivent la même approche.

A titre de démonstration, un premier scanning est réalisé, puis 26 est déplacée et un deuxième scanning est effectué; la détermination du mouvement de 26 est accomplie selon les étapes suivantes.(A)

- Mise en correspondance entre les surfaces palatines des deux images; les paramètres de translation et de rotation sont enregistrés. Le palais sert ainsi de référence. Le profil du palais est une des structures les plus stables durant le traitement et est ainsi tout à fait approprié comme référence immuable.(B)

- Mise en correspondance de la 26 finale sur la 26 initiale et enregistrement des modifications de coordonnées, ce qui fournit les paramètres mathématiques de translations et de rotations appliquées sur cette dent.(C)

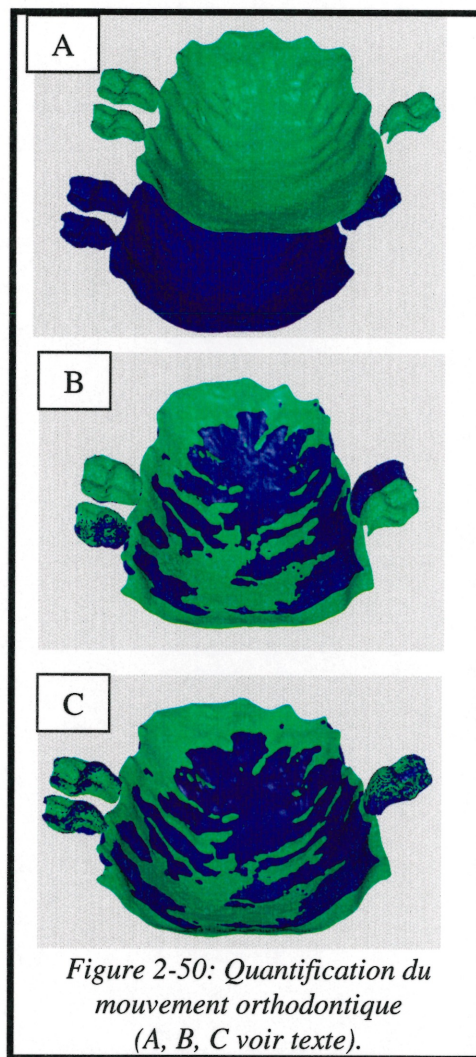


Figure 2-50: Quantification du mouvement orthodontique (A, B, C voir texte).

Commer (2000), en comparant cet outil à une table de mesures de coordonnées qui fournit des mesures précises mais dont le procédé est fastidieux, a prouvé sa performance puisque les mesures ont un écart maximum de 0,5mm en translation et 0,5 degré en rotation.

Yamamoto parvient à une erreur de 0,1mm en translation et 0,5 degré en rotation mais ne donne aucune information sur sa méthode de comparaison.

➤ Set-up

Lorsque toutes les dents sont séparées, il est possible d'effectuer un set-up informatique.

Alcaniz (1997), dans le cadre d'un projet européen pour le développement d'un programme d'aide au diagnostic orthodontique, présente son interface pour la réalisation du set-up. Une fois la segmentation effectuée, les dents peuvent être bougées individuellement ou en groupe. Plusieurs formes d'arcades s'offrent au manipulateur et le programme calcule automatiquement l'arcade idéale pour le meilleur positionnement géométrique dentaire. Malheureusement, aucun détail sur la méthodologie adoptée n'est donné dans le but de protéger le programme actuellement commercialisé par Navimetric.

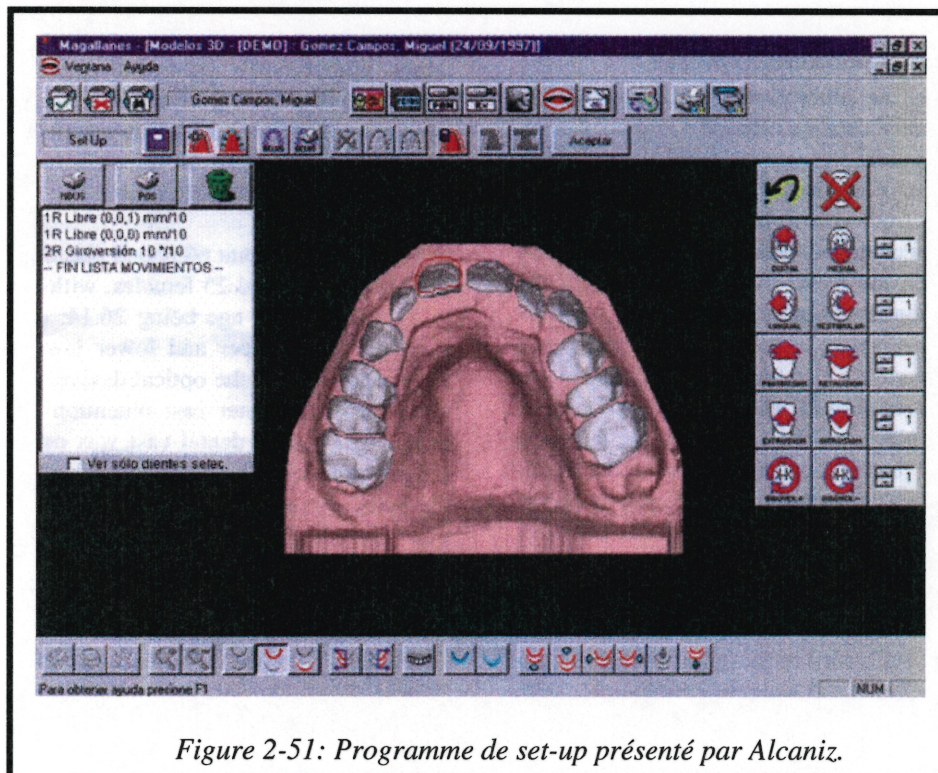


Figure 2-51: Programme de set-up présenté par Alcaniz.

Motohashi (1999) rapporte une méthode rigoureuse. Après avoir séparé les dents, il procède à l'ajustement de la position des dents antérieures. Le plan de Francfort apparaît sur l'écran et les incisives sont déplacées par l'orthodontiste

jusqu'à l'obtention d'un overjet et d'un overbite idéaux. Ensuite, la ligne médiane dentaire et l'axe de symétrie de l'arcade sont déterminés. La ligne médiane dentaire est choisie grâce aux informations fournies par la radiographie postéro-antérieure et à la ligne médiane faciale. L'axe de symétrie est choisi idéalement tel que la ligne ovale préfigurant temporairement la forme d'arcade soit centrée sur l'os alvéolaire.

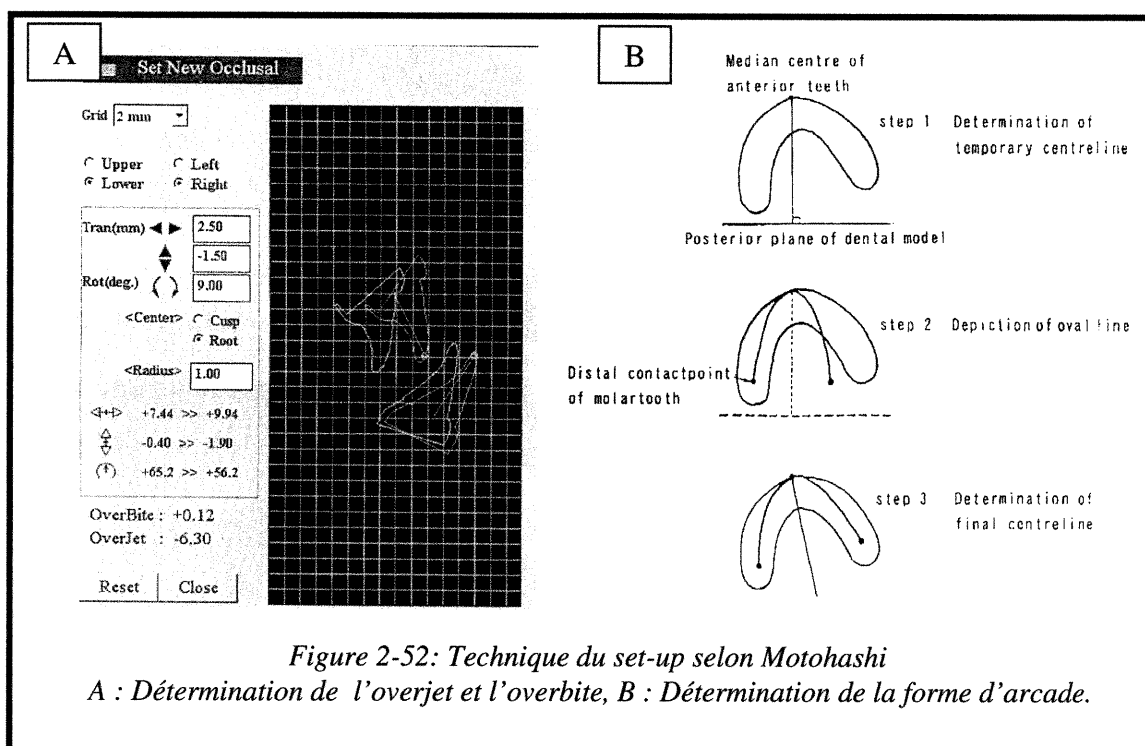


Figure 2-52: Technique du set-up selon Motohashi

A : Détermination de l'overjet et l'overbite, B : Détermination de la forme d'arcade.

L'auteur met l'emphase sur le choix de la forme d'arcade et préfère la formule de Bonwill-Hawley pour la déterminer. La partie antérieure de l'arcade est caractérisée par un cercle dont le diamètre est la somme des largeurs des incisives centrales, latérales et canines et dont le centre est situé sur l'axe de symétrie établi à l'étape précédente. Cette procédure est réalisée au maxillaire et à la mandibule; les deux arcades sont ensuite superposées pour être ajustées au besoin.

Le diamètre mésio-distal de chaque dent est défini selon le procédé présenté dans les résultats. Pour réaliser le set-up, il suffit alors d'aligner les segments mésio-distaux sur l'arcade établie, ce qui définit les informations de premier et de deuxième ordres, et les plans représentatifs de l'axe long, ce qui définit le troisième ordre. L'auteur stipule un certain ajustement pour l'inclinaison de ces plans mais ne fournit pas de détails. Il faut 40 minutes pour obtenir un tel set-up.

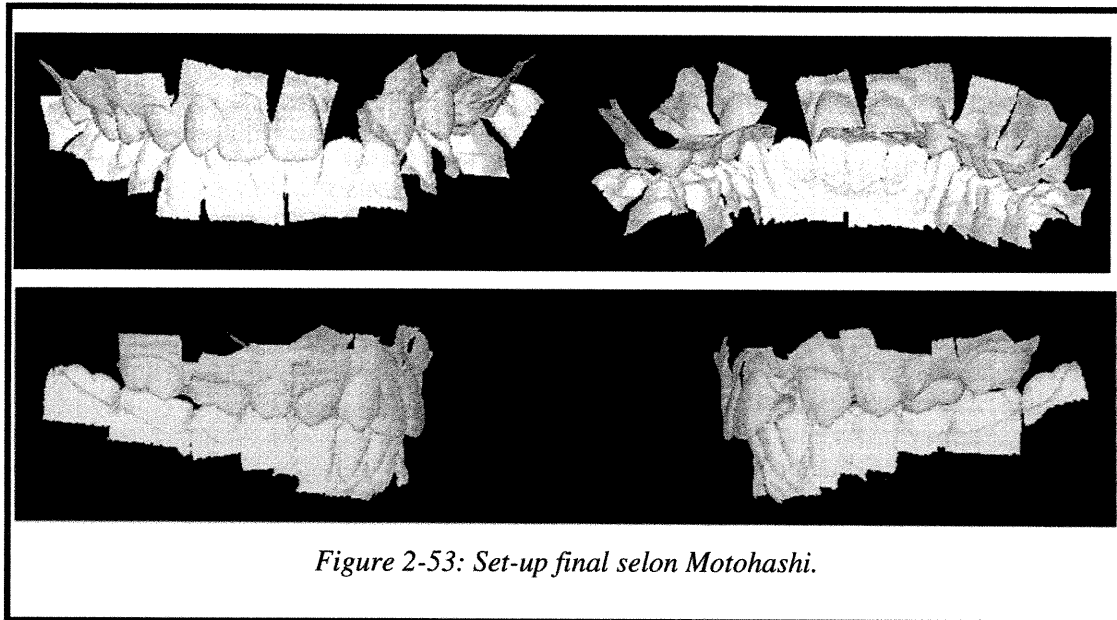


Figure 2-53: Set-up final selon Motohashi.

2.7.3. Modèles électroniques en trois dimensions disponibles en pratique orthodontique

Les modèles électroniques en trois dimensions peuvent désormais faire partie de la pratique quotidienne des orthodontistes. Plusieurs options s'offrent au praticien: soit digitaliser personnellement ses modèles, soit sous-traiter et faire exécuter la digitalisation par des sociétés spécialisées. Actuellement, plusieurs sociétés proposent un service permettant une obtention rapide de modèles dentaires digitaux en trois dimensions. Geodigm et Orthocad ont ainsi développé un programme de visualisation et d'aide au diagnostic de ce modèle nouveau genre. Suresmile propose à l'orthodontiste de réaliser lui-même la numérisation, offre un programme d'aide au diagnostic, un set-up virtuel et un système de robotisation pour effectuer les fils et le collage du traitement. Enfin, Invisalign offre de nouveaux appareillages dont la technologie se base sur les principes de vision tri-dimensionnelle.

2.7.3.1. Cyberware

Cyberware est une société qui produit des scanners pour l'obtention d'images du corps tout entier. La technique utilisée est la lumière structurée avec projection de motifs. Elle fabrique une variété de scanners en fonction de la taille de la structure à

numériser. Le scanner pour modèles dentaires coûte environ 23 000 dollars américains. Sur la figure 2-54, un exemple de modèle supérieur est présenté; il est constitué de 233 000 polygones, résulte de 72 scans et est obtenu en 2 heures 4 minutes.

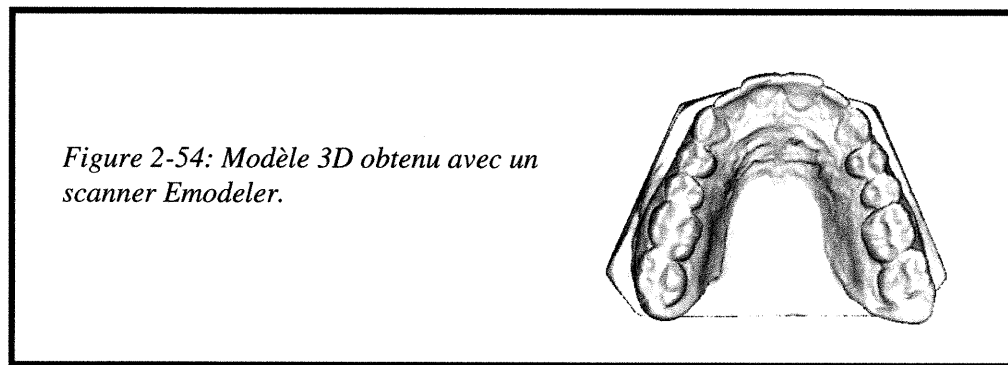


Figure 2-54: Modèle 3D obtenu avec un scanner Emodeler.

2.7.3.2. Emodel et Orthocad

Deux sociétés, Orthocad et Emodel, offrent un service basé sur un principe similaire : afin de ne pas alourdir notre présentation, seules les fonctions offertes par le logiciel de visualisation seront traitées de manière distincte pour ces deux sociétés.

➤ Présentation générale du service.

La compagnie Geodigm est propriétaire et développe une technologie de digitalisation laser pour des applications dentaires et orthodontiques. Elle a mis au point le procédé Emodel en mai 1997.

Cadent, la compagnie d'Orthocad, est un fournisseur d'images 3D pour les dentistes. Elle offre deux services :

- Modèles d'étude 3D digitaux depuis fin 1999;
- Échantillons électroniques et production de couronnes et ponts.

➤ Principes

Orthocad et Geodigm se basent sur les mêmes principes pour leur service. Des empreintes à l'alginat ainsi qu'une cire d'occlusion ou encore des modèles en plâtre parfaitement taillés sont envoyés à la société mère et en moins d'une semaine, les modèles 3D sont transmis par internet.

➤ Outils nécessaires

- Ordinateur au moins équipé d'un processeur Pentium II, 300MHz.
16 bits, 1024x768 pixels;
- Carte graphique de 4MB;
- Compatible PC et Macintosh;
- Connexion à internet.

➤ Prise d'empreintes

L'alginat, matériau de choix pour les empreintes, peut être utilisé. Une cire d'occlusion conventionnelle est réalisée. Orthocad ne pose aucune exigence particulière pour le porte empreinte alors que Emodel recommande d'utiliser un alginat d'une stabilité de 100 heures et un porte empreinte jetable.

➤ Modèles en plâtre

Si l'orthodontiste dispose au préalable de modèles en plâtre qu'il désire digitaliser, ceux-ci doivent être taillés parfaitement de manière conventionnelle.

➤ Procédé d'acquisition

Pour Orthocad, le plus grand secret est de rigueur et aucune information n'a pu être obtenue de la société. En se rapportant au brevet (Kopelman, 2000), le processus peut être qualifié de destruction contrôlée. Un modèle physique est nécessaire, une fine couche de celui-ci, 0,05 à 0,2 mm, est coupée. Puis une image optique, soit du modèle, soit de la couche obtenue, est réalisée. Cette étape est reconduite pour l'ensemble du modèle permettant l'obtention d'une multitude d'images optiques couche par couche. En combinant ces images, un modèle 3D de l'ensemble des dents est réalisé.

Pour Emodel, le procédé est celui d'un laser classique se basant sur le principe de la lumière structurée.

➤ Expédition

Les frais de port sont compris dans le prix global si des empreintes sont expédiées, par contre si des modèles en plâtre sont envoyés, le port reste à la charge

de l'orthodontiste. Orthocad bénéficie d'accord avec UPS et fournit le matériel d'expédition en même temps que le kit d'initialisation.

➤ Réception des modèles 3D

Le délai de réception est de six jours ouvrables pour Orthocad et 7 à 10 jours pour Emodel. Les modèles 3D sont chargés directement du site vers l'ordinateur de l'orthodontiste.

La taille d'un jeu de modèles (haut et bas) est de 800 kb pour Emodel et 3 MB pour Orthocad. Un CD gravable peut ainsi contenir jusqu'à 750 cas. Le chargement des modèles dure de 2 (Geodigm) à 11 minutes (Orthocad) pour une connexion classique à 56000bit/s mais peut être de moindre durée, soit quelques secondes par câble ou connexion DSL (Digital Subscriber Line).

➤ Support technique

Ce service propose une assistance installation mais aussi une aide en cas de problème dans la réception des modèles ou pour l'intégration avec d'autres systèmes informatiques. Le prix de ce service est compris dans le prix global pour l'obtention des modèles. Il faut noter que ce service n'est pas disponible sur Mac.

➤ Prix

Les deux sociétés proposent un tarif semblable de 35 dollars américains par cas, c'est-à-dire pour un jeu de modèles.

➤ Fonctions de visualisation proposées par Orthocad

Le programme Orthocad est chargeable gratuitement sur internet ou fourni sur CD lors de la réception du kit d'initialisation. Les promoteurs du produit ont conservé l'aspect des modèles en plâtre taillés conventionnellement auquel les orthodontistes sont familiers.

La touche de contrôle des vues permet de nombreuses fonctions

- Examiner le modèle digital sous de nombreux angles présélectionnés;
- Zoom in/out : agrandir/réduire; il est possible de sélectionner une zone à zoomer;

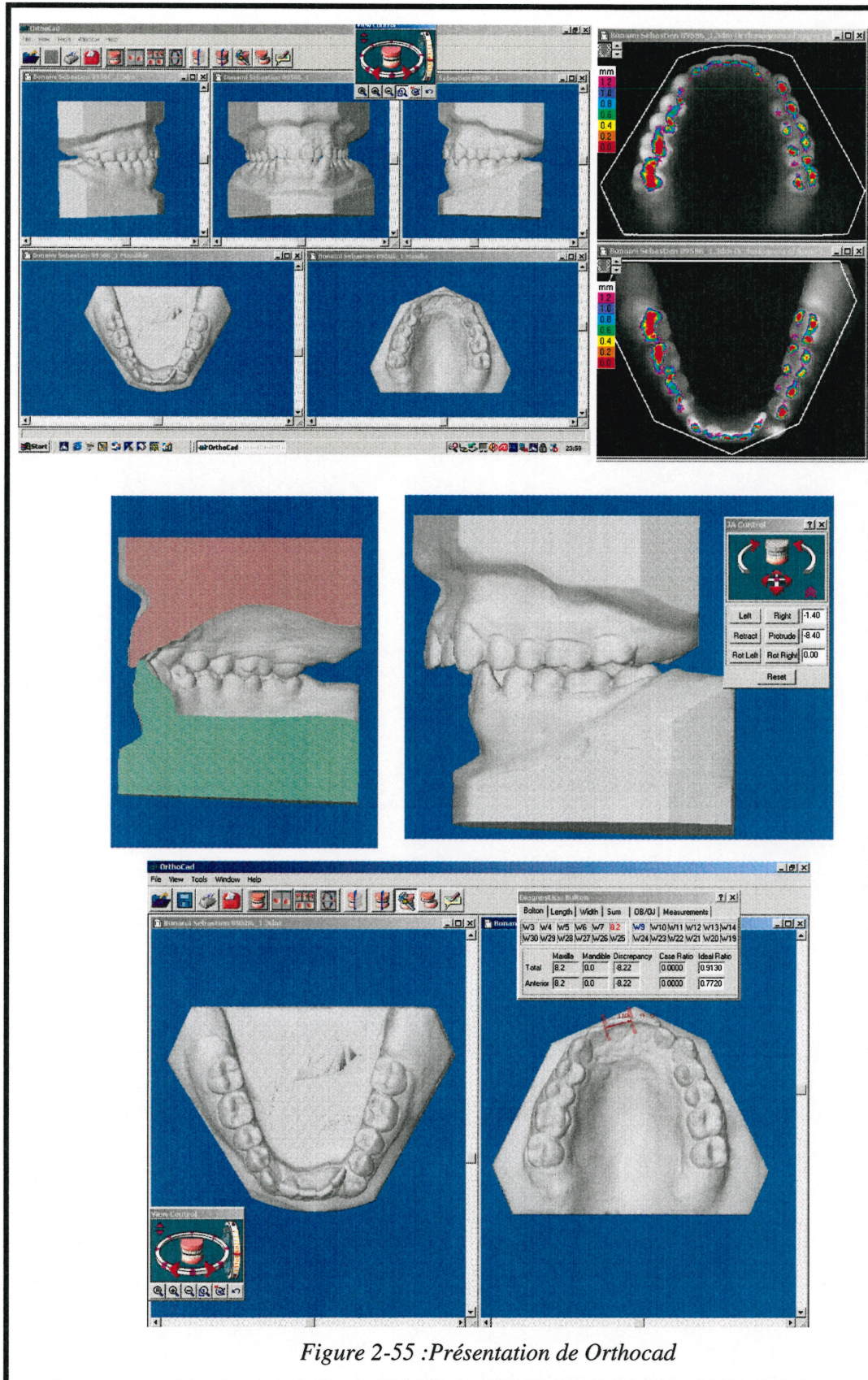


Figure 2-55 :Présentation de Orthocad

- Cacher un des modèles afin de polariser son attention sur une arcade;
- Saisir le modèle et le tourner dans l'espace avec la souris.

La barre des outils permet

- De disposer de certaines vues directement: vues frontale et oclusale;
- De disposer de 5 vues en simultané (galerie): frontale, sagittales droite et gauche, occlusales des modèles supérieur et inférieur.

Fonction alignement des mâchoires

Les relations antéro-postérieure et latérale peuvent être ajustées en fonction de la relation centrée et de l'intercuspidation maximale; de plus, le programme peut mémoriser ces nouvelles positions. En cas de distorsion de la cire d'occlusion, la relation d'occlusion peut être modifiée dès la réception des modèles digitaux.

Le modèle inférieur peut être avancé, reculé, bougé en latéralité selon une distance qui s'affiche à 100 microns près. Tous les outils peuvent ensuite être utilisés sur ces modèles modifiés.

Fonction occlusogramme

Cette fonction permet la matérialisation des points de contacts par un code couleur en fonction de la distance entre les dents inférieures et supérieures. Toute modification dans les sens antéro-postérieur, vertical ou sagittal d'un des modèles implique une modification des rapports d'occlusion qui peuvent être visualisés par le changement des couleurs.

Fonction section des modèles

Les modèles peuvent être sectionnés en tout point dans les plans transverses ou sagittaux.

Fonction mesures

Il est possible de réaliser des mesures de dents, de largeur d'arcade, de profondeur d'arcade, « d'overbite » (surplomb vertical), « d'overjet » (surplomb horizontal) avec une précision de 0,1mm. Cette fonction est entièrement manuelle, il faut sélectionner un point distal de la dent puis un point mésial et la mesure apparaît. Ces mesures peuvent être mémorisées pour être utilisées ultérieurement.

Fonction Bolton

Le calcul des disharmonies dentaires selon Bolton peut être effectué automatiquement si, au préalable, chaque dent a été mesurée individuellement.

Fonction notes

Trois couches distinctes de notes sont accessibles permettant de communiquer avec patients et confrères tout en conservant ses notes personnelles.

Fonction impression

Un support papier peut être réalisé à toutes les étapes afin de déterminer la forme d'arcade ou pour transmettre des données.

Fonction envoi de courrier électronique (e-mail)

La communication avec un collègue est améliorée en lui fournissant les modèles digitaux annotés.

Fonction jeu

Un exemplaire des modèles 3D peut être envoyé au patient sous forme de jeu basé sur l'hygiène dentaire.

Mon avis

Les points positifs:

- L'interface est agréable, colorée, simple et attrayante.
- Le service d'aide est très disponible et permet d'utiliser le programme même si on n'a jamais allumé un ordinateur.
- Les fonctions d'informations sur l'engrènement dentaire et de modifications de l'occlusion sont des atouts qui donnent à l'orthodontiste les mêmes libertés qu'avec un modèle en plâtre.

Les points négatifs:

- Le programme nécessite plusieurs heures d'entraînement afin de « piloter » le modèle 3D à sa guise.
- Les mesures ne sont pas aisées à réaliser. De plus, le processus est long et fastidieux puisque ces mesures sont réalisées par l'orthodontiste. Deux défauts principaux : il n'est pas possible de zoomer directement la dent à mesurer et il n'est pas possible de changer l'angle de vision.
- Le terme occlusogramme offre un programme attirant; cependant, il s'agit uniquement de matérialiser les points de contact et il n'est en aucun cas fait mention d'un occlusogramme 3D comme nous pourrions nous y attendre.
- Lors de l'envoi de modèles en plâtre pour numérisation, les modèles réexpédiés par Orthocad sont fortement dégradés et inutilisables, ce qui n'a jamais été notifié dans leurs informations.
- Le protectionnisme autour du procédé d'acquisition des modèles 3D est immense et ne permet pas d'obtenir les données scientifiques afin de juger de la pertinence scientifique de celui-ci.

➤ Fonctions proposées par EMODEL

Le programme Emodel peut être chargé gratuitement avec des modèles de démonstration sur internet. Il est ensuite très facile d'en sélectionner un et de l'ouvrir; la date de prise d'empreinte s'affiche simultanément. Le modèle électronique a l'aspect des modèles en plâtre conventionnels familiers à l'orthodontiste.

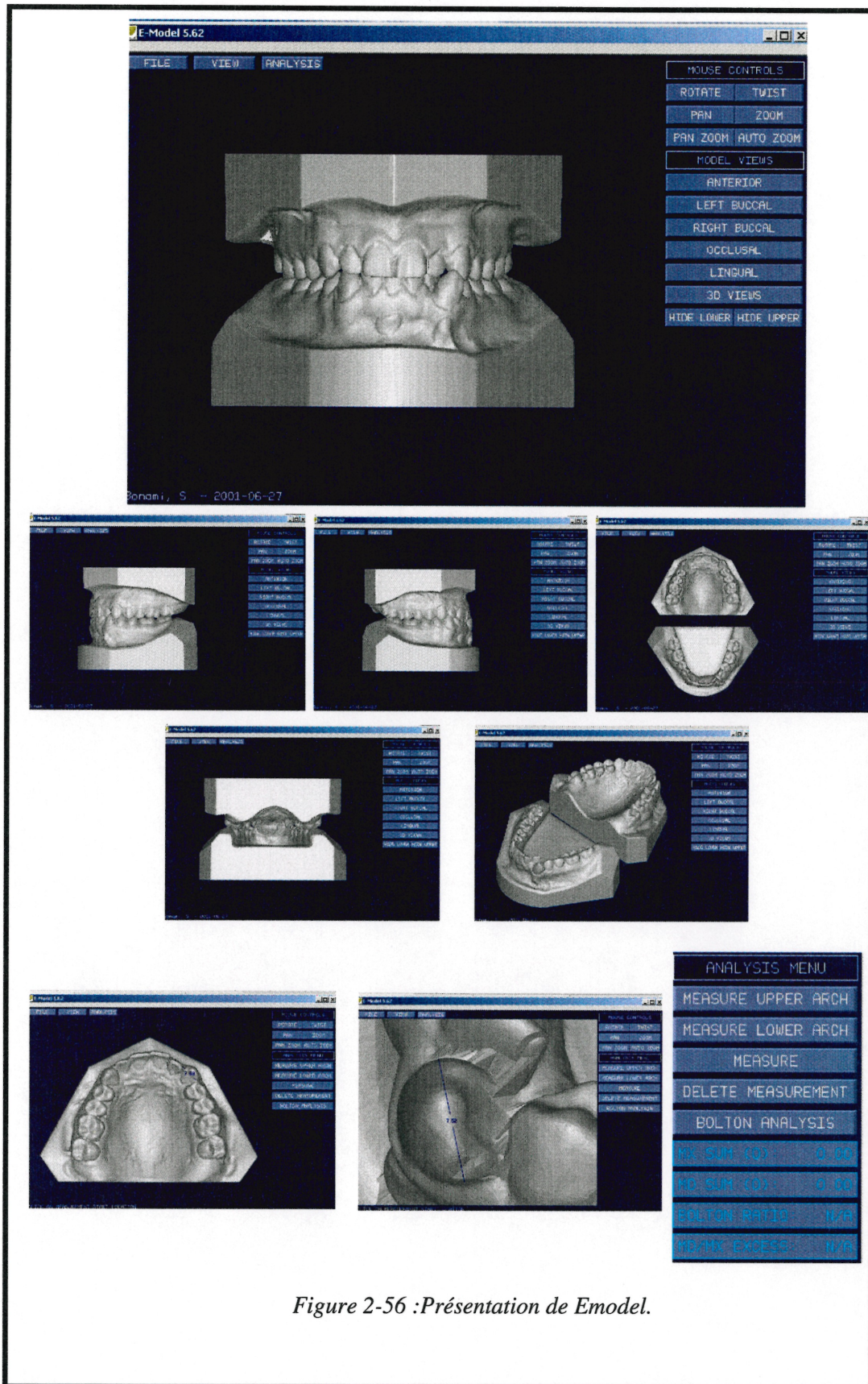


Figure 2-56 :Présentation de Emodel.

La règle propose trois outils.

Contrôle des mouvements du modèle

- Rotate : sélection du modèle afin de le mouvoir dans tous les sens de l'espace sans contrainte
- Twist : sélection du modèle afin de le tourner dans un sens horaire ou anti-horaire
- Pan : sélection du modèle afin de le déplacer horizontalement ou verticalement
- Zoom : sélection du modèle afin de l'agrandir ou de le réduire

Contrôle des vues

Il est possible de voir le modèle sous des vues présélectionnées : antérieure, buccales gauche et droite, linguale, occlusale orthographique, occlusale avec les modèles inclinées (vue de $\frac{3}{4}$). Il est permis de cacher un des modèles.

Analyse des modèles

- Fonction mesures : Il est possible de réaliser des mesures de dents, de largeur d'arcade et de profondeur d'arcade avec une précision de 0,1mm. Ces mesures peuvent être effacées pour modification.
- Fonction Bolton : Le calcul des disharmonies dentaires selon Bolton est effectué automatiquement en fonction des mesures réalisées au préalable.

Fonction notes

Fonction impression

Mon avis

Les points positifs :

- Les modèles sont faciles à manipuler et bien contrôlés.
- Le calcul des disharmonies dentaires selon Bolton est obtenu très rapidement.
- Il est possible de modifier l'axe de vision des dents pour les mesurer.

- La compagnie Geodigm fournit toutes les données sur les procédés utilisés et a d'ailleurs permis la réalisation de cette maîtrise en offrant gracieusement des modèles 3D de mes patients modifiables et exploitables à des fins de recherche.

Les points négatifs :

- L'interface est triste et peu attrayante.
- Les fonctions sont sommaires.
- L'initiation des mesures annule toute possibilité de mouvement.

2.7.3.3. Suresmile

Suresmile est un procédé complet qui propose une technologie allant du scanner à mains pour l'obtention d'images 3D à la machine pliant l'ensemble des fils utilisés durant le traitement.

Il a d'abord été développé en Allemagne sous le nom de Bending Art System par Fischer brandie et Orthuber afin de simplifier la technologie sous jacente à l'orthodontie linguale. En 1998, la société Orametrix, située à Dallas, a adapté la méthode pour l'utiliser en orthodontie classique; ainsi est né Suresmile.

Face aux énormes débouchés commerciaux, le plus grand secret sur les détails de l'ensemble des constituants est de mise. Ainsi, toutes les informations actuellement disponibles sont celles d'Orametrix elle-même ou d'orthodontistes chargés de la promotion du produit.

➤ Obtention de l'image 3D

Cette technologie relève plusieurs défis, d'une part le scanner est un scanner à mains, d'autre part l'acquisition de l'image a lieu directement en bouche. Le procédé utilisé est celui de la lumière structurée mais avec de la lumière blanche à la place d'un laser. L'Orascanner est constitué d'une caméra vidéo couplée à un projecteur. Au préalable, il faut appliquer sur les dents un mince film blanc afin que celles-ci soient visibles par le scanner.

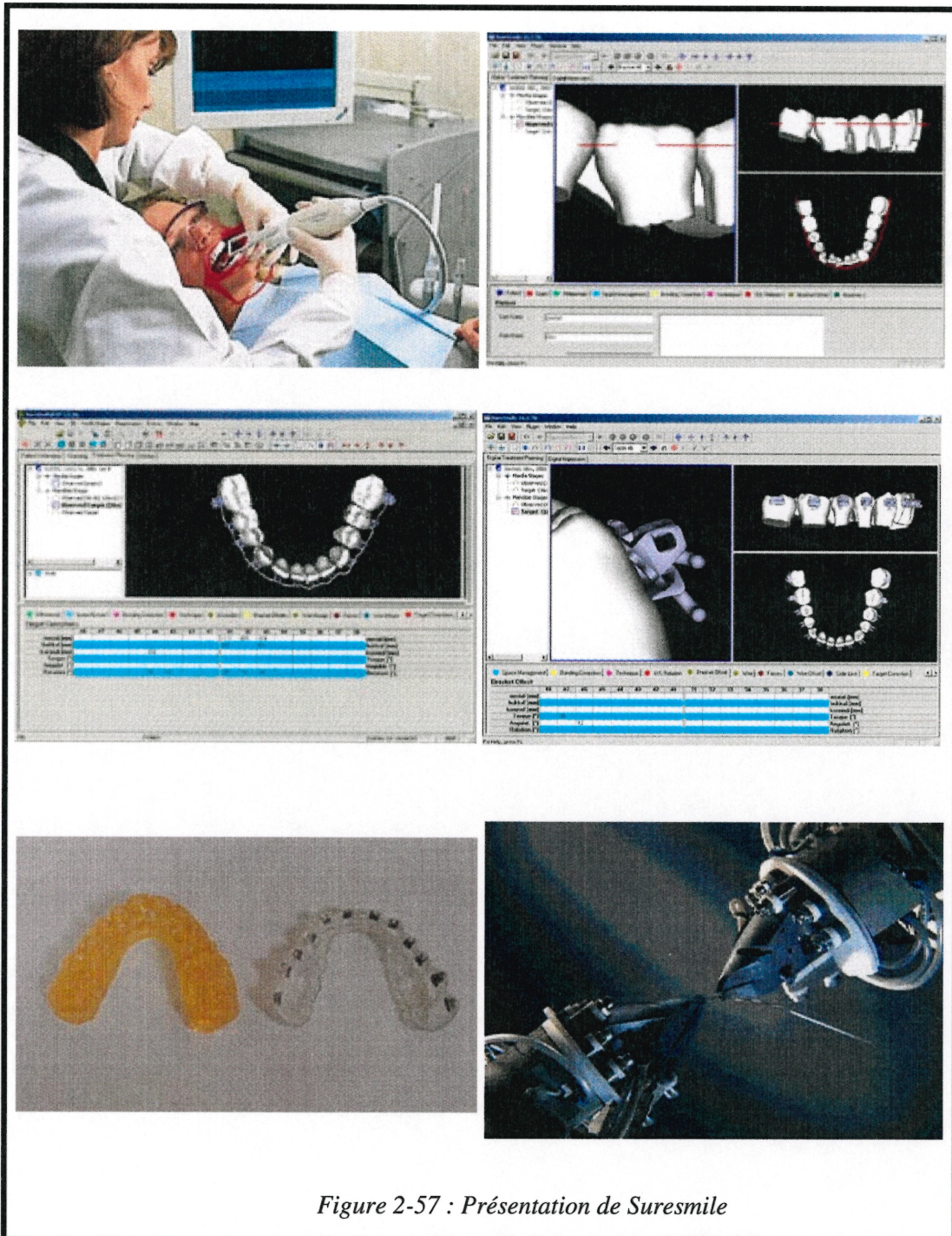


Figure 2-57 : Présentation de Suresmile

De manière synchronisée avec le signal vidéo, une lumière stroboscopique illumine la dent et un motif est projeté sur la denture. La lumière réfléchie est capturée et permet l'obtention des informations 3D. Le patient et l'opérateur peuvent tous deux bouger sans provoquer d'impacts néfastes sur la qualité de l'image. La résolution annoncée est de 0,1 mm. La durée pour le scanning est de 1 à 2 minutes par arcade.

➤ Programme de planification de traitement

Le programme permet de stocker l'ensemble des documents digitaux tels les radiographies, les photographies et les modèles. Un programme de visualisation 3D permet d'observer la dentition dans plusieurs perspectives; de plus, il est possible de réaliser des coupes transversales afin de juger du troisième ordre.

Plusieurs formes d'arcades parmi celles les plus commerciales sont disponibles et l'orthodontiste fait son choix dans le but de réaliser un set-up diagnostique. Le plan occlusal est déterminé, les dents identifiées et segmentées avec l'aide de l'opérateur et l'occlusion de fin de traitement peut être étudiée. L'opérateur peut planifier plusieurs alternatives de traitement en bougeant les dents individuellement, réaliser des extractions et même du stripping.

Mais le programme va plus loin, le bonding correspondant au set-up est simulé sur le modèle électronique initial. Là encore, un vaste choix de prescriptions et de types d'attaches sont offerts. En final, le collage de chaque attache est vérifié et l'orthodontiste peut faire des modifications individuelles. Ces changements peuvent s'effectuer soit par une modification du collage soit par la réalisation de plis dans le fil. Plis de premier, deuxième et troisième ordres mais aussi courbe de Spee peuvent être ajoutés. Il ne reste plus qu'à sélectionner la séquence de fils à utiliser.

Le collage du set-up diagnostique idéal est projeté sur le modèle initial pour réaliser le collage indirect.

➤ Réalisation du collage indirect et de la séquence de fils

A cette étape, l'orthodontiste envoie par internet le cas clinique, ses choix de fils; forme, type et plis; ainsi que le collage simulé au centre de fabrication des fils et collage de précision des attaches. Une machine plie le fil selon les informations fournies, la précision spécifiée est de 0,1mm en premier ordre et de 1 degré en deuxième et troisième ordres. De même, le collage est effectué selon la simulation accomplie par l'orthodontiste. Les collages sont exécutés à partir de modèles solides obtenus par stéréolithographie (cf. infra) et le transfert est du type gouttière en plastique souple. Les précisions pour la stéréolithographie et pour le placement des attaches sont chacune de 25 microns alors que la précision lors d'un bonding indirect classique est évalué à 100 microns. Orametrix a pour projet de supprimer cette étape d'obtention de modèles physiques et cherche à fabriquer directement le collage indirect.

Environ 10 jours plus tard, l'orthodontiste reçoit la séquence de fils ainsi que les collages prêts à être insérés en bouche. En cas de "debonding" accidentel pendant le traitement, il est possible de repositionner l'attache dans le transfert initial ou encore d'en réaliser un soi même car la position des attaches est imprimée sur le modèle résultant de la stéréolithographie.

Si l'orthodontiste préfère réaliser un collage direct, il a la possibilité de scanner celui-ci, de réaliser un set-up simulé et d'en déduire les différents plis nécessaires dans le fil pour parvenir aux objectifs fixés. Le centre de fabrication des appareils lui envoie alors les fils pliés selon la séquence voulue. A n'importe quelle étape du traitement, il est possible de scanner de nouveau afin de modifier la forme du fil.

➤ Étude en cours

Une étude est réalisée actuellement au sein du département de recherche clinique de la société Orametrix, les conclusions sont les suivantes :

- Les cas de classe I avec un chevauchement mineur à modéré sont traités avec 2 fils: un 0,016"x0,022" en nickel-titane puis un 0,017"x0,025" en TMA. Le système obtenu par la technologie Suresmile permet un excellent contrôle de la largeur d'arcade et

l'alignement se produit rapidement. Il n'y a pas d'inconfort supplémentaire résultant de l'utilisation de fils de gros diamètres en début de traitement.

- En utilisant Suresmile pour le fil de finition, cette dernière est obtenue en moitié moins de temps par rapport au groupe contrôle.

➤ Avantages

- Possibilité de produire des arcs individuels;
- Précision remarquable dans le pliage et le torque;
- Temps de travail au fauteuil réduit;
- Merveilleux outil de communication;
- Réduction de la durée du traitement.

➤ Inconvénients

- Laisser croire que les seules difficultés sont le bonding et le pliage des fils en oubliant l'approche diagnostique essentielle et la mécanique de traitement;
- Le coût : même si aucun prix définitif n'est disponible à ce jour, les tarifs communiqués sont de 15 000 dollars américains pour le matériel afin de débiter puis de 400 dollars américains par cas pour les fils à 700 dollars américains pour les fils et le montage des boîtiers.

➤ Mon avis :

Le procédé est très attrayant et prometteur, surtout pour la finition du traitement, cependant l'appareillage a été testé uniquement dans des laboratoires privés. Le scanner manuel capable d'être utilisé directement en bouche nécessiterait des tests afin d'évaluer sa précision et sa fiabilité. Certaines connaissances scientifiques en vision font penser que de multiples problèmes pratiques pourraient se produire provoquant déformations et distorsions des images obtenues. La commercialisation du produit était d'ailleurs initialement prévue pour mars 2000 et est toujours reportée à ce jour.

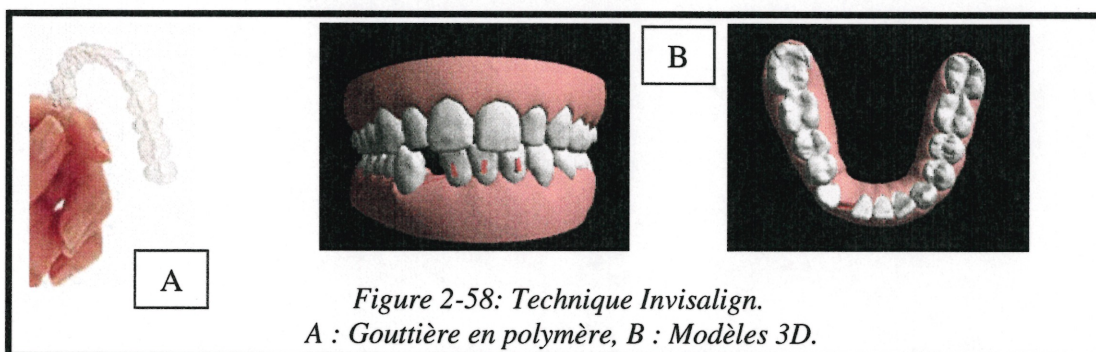
2.7.3.4. Invisalign

Align technology Inc., créée en 1997, a mis au point le système *invisalign*. C'est une nouvelle modalité de traitement qui fait intervenir une modélisation informatique et des traitements virtuels pour fabriquer des séries d'appareils amovibles transparents.

La procédure de traitement se déroule en 5 étapes :

- Diagnostic et plan de traitement;
- Empreintes dentaires en PVS et enregistrement de l'occlusion;
- Modélisation 3D par ordinateur : acquisition d'image digitale tridimensionnelle simulant les dents en occlusion;
- Création de la séquence animée : une séquence animée simulant les étapes de traitement est créée et envoyée par internet à l'orthodontiste afin de lui présenter les mouvements effectués du début à la fin du traitement. Cette étape permet de réaliser des modifications du plan de traitement si nécessaire;
- Traitement : Une fois le traitement approuvé, Align technology fabrique une série de gouttières en polymère, de 12 à 48, permettant d'effectuer les mouvements de la séquence prévue. Le patient porte ses appareils toute la journée sauf pour manger. Il change de gouttière toutes les deux semaines et peut ainsi constater le mouvement progressif de ses dents.

Les limites de cette technologie sont les indications de traitement, le coût pour le patient, de 5500 à 7500 dollars canadiens, et la qualité du traitement accompli qui n'a pas encore été évaluée de manière scientifique.



2.7.3.5. Avantages des modèles 3D

➤ Fournir de nouvelles informations

Avec la révolution informatique, Marcel (2001) pense que nous allons non seulement recueillir les données habituelles fournies par les modèles mais en plus exploiter une information nouvelle non accessible avec des modèles classiques.

➤ Faciliter les échanges de données

Avec l'émergence de l'approche multidisciplinaire en dentisterie, particulièrement chez les adultes ou pour les cas complexes, il devient indispensable de pouvoir fournir dans un laps de temps court toutes les données au sujet d'un patient à un confrère spécialiste.

➤ Mieux communiquer avec son patient

Le partage d'informations est le maître-clef du système; le même modèle 3D peut être utilisé pour le diagnostic par l'orthodontiste, présenté au patient par le coordinateur de traitements et utilisé à la chaise en même temps. C'est un outil de communication efficace avec le patient. Il peut être envoyé, comme nous l'avons dit, à un confrère spécialiste, au dentiste, à une compagnie d'assurances ou encore à la famille du patient.

➤ Patient digital

Face à la croissance de l'outil informatique pour le stockage des données, les modèles 3D viennent compléter l'arsenal virtuel utile à l'orthodontiste.

➤ Stockage

C'est une solution commode pour l'archivage des modèles.

➤ Accessibilité

Les modèles sont facilement et toujours accessibles. Il n'y a aucun risque de les briser ou qu'ils soient égarés dans une boîte qui ne leur appartient pas.

➤ Duplicata

Pour échange d'informations

Un duplicata peut facilement être produit par envoi d'un courriel.

Pour aide diagnostique ou thérapeutique

Si seules les informations bi-dimensionnelles sont nécessaires pour préfigurer de la forme d'arcade ou former, par exemple, un *lingual arch*, une simple impression laser en 1:1 permet de dupliquer ces données.

Pour disposer du modèle physique

Il est possible d'obtenir à partir des données du modèle digital, un modèle physique en polymère par un procédé nommé stéréolithographie. La stéréolithographie est une méthode de fabrication de modèles tridimensionnels, qui permet d'obtenir des maquettes aux formes complexes et précises en des délais nettement plus courts que l'usinage traditionnel. Les maquettes réalisées par stéréolithographie sont utilisées dans divers secteurs, comme l'aéronautique, l'automobile et la dentisterie.

La technique repose sur le durcissement localisé d'un liquide organique (monomère) par photopolymérisation, à l'aide d'un laser généralement ultraviolet. Le passage du faisceau au sein de la résine suivant le modèle décrit par un fichier informatique va solidifier celle-ci in situ, et former au sein du bain liquide, un modèle 3-D solide.

A partir d'une base de données de conception assistée par ordinateur, un premier traitement informatique transforme les coordonnées de l'objet en données correspondant aux tranches successives qui vont être durcies localement par le laser UV. Ces données sont ensuite utilisées par un ordinateur qui coordonne le fonctionnement de l'ensemble de l'appareil. Le réacteur de photopolymérisation est une cuve contenant le monomère liquide, dont le niveau est maintenu constant.

L'objet à réaliser est construit par tranches successives à partir de celle du bas. Lorsque le balayage laser a été effectué sur la première tranche, le plateau support s'enfonce verticalement d'une hauteur correspondant à une épaisseur de couche, recouvrant ainsi la zone durcie d'une épaisseur de monomère

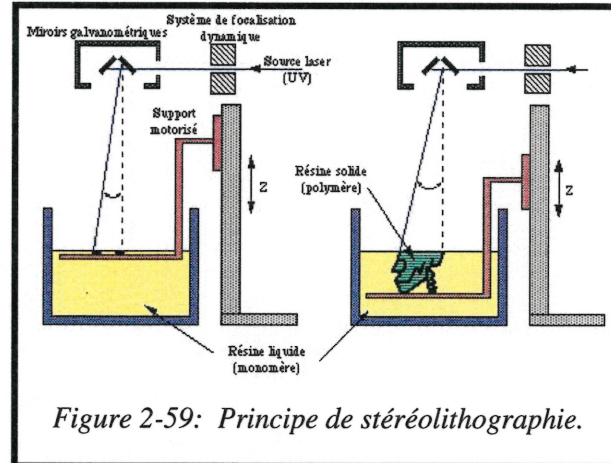


Figure 2-59: Principe de stéréolithographie.

liquide dont la valeur dépend de la précision verticale que l'on souhaite atteindre. Le balayage laser pour la tranche suivante peut alors recommencer.

➤ CAD et CAM

Des modèles digitaux permettent de réaliser, après simulation de mouvements dentaires, des appareils orthodontiques et des gouttières.

➤ Outil diagnostique

Les mesures sur le modèle peuvent être effectuées rapidement et aisément. Les simulations de traitements tels les *set-up* permettent d'envisager plusieurs scénarios afin de choisir celui qui convient le mieux au patient.

➤ Simulation de mécaniques

Des modèles virtuels permettent d'améliorer les connaissances scientifiques en simulant des mouvements orthodontiques en réponse à certaines forces biomécaniques. Ceci permettra de traiter nos patients dans les conditions les plus physiologiques possibles.

2.7.3.6. Limites :

Quelques obstacles perdurent :

- Un apprentissage du logiciel afin de manipuler aisément les modèles s'avère indispensable.
- Absence de bases scientifiques pour s'assurer de la qualité des services commercialisés.

- De grosses pratiques doivent disposer d'une mémoire disponible importante.
- Il est impossible de relier le mouvement des modèles à l'axe de rotation anatomique.
- L'American Board of Orthodontics n'accepte pas la présentation de modèles 3D digitaux pour l'instant.

2.7.3.7. Légalité

La nécessité de modèles n'est pas claire. Aucun cas judiciaire n'a, à date, précisé l'obligation de disposer de modèles d'étude. Pourtant, il semble plus sage d'en posséder car ils peuvent être considérés comme une partie essentielle du plan de traitement.

Pour ce qui est de la légalité des modèles 3D versus les modèles en plâtre, ce point n'a pas encore été étudié par la justice. Il semble acceptable de les accepter d'une manière équivalente puisqu'ils sont produits à partir d'empreintes semblables, de plus il est possible d'obtenir des copies physiques par stéréolithographie.

CHAPITRE TROIS

OBJET DE L'ÉTUDE

3. OBJET DE L'ÉTUDE

Au cours des dernières années, les développements technologiques ont permis de populariser l'informatique dans la pratique orthodontique. L'ensemble des documents essentiels au diagnostic sont maintenant disponibles sous forme digitale. La digitalisation des tracés des radiographies céphalométriques permet d'appliquer rapidement plusieurs analyses. La photographie digitale fournit des images promptement et offre un système électronique d'archives. De plus, l'apparition des programmes de « morphing » (transformation des images) offre un nouveau moyen de communication à l'orthodontiste.

En accélérant l'acquisition des données diagnostiques, l'informatique améliore la pratique orthodontique quotidienne mais elle a peu d'incidence sur la qualité des soins offerts au patient. Or, les patients consultant en orthodontie sont de plus en plus exigeants en termes de résultats et de délais et il est souvent complexe pour l'orthodontiste de prévoir et de présenter une maquette de résultats.

Le set-up diagnostique est une alternative attrayante mais le processus est fastidieux, ce qui amène souvent l'orthodontiste à déléguer. L'acquisition du set-up devient alors un procédé coûteux, souvent long, et perd son avantage principal d'information sur les difficultés thérapeutiques à venir et les compromis à adopter.

Nos études et nos lectures nous ont familiarisés avec l'évolution des technologies informatiques à visée orthodontique.

En théorie, l'apparition récente des modèles digitaux laisse présager une amélioration de l'acquisition des données diagnostiques par des mesures plus rapides et précises mais aussi une amélioration de l'information du patient et de la qualité du traitement par la simulation d'un traitement donné.

En pratique, quelques sociétés existent pour digitaliser des modèles et des projets de simulation sont actuellement à l'étude.

Par cette étude, nous allons tenter de vérifier la validité des modèles électroniques disponibles sur le marché et présenter un programme de set-up virtuel en décrivant chaque étape clinique.

Cette analyse nous permettra de fournir des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Les mesures effectuées par l'intermédiaire des logiciels commerciaux différent-elles sensiblement de celles effectuées directement sur les modèles en plâtre ?
- Quelles sont les difficultés rencontrées lors de l'utilisation de ces programmes ?
- Quels sont les avantages et limites du programme élaboré durant ce projet?
- Certaines améliorations de ce travail permettraient-elles une utilisation en pratique quotidienne?
- Dans quels termes ce type d'approche clinique pourrait bénéficier au patient?
- Quelles sont les implications médico-légales en ce qui concerne l'information fournie au patient lors de l'utilisation d'un tel outil ?

CHAPITRE QUATRE

MATERIEL ET MÉTHODES

4. MATERIEL ET MÉTHODES

4.1. MATÉRIELS

4.1.1. Modèles digitaux 3D

Dans l'objectif d'obtenir des modèles digitaux tri-dimensionnels pour l'objet de cette étude, il a été décidé de confectionner des modèles en plâtre et de faire effectuer leur digitalisation par les deux sociétés proposant ce service.

4.1.1.1. Modèles en plâtre

Deux patients de l'université de Montréal, ont été sélectionnés selon les critères suivants :

- Patients en dentition permanente;
- Absence d'agénésie;
- Patients nécessitant un traitement orthodontique;
- Cas requérant un set-up diagnostique.

Pour chacun d'entre eux, une empreinte à l'alginat a été réalisée afin de confectionner un jeu de modèles taillés conventionnellement mais non savonnés.

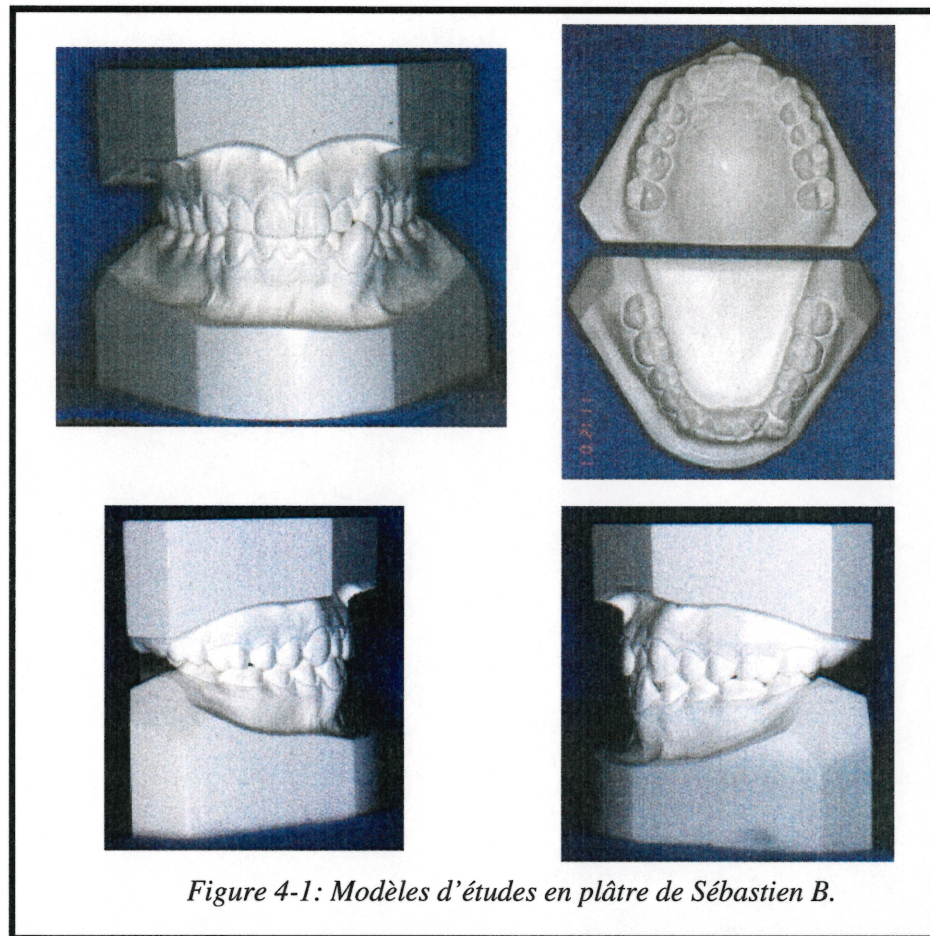
Les deux options que sont l'envoi des modèles en plâtre ou l'envoi d'empreintes à l'alginat ont été envisagées. Le critère de qualité aurait été plus difficile à contrôler dans l'éventualité d'un envoi d'empreintes à l'alginat, plusieurs sources d'erreurs peuvent être introduites à ce niveau :

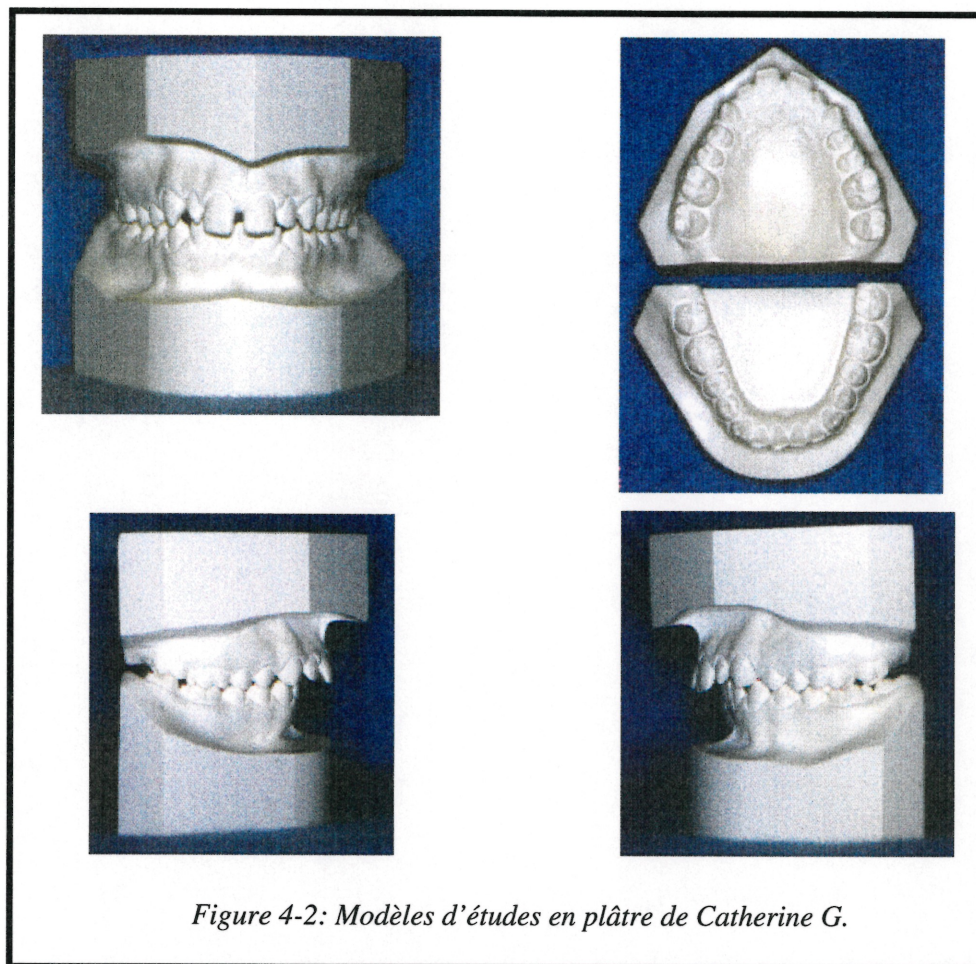
- Les empreintes à l'alginat ne sont pas parfaitement identiques;

- Les empreintes étant envoyées par la poste, la date de leur traitement n'était pas connue et il y avait un risque de perte de qualité.

Ainsi, nous avons décidé d'envoyer des modèles en plâtre. Après interrogation des sociétés, le procédé de digitalisation nécessitait que ceux-ci ne soient pas savonnés. Emodel imposait une taille stricte jointe en annexes (Annexe 3).

Tout au long de l'expérimentation, afin de les différencier, ces modèles seront notés Sébastien B. et Catherine G.





4.1.1.2. Numérisation des modèles en plâtre

Pour chaque cas, les modèles en plâtre ont été envoyés aux sociétés Emodel et Orthocad afin d'obtenir des modèles digitaux. Il est à noter que les mêmes modèles d'étude ont été envoyés à chacune des sociétés afin que le matériel à scanner soit d'une qualité identique.

Chacun des modèles ainsi digitalisé a pu être visualisé par l'intermédiaire des programmes développés par ces sociétés.

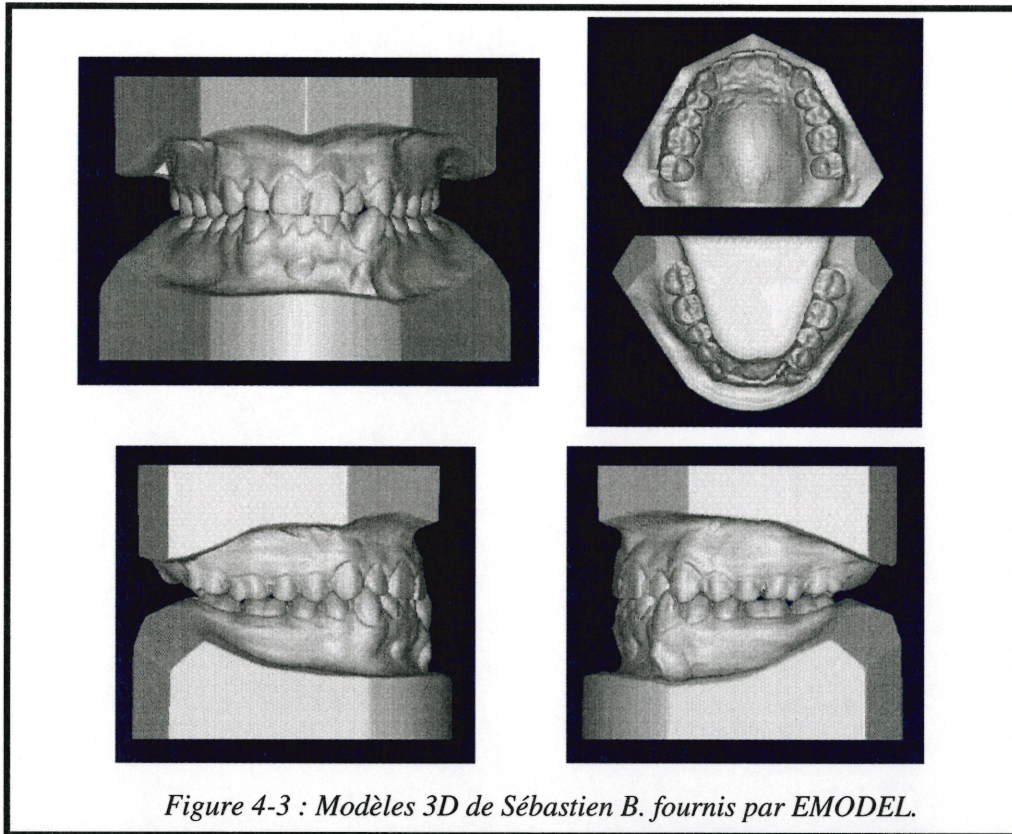


Figure 4-3 : Modèles 3D de Sébastien B. fournis par EMODEL.

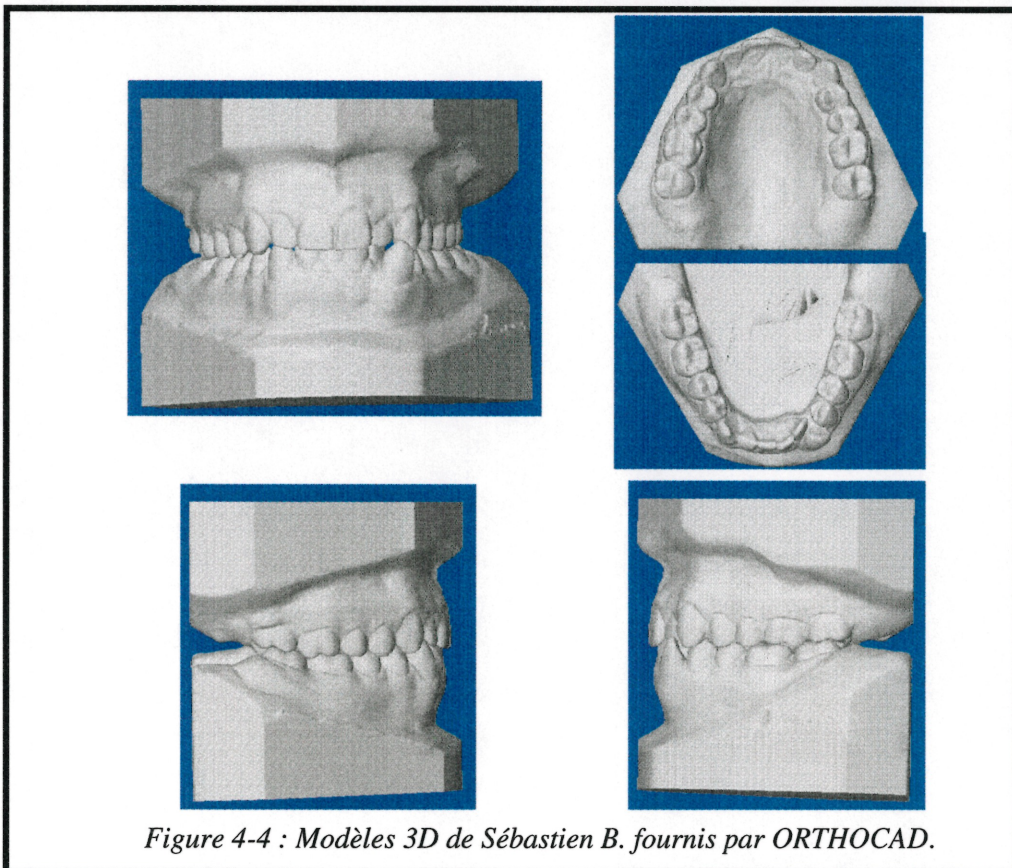
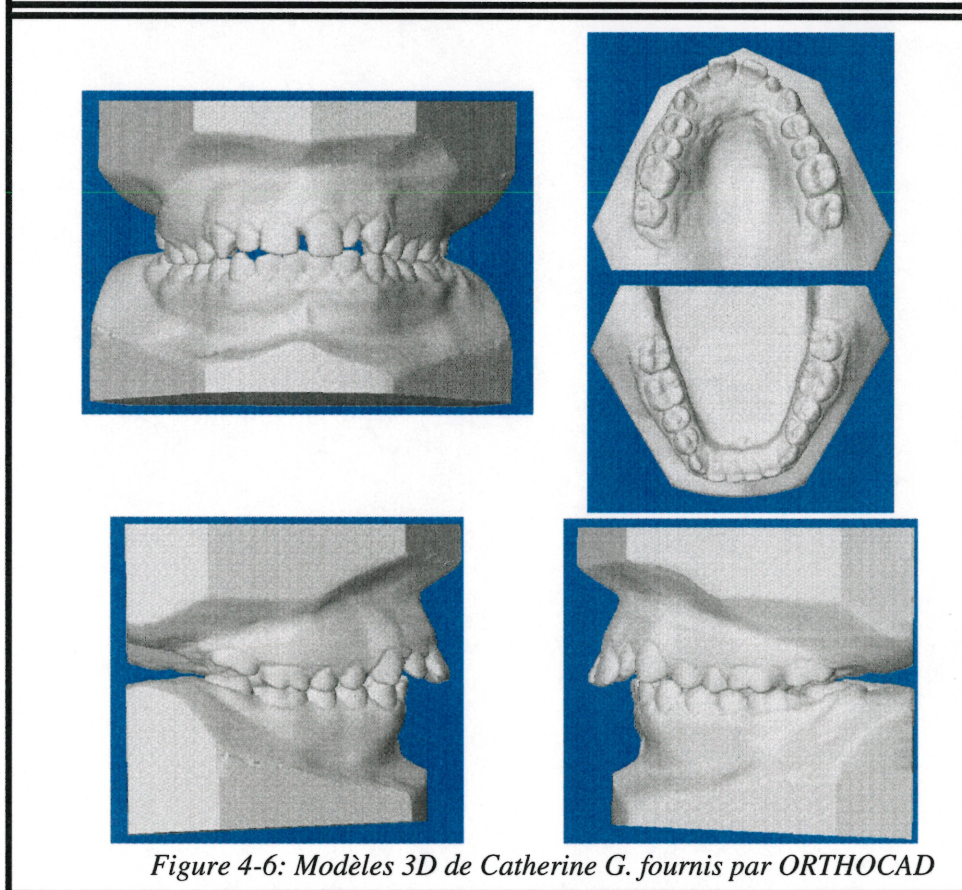
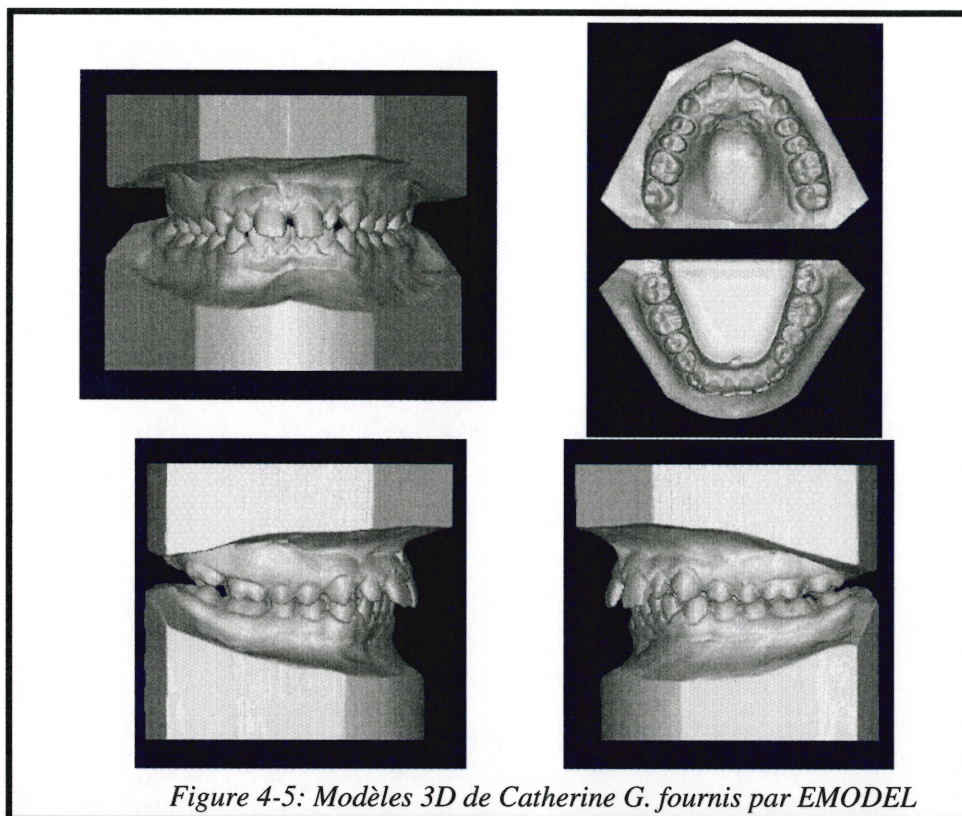


Figure 4-4 : Modèles 3D de Sébastien B. fournis par ORTHOCAD.



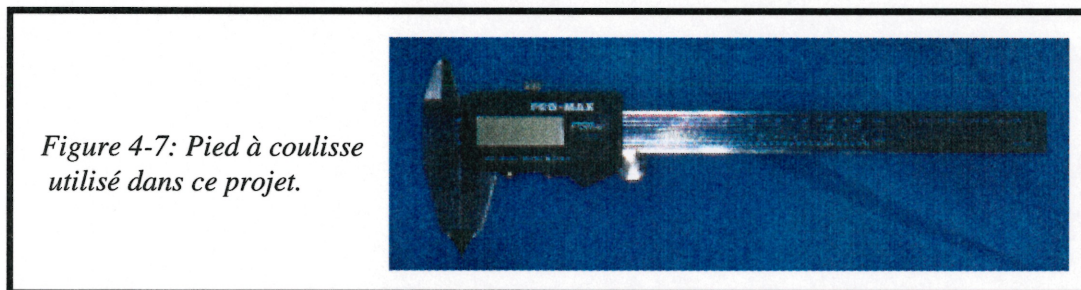
Pour le développement du programme de set-up, il a été demandé à chacune des sociétés de nous fournir les images des modèles sous un format classique au lieu du format propriétaire habituellement utilisé. Un format classique de type STL permet l'utilisation des images dans notre projet de recherche. Si la compagnie Emodel s'est montré tout à fait prête à collaborer, par contre nous avons fait face à un refus catégorique d'Orthocad. Ainsi, pour l'ensemble de ce projet, les modèles de la société Geodigm ont été utilisés.

4.1.2. Radiographie

Pour chaque cas, nous disposons de la radiographie céphalométrique prise en début de traitement réalisée en occlusion, lèvres au repos.

4.1.3. Pied à coulisse

Les mesures dentaires sur les modèles en plâtre ont été effectuées par l'intermédiaire d'un pied à coulisse de précision à affichage digital de la société PRO-MAX. Sa résolution est de 0,01mm et l'erreur expérimentale de +/- 0,03mm.



4.1.4. Matériel informatique

4.1.4.1. Ordinateur

Plusieurs ordinateurs personnels ont été utilisés durant de projet, leurs caractéristiques indispensables étaient :

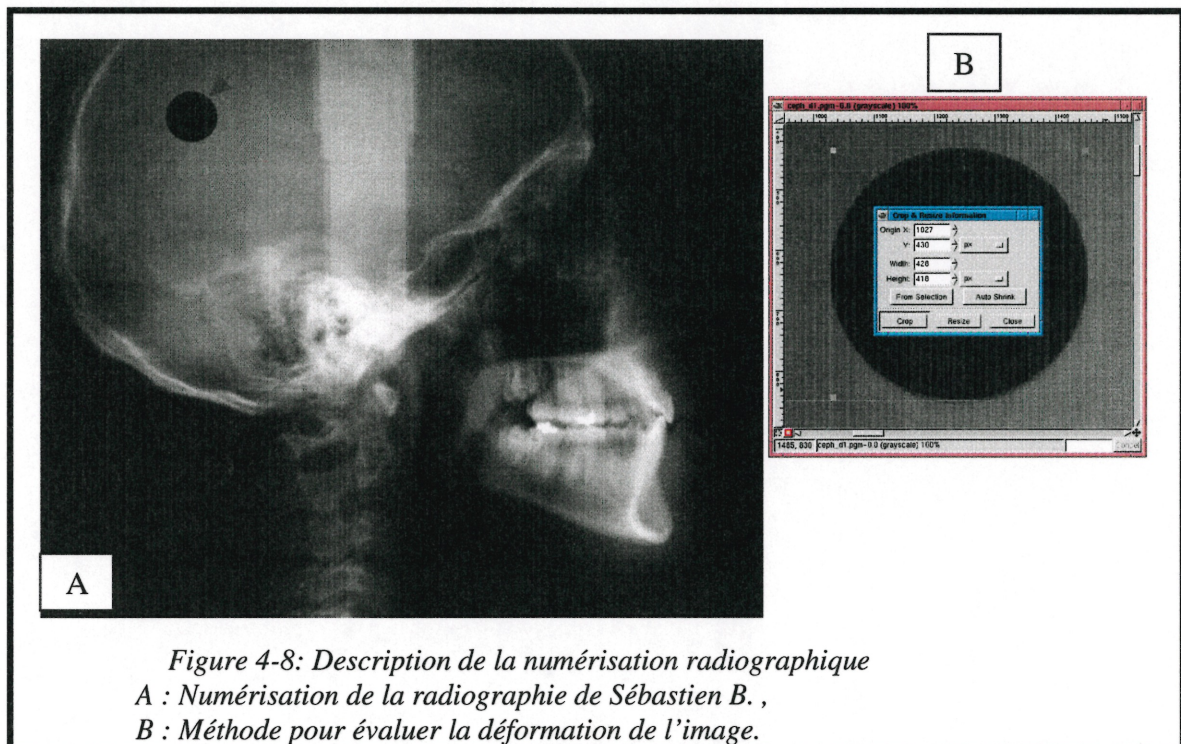
- Compatible PC;
- Systèmes d'exploitation Windows ou Linux;

- Au moins équipé d'un processeur Pentium II 300MHz;
- Affichage de l'écran au minimum 1024x768 pixels;
- Carte graphique de 4MB minimum;
- Connexion à Internet.

4.1.4.2. Scanner

Afin de disposer des radiographies céphalométriques sous une forme digitale, celles-ci sont scannées par l'intermédiaire d'un scanner UMAX permettant la transmission du faisceau lumineux. Chaque radiographie est digitalisée en noir et blanc et en 600 dpi.

Afin d'évaluer la déformation, une pièce de monnaie est placée durant la numérisation, la fidélité de l'image est ensuite analysée. En traçant un carré circonscrivant le cercle, on évalue aisément si la forme initiale est conservée. Les erreurs sont respectivement de 0% et 2% pour Catherine G. et Sébastien B.



4.2. MÉTHODES

4.2.1. Vérification de la validité des modèles digitaux

La première partie consiste à visualiser les différents modèles digitaux et à tester la fiabilité des mesures qu'il est possible d'effectuer.

4.2.1.1. Programmes utilisés

Les programmes d'Emodel et d'Orthocad ont été installés sur l'ordinateur via Internet aux adresses suivantes :

- Emodel : www.geodigmcorp.com;
- Orthocad: www.orthocad.com.

Ces programmes ont été décrits en détails dans la revue de littérature.

4.2.1.2. Mesures effectuées

Chacun d'entre eux offrant une option pour mesurer les modèles digitaux, dès la réception des modèles numérisés, trois séries de mesures ont été réalisées :

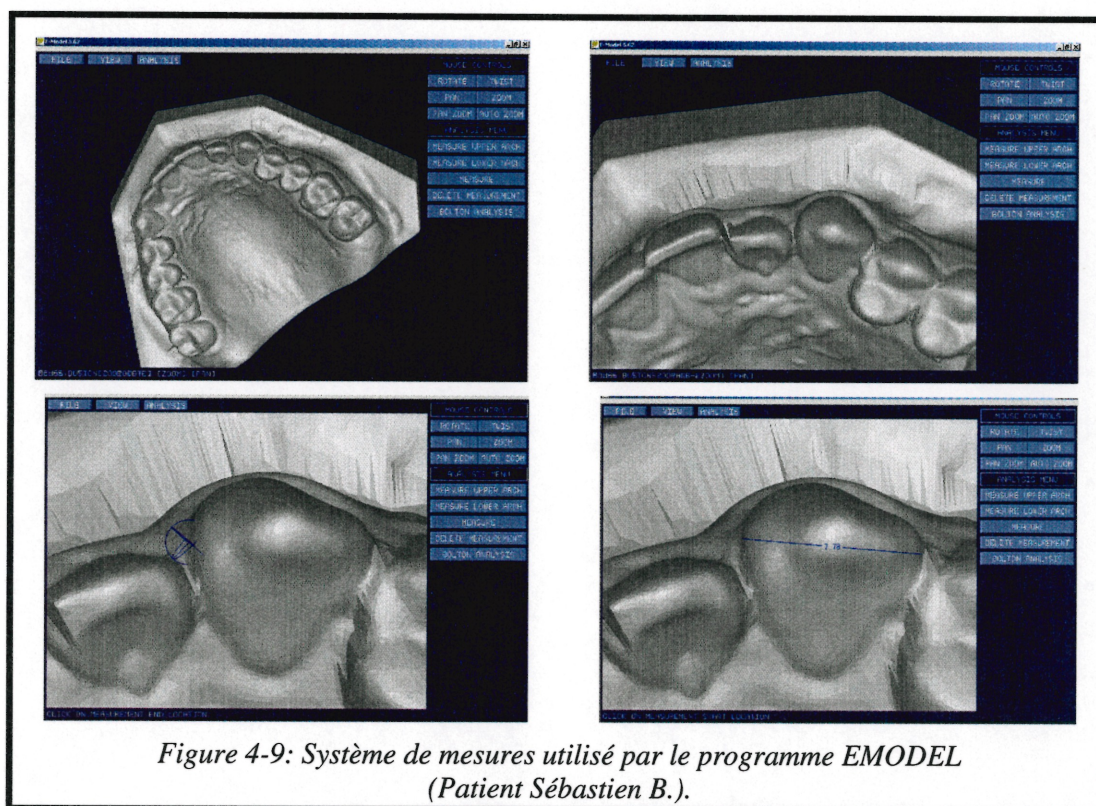
- Mesure de la largeur mésio-distale de chacune des dents par le programme Orthocad avec les modèles digitaux fournis par cette même société;
- Mesure de la largeur mésio-distale de chacune des dents par le programme Emodel avec les modèles digitaux fournis par cette même société;
- Mesure de la largeur mésio-distale de chacune des dents avec le pied à coulisse de précision directement sur les modèles en plâtre.

Chacune de ces mesures a été effectuée cinq fois par le même opérateur et une valeur moyenne pour chaque dent a pu être calculée.

➤ Mesure par l'intermédiaire de Emodel

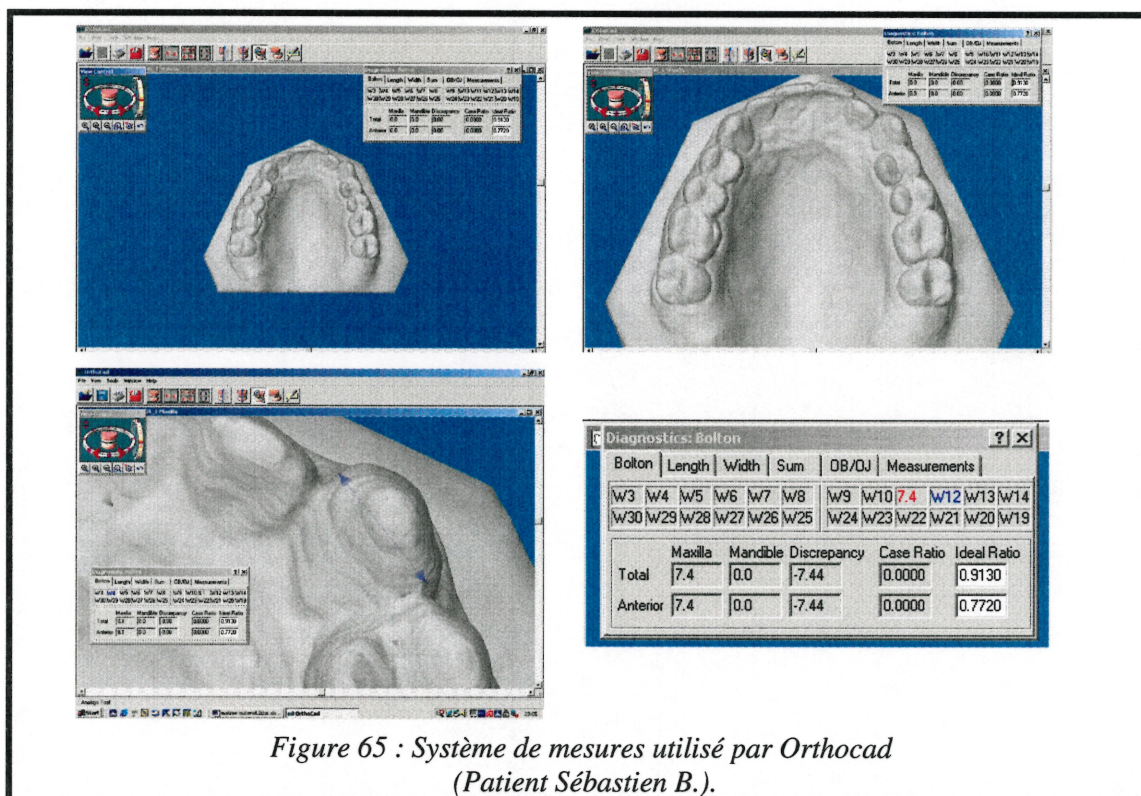
Les largeurs mésio-distales dentaires calculées sur les modèles digitaux EMODEL sont réalisées en sélectionnant un point mésial et un point distal; le programme affiche alors automatiquement la distance dentaire.

Pour plus de précisions, le modèle est orienté grâce aux commandes « twist, rotate et Pan » de manière à ce que la ligne de plus grand contour de la dent à mesurer soit visible sur l'écran et que l'axe de visualisation soit le plus proche possible de l'axe corono-radiculaire. La dent à mesurer est agrandie par le zoom pour faciliter la sélection des points. La mesure est exprimée en millimètres au centième près.



➤ Mesure par l'intermédiaire de Orthocad

Pour effectuer les mesures, le modèle s'affiche en vue occlusale, il peut être agrandi afin d'augmenter la précision mais aucun autre mouvement n'est possible. Après avoir sélectionné sur le schéma dentaire la dent à mesurer, un point mésial et un point distal sont choisis, le programme affiche alors automatiquement la distance dentaire. La mesure est exprimée en millimètres au dixième près.



➤ Mesures obtenues avec le pied à coulisse :

Les largeurs mésio-distales dentaires calculées sur les modèles en plâtre sont effectuées en respectant les recommandations suivantes :

- Le pied à coulisse est placé perpendiculairement à l'axe long dentaire ;
- Les extrémités du pied à coulisse sont situées au niveau des points de contact de fin de traitement. Il faut préciser que la distance entre les points de contact n'est pas nécessairement le plus grand diamètre mésio-distal ;

- Le pied à coulisse est préférentiellement inséré par le buccal. Lorsque, pour des raisons anatomiques, l'instrument ne peut être inséré par le buccal, il est alors inséré par l'occlusal et est tenu parallèle à l'axe long de la dent.

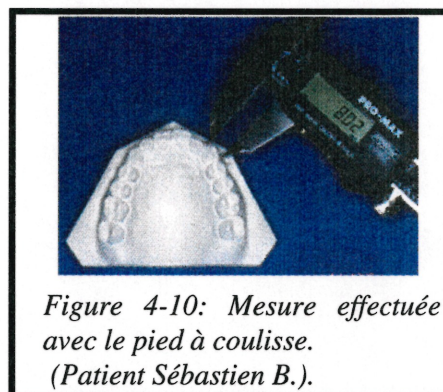


Figure 4-10: Mesure effectuée avec le pied à coulisse. (Patient Sébastien B.).

4.2.1.3. Tests statistiques

Les valeurs obtenues à partir des modèles en plâtre font usage de référence. Elles sont comparées aux mesures acquises avec le système développé par chacune des sociétés qui est composé des modèles digitaux 3D et du programme de calcul des mesures.

➤ Fiabilité des systèmes

Classiquement, la fiabilité s'apprécie par le calcul des coefficients de corrélation interclasse (ICC). Le système est jugé fiable si les mesures obtenues par les deux systèmes fournissent des résultats proches. (tableau 4-1)

Cette méthode a permis d'évaluer chaque procédé, Emodel et Orthocad, dans sa globalité.

ICC de 0,8 à 1	Fiabilité élevée
ICC de 0,6 à 0,79	Fiabilité modérée
ICC inférieure à 0,6	Fiabilité douteuse

Tableau 4-1 : Test de fiabilité.

➤ Validité des mesures

Bland et Altman ont mis au point une méthode statistique pour juger de l'adéquation d'une nouvelle technique de mesures cliniques par rapport à la technique

classique. Cette approche résultant de calculs simples est basée sur une représentation graphique des résultats.

La différence moyenne entre les deux systèmes comparés est calculée. Puis les limites d'agrément sont établies, elles correspondent respectivement à :

- Moyenne – 2 déviations standards;
- Moyenne +2 déviations standards.

Pour un échantillon donné, on estime que 95% des différences entre les deux méthodes seront entre ces limites. Il est alors aisé de visualiser sur le graphique quelles mesures individuelles sont en dehors des bornes établies.

Cette judicieuse méthode nous permettra de mettre en évidence les dents dont les mesures sont les plus sujettes aux erreurs.

4.2.2. Méthode pour le set-up

Dans un deuxième temps, un programme de set-up virtuel a été développé. La méthode de sa réalisation est similaire à celle d'un wax set-up classique.

4.2.2.1. Étapes cliniques

- Séparation des dents ;
- Choix de la position de l'incisive mandibulaire en fonction de son inclinaison et de la ligne médiane faciale ;
- Détermination de la forme d'arcade idéale ;
- Réalisation du set-up proprement dit;
- Analyse de l'occlusion finale.

Chacune des étapes sera successivement décrite dans la partie des résultats cliniques. Tout au long de la présentation de nos résultats, les difficultés rencontrées et la pertinence de nos choix seront discutées.

4.2.2.2. Programmes utilisés

➤ VTK

Pour le développement d'un outil de set-up virtuel, un programme de visualisation, de traitement d'images et d'infographie 3-D nommé VTK, « Visualization Toolkit », a été utilisé. Ce programme est basé sur une plate-forme ouverte, disponible sur Internet et totalement gratuite à l'adresse : <http://public.kitware.com/VTK/>.

Il est constitué d'une bibliothèque de fonctions graphiques et permet de programmer de nouvelles applications.

Caractéristiques techniques

Le cœur du système et les algorithmes sont écrits en langage C++, plus de 700 routines sont disponibles.

Ce programme fonctionne sur Windows et Linux; il a été mis au point selon l'approche de Rumbaugh basée sur un principe de vision dit « orienté objet ».

Il est capable de lire des formats d'entrée multiples comme des modèles 3D, 2D ou volumétriques et de nouvelles applications peuvent être créées en programmant en langage C++, Java, Tcl/Tk ou Python.

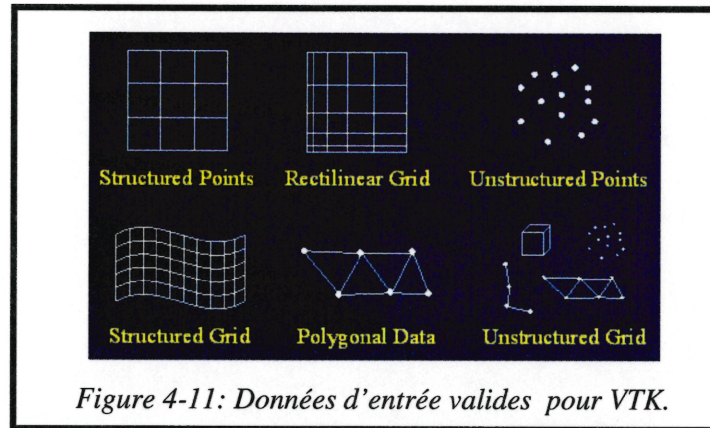
Fonctions

Le programme n'est pas uniquement un système de visualisation mais est aussi le support de centaines d'algorithmes dans les domaines de la visualisation et de l'infographie. Certaines techniques de modélisation plus complexes sont implantées comme la réduction de polygones, le découpage selon une fonction donnée, le lissage des mailles...

Principe

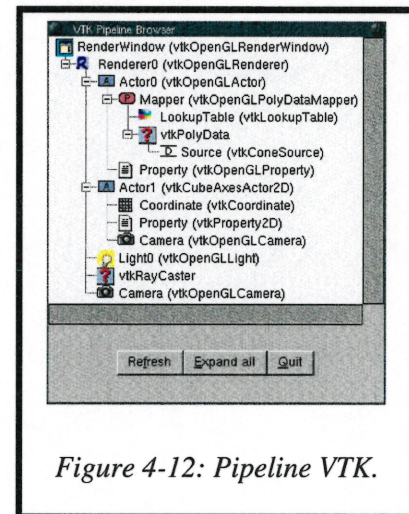
Les données acceptées par le programme doivent être sous une des formes présentées à la figure 4-11. Elles sont composées de nœuds, comme un point 3D, et de cellules, par exemple un polygone formé par un groupe de nœuds.

En orthodontie, les modèles numériques se présentent sous forme de multiples polygones et sont ainsi facilement intégrés.



VTK utilise un modèle fonctionnel de visualisation en « pipeline » des différentes fonctions. Ce schéma permet de décomposer la transformation des données en une série d'étapes bien définies. Un pipeline typique est constitué de trois éléments :

- La source : interface de données externes ou de données générées par des paramètres locaux (exemple : lecture du modèle 3D).
- Le filtre qui opère sur la source (objet) et fournit des images ou formes géométriques (exemple : découpage des dents par un plan).
- Traceur ou « mapper » qui prend les données résultant du filtrage et les traite afin de permettre leur affichage ou leur classement.

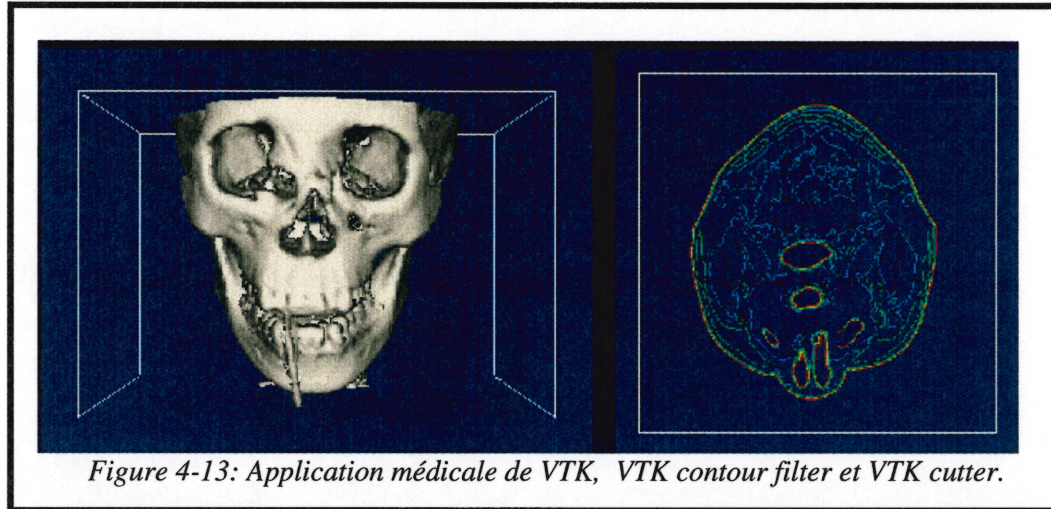


Exemples

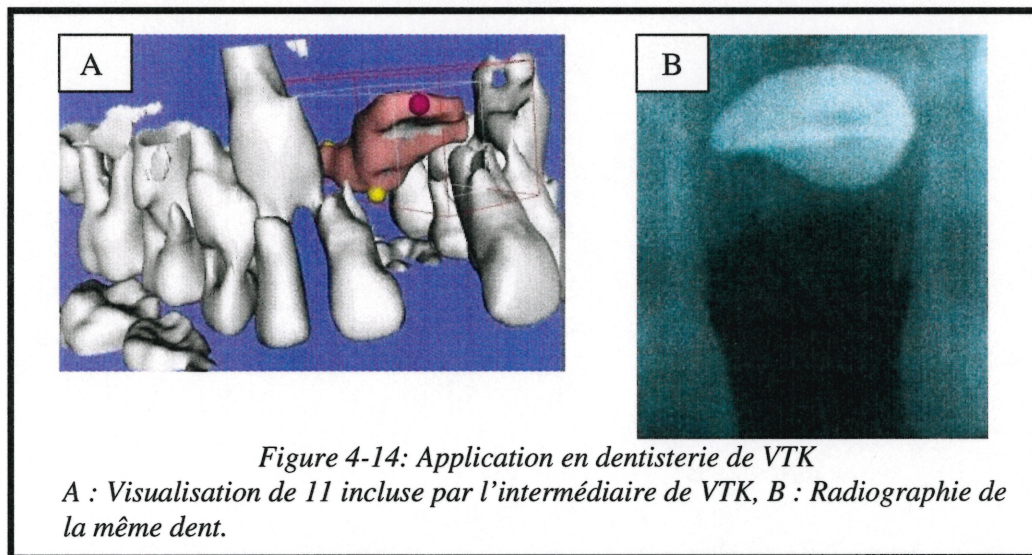
Le programme VTK a de nombreuses applications dans le domaine médical.

Le projet de l'homme visible est basé sur des tomographies, des images obtenues par IRM et des coupes physiques. VTK est utilisé pour générer des surfaces

et des volumes de ces différentes sources d'informations. La qualité des images et les fonctions implantées permettent d'obtenir rapidement des coupes dans tous les plans de l'espace.



L'efficacité et l'utilité du système ont été prouvés lors de l'emploi de VTK en dentisterie pour localiser des dents incluses.



Ainsi, pour notre étude, les fonctions graphiques de visualisation 3D ont été obtenues à partir de la librairie graphique " VTK-Visualization Toolkit 2.0 " et l'application créée a permis de générer un système de visualisation tri-dimensionnelle sur un ordinateur de type individuel. Les nombreuses fonctions offertes par VTK sont appropriées pour la visualisation des modèles d'études digitaux et pour certaines

étapes en vue de la réalisation du set-up. Pour d'autres étapes de la réalisation de ce projet, des fonctions seront développées et codées en TCL/TK.

➤ Mathematica

Mathematica est un logiciel général pour le calcul scientifique et technique dont les applications recouvrent tous les domaines de la science et de la technologie. Ce logiciel a été conçu par Stephen Wolfram et la première version a été livrée en 1988. Dans le cadre de ce travail, la version 4 est utilisée.

Mathematica est un logiciel de calcul formel, de calcul numérique et de calcul graphique; ces catégories sont traitées d'une manière unifiée. C'est aussi et surtout un langage de programmation particulièrement riche et élégant qui permet d'économiser un temps précieux dans le développement de logiciels scientifiques.

Les fonctions principales de Mathematica utilisées dans ce projet permettent de :

- réaliser des calculs numériques et symboliques ;
- visualiser et analyser des fonctions et des données ;
- modéliser des phénomènes physiques ;
- représenter des connaissances tant scientifiques que techniques
- contrôler ou piloter des programmes externes ;
- exécuter des calculs complexes depuis un autre programme.

CHAPITRE CINQ

RÉSULTATS

5. RESULTATS

Les résultats sont présentés en deux volets distincts, une partie concerne la fiabilité des mesures effectuées sur les modèles digitaux et l'autre partie décrit le programme de set-up virtuel développé lors de ce projet.

5.1. VALIDITE DES MESURES EFFECTUEES SUR LES MODELES DIGITAUX

5.1.1. *Mesures effectuées par le truchement du pied à coulisse*

➤ Patient Sébastien B.

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	10,28	10,13	10,33	10,33	10,46	10,306
15	6,91	6,83	6,89	6,95	6,83	6,882
14	7,03	7,06	7,26	7,13	7,15	7,126
13	8,12	8	8,8	8,19	8,14	8,136
12	6,53	6,62	6,61	6,72	6,6	6,616
11	8,43	8,47	8,42	8,41	8,44	8,434
21	8,53	8,59	8,58	8,6	8,51	8,562
22	6,49	6,53	6,52	6,56	6,48	6,516
23	8,12	8,03	8,11	8,12	8,01	8,078
24	6,77	6,89	6,9	6,87	6,86	6,858
25	6,78	6,82	6,77	6,89	6,79	6,81
26	9,85	9,9	9,97	9,97	9,99	9,936
46	10,51	10,67	10,50	10,58	10,44	10,54
45	7,1	7,02	7,05	6,96	7,14	7,054
44	7,12	7,02	7,02	6,92	6,99	7,014
43	7,4	7,33	7,26	7,32	7,26	7,314
42	6,25	6,07	6,09	6,14	6,12	6,134
41	5,72	5,69	5,58	5,58	5,56	5,626
31	5,48	5,6	5,49	5,52	5,5	5,518
32	6,21	6,23	6,27	6,23	6,23	6,234
33	7,46	7,49	7,43	7,45	7,49	7,464
34	7,19	7,07	7,03	6,98	7	7,054
35	7,35	7,44	7,25	7,24	7,19	7,294
36	10,65	10,86	10,71	10,68	10,81	10,742

Tableau 5-1 : Mesures dentaires avec le pied à coulisse, Sébastien B.

➤ Patient Catherine G.

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	9,74	9,6	9,85	9,64	9,62	9,69
15	5,87	5,91	5,96	5,95	5,87	5,91
14	5,85	5,81	5,82	5,87	5,94	5,858
13	7,48	7,44	7,42	7,48	7,4	7,444
12	5,22	5,23	5,23	5,23	5,26	5,234
11	7,38	7,33	7,39	7,38	7,27	7,35
21	7,42	7,36	7,42	7,4	7,33	7,386
22	4,14	4,1	4,39	4,28	4,25	4,232
23	7,1	7,1	7,11	7,12	7,1	7,106
24	6,1	6	6,05	6,03	6,03	6,042
25	5,62	5,57	5,59	5,57	5,59	5,588
26	10,18	10,1	10,08	10,05	10,2	10,122
46	10,21	10,12	9,99	9,96	10,35	10,126
45	6,49	6,41	6,45	6,32	6,53	6,44
44	6,69	6,76	6,67	6,73	6,78	6,726
43	6,73	6,68	6,49	6,55	6,56	6,602
42	5,42	5,31	5,37	5,39	5,42	5,384
41	4,77	4,78	4,75	4,82	4,77	4,778
31	4,74	4,82	4,87	4,93	4,8	4,832
32	4,97	5,03	5,03	4,98	4,84	4,97
33	6,37	6,35	6,32	6,42	6,28	6,348
34	7,02	6,95	6,76	6,87	6,75	6,87
35	6,57	6,45	6,54	6,54	6,66	6,552
36	9,88	9,97	9,86	10,01	10,04	9,952

Tableau 5-2 : Mesures dentaires avec le pied à coulisse, Catherine G.

5.1.2. Mesures effectuées par le truchement d'Emodel

➤ Patient Sébastien B

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	10,05	10,23	10,57	10,5	10,6	10,39
15	6,76	6,6	6,59	6,64	6,69	6,656
14	7,22	7,23	7,18	7,07	7,11	7,162
13	8,23	8,03	8,29	8,24	8,08	8,174
12	6,57	6,55	6,66	6,62	6,49	6,578
11	8,5	8,41	8,12	8,45	8,66	8,428
21	8,54	8,64	8,48	8,35	8,55	8,512
22	6,46	6,85	6,64	6,66	6,7	6,662
23	7,94	8,01	7,97	8,13	8,08	8,026
24	6,72	7	6,96	6,99	6,92	6,918
25	6,59	6,92	6,98	6,78	6,82	6,818
26	9,70	10,05	10,07	10,2	9,77	9,958
46	10,51	10,75	10,55	10,74	10,68	10,646
45	7,13	7,06	7,03	6,79	7,24	7,05
44	6,96	6,95	7,25	6,84	6,95	6,99
43	7,43	7,42	7,39	7,41	7,24	7,378
42	5,96	6,1	6,01	5,97	6,13	6,034
41	5,75	5,73	5,73	5,65	5,75	5,722
31	5,75	5,73	5,48	5,61	5,66	5,646
32	6,21	6,04	6,21	6,31	6,19	6,192
33	7,55	7,59	7,37	7,55	7,49	7,51
34	7	6,97	6,71	6,98	6,89	6,89
35	7,21	7,27	7,04	7,06	7,11	7,138
36	10,78	10,63	10,66	10,62	10,63	10,664

Tableau 5-3 : Mesures dentaires avec Emodel, Sébastien B.

➤ Patient Catherine G.

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	10,03	9,75	9,53	9,58	9,61	9,7
15	5,87	5,7	5,84	5,89	5,91	5,842
14	5,58	5,62	5,84	5,81	5,63	5,696
13	7,33	7,3	7,31	7,25	7,27	7,292
12	5,46	5,28	5,37	4,96	5,26	5,254
11	7,37	7,48	7,36	7,34	7,47	7,404
21	7,42	7,25	7,31	7,28	7,42	7,336
22	4,29	4,18	4,35	3,87	4,27	4,192
23	7,1	7,4	7,25	7,24	7,47	7,292
24	5,96	5,96	5,92	5,95	5,88	5,934
25	5,46	5,85	5,43	5,62	5,55	5,582
26	10,14	9,75	9,95	10,29	10,24	10,074
46	10,28	10,03	10,03	10,18	10,18	10,03
45	6,28	6,29	6,31	6,29	6,39	6,312
44	6,77	6,9	6,83	6,87	6,84	6,842
43	6,54	6,64	6,63	6,37	6,25	6,486
42	5,29	5,24	5,12	5,03	5,22	5,18
41	4,69	4,78	4,6	4,81	4,79	4,734
31	5,04	4,93	4,82	4,65	4,72	4,832
32	5,2	5,13	4,97	4,6	4,58	4,896
33	6,64	6,5	6,35	6,1	6,13	6,344
34	6,77	6,87	6,85	6,99	6,87	6,87
35	6,39	6,27	6,53	6,47	6,35	6,402
36	10,14	10,16	10,24	9,9	10,28	10,144

Tableau 5-4 : Mesures dentaires avec Emodel, Catherine G.

5.1.3. Mesures effectuées par le truchement d'Orthocad

➤ Patient Sébastien B.

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	9,8	9,7	9,8	9,8	9,9	9,8
15	6,6	6,3	6,9	6,8	6,8	6,68
14	7	7,2	7,1	7	7	7,06
13	8,1	7,7	7,5	8,1	8,1	7,9
12	6,9	6,6	7	6,8	6,8	6,82
11	8,3	8,8	8,3	8,2	8,5	8,42
21	8,1	8,6	8,5	8,5	8,5	8,4
22	6,4	6,2	6,6	6,2	6,4	6,36
23	7,3	7,7	7,2	7,7	7,7	7,52
24	6,7	6,8	6,5	6,7	6,5	6,64
25	7,1	6,8	6,6	7	6,7	6,84
26	9,9	10	9,5	9,9	9,6	9,78
46	10,51	10,75	10,55	10,74	10,68	10,646
45	7,13	7,06	7,03	6,79	7,24	7,05
44	6,96	6,95	7,25	6,84	6,95	6,99
43	7,43	7,42	7,39	7,41	7,24	7,378
42	5,96	6,1	6,01	5,97	6,13	6,034
41	5,75	5,73	5,73	5,65	5,75	5,722
31	5,75	5,73	5,48	5,61	5,66	5,646
32	6,21	6,04	6,21	6,31	6,19	6,192
33	7,55	7,59	7,37	7,55	7,49	7,51
34	7	6,97	6,71	6,98	6,89	6,89
35	7,21	7,27	7,04	7,06	7,11	7,138
36	10,78	10,63	10,66	10,62	10,63	10,664

Tableau 5-5 : Mesures dentaires avec Orthocad, Sébastien B.

➤ Patient Catherine G.

Dent	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Mesure 4	Mesure 5	Moyenne
16	10,2	9,9	10,3	10	10	10,08
15	5,8	5,9	5,9	5,7	5,8	5,82
14	5,8	6	6,2	6	6,1	6,02
13	7,2	8	7,5	7,4	7,3	7,48
12	5,5	5,3	5	5	5,2	5,2
11	7,5	7,9	7,5	7,7	7,9	7,7
21	8,1	7,7	7,8	7,6	7,6	7,76
22	4,8	5	4,9	4,9	5,2	4,98
23	7,4	7,3	7,6	6,1	7,8	7,24
24	6,3	6,5	6,1	6,5	6,1	6,3
25	5,7	5,9	5,8	5,8	5,5	5,96
26	10,5	9,9	9,7	9,9	9,8	9,96
46	10,5	10,6	10,6	10,5	10,6	10,58
45	7,1	6,5	6,5	6,5	6,4	6,6
44	7,4	7,1	7	7	7,1	7,12
43	6,3	6,5	6,6	6,5	6,7	6,52
42	5,5	5,3	5,4	5,2	5,1	5,3
41	5	5	5	5	5,2	5,04
31	5,1	4,9	4,9	4,9	4,7	4,9
32	5,2	5,1	4,9	5,1	5	4,896
33	6,9	6,4	6,4	6,4	6,7	6,56
34	6,9	6,9	7,1	7,1	7	7
35	6,4	6	7,1	7,1	7	6,402
36	9,8	9,1	9,9	9,8	9,9	9,9

Tableau 5-6 : Mesures dentaires avec Orthocad, Catherine G.

5.1.4. Fiabilité

	Emodel,Orthocad et pied à coulisse	Emodel/Pied à coulisse	Orthocad/Pied à coulisse	Emodel/Orthocad
FIABILITÉ	99,1%	99,8%	98,9%	98,8%

5.1.5. Comparaison des mesures par la technique de Bland et Altman

La fiabilité du système dans sa globalité étant excellente, nous avons ensuite comparé individuellement les mesures obtenues par les différents programmes. Pour ce faire, la technique de Bland et Altman a été utilisée et les résultats graphiques sont présentés.

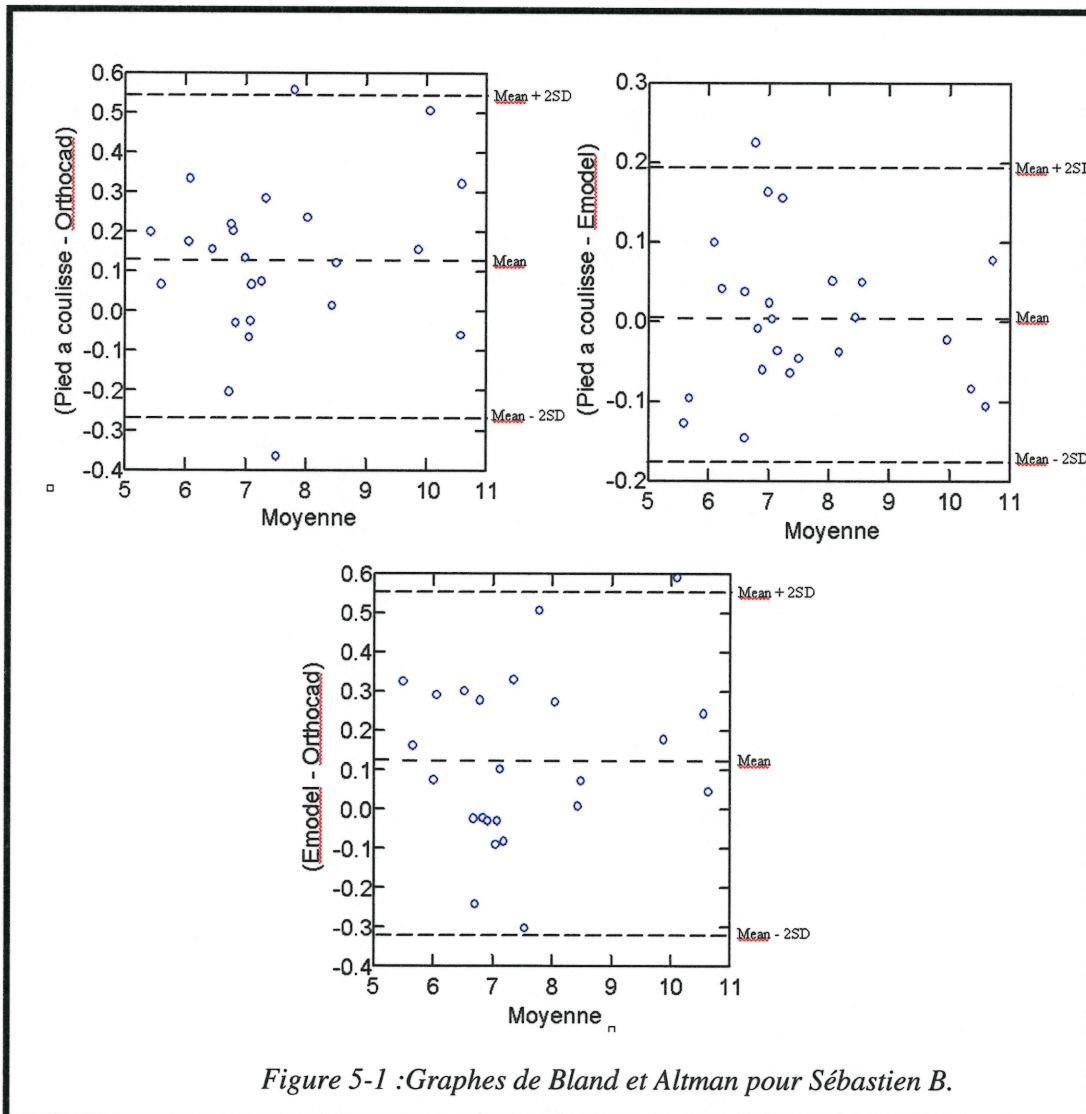


Figure 5-1 :Graphes de Bland et Altman pour Sébastien B.

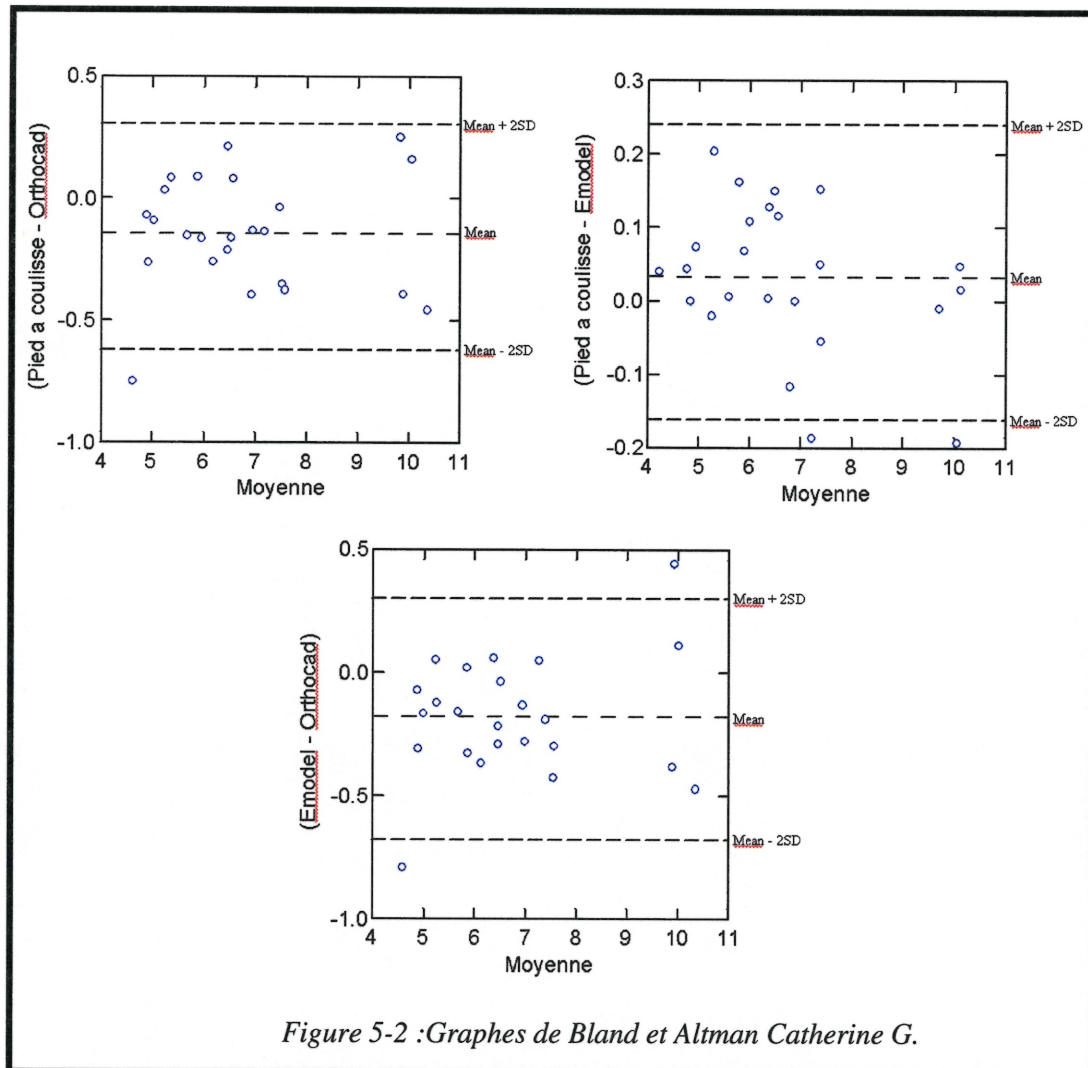


Figure 5-2 :Graphes de Bland et Altman Catherine G.

Les graphiques précédents mettent en évidence :

- Pour Sébastien B., lors de la comparaison des nouveaux outils avec le pied à coulisse, les limites déterminées par deux déviations standards sont respectivement de +/- 0,4mm pour Orthocad et +/- 0,2mm pour Emodel.
- De même pour Catherine G. ces limites sont respectivement de +/- 0,5mm pour Orthocad et +/- 0,2mm pour Emodel.

5.2. PRESENTATION DU PROGRAMME DE SET-UP VIRTUEL

La stratégie pour la réalisation du set-up virtuel repose sur des principes identiques à ceux utilisés classiquement auxquels s'ajoutent les procédés de vision pour la modélisation et la visualisation des modèles.

5.2.1. Modélisation du modèle 3D

Dans la plupart des scènes en trois dimensions, il s'agit de créer dans la mémoire de l'ordinateur une maquette virtuelle des objets réels. Ces maquettes virtuelles sont des représentations géométriques des objets.

Le passage d'un objet réel ou imaginaire à sa représentation géométrique interne s'appelle la modélisation.

Les modèles sont ensuite manipulables et peuvent donc être déplacés, modifiés ou animés.

5.2.2. Visualisation du modèle 3D

5.2.2.1. Type de données

La société Geodigm a envoyé les modèles dans un format STL facilement lisible par le module VTKSTL reader de VTK. Le moulage numérisé est représenté par des polygones, type de données compatible aux formats d'entrée du programme VTK.

5.2.2.2. Placement des caméras

Une fois les modèles chargés en mémoire, il est nécessaire, pour la visualisation, de positionner la caméra aux alentours de l'objet soit manuellement soit selon le mode automatique. La caméra dans un logiciel de vision 3D est en fait un appareil photo quand l'image rendue est unique et une véritable caméra vidéo quand une animation est calculée.

C'est grâce à la caméra que nous visualisons les scènes, elle est notre « œil virtuel » dans la scène. Mais à l'avantage de nos yeux, la caméra est de taille variable, elle n'a pas de véritable dimension et rien ne nous empêche de voyager à l'intérieur d'un modèle.

L'utilisation des caméras est simple et leur manipulation principale réside dans leurs emplacements et dispositions. Au niveau des paramètres modifiables, le réglage de la focale de la lentille de la caméra permet de choisir un grand angle, un angle moyen ou un angle téléphoto. De plus, elle peut utiliser une projection orthographique ce qui est complexe à réaliser avec des lentilles réelles. Nous pouvons également agir sur les plans définissant l'espace que peut voir la caméra.

5.2.2.3. Les acteurs

L'objet, ici les modèles en occlusion, est constitué d'acteurs indépendants : les modèles supérieur et inférieur.

Tous les objets et la caméra sont orientés par les axes X, Y, Z selon le schéma suivant :

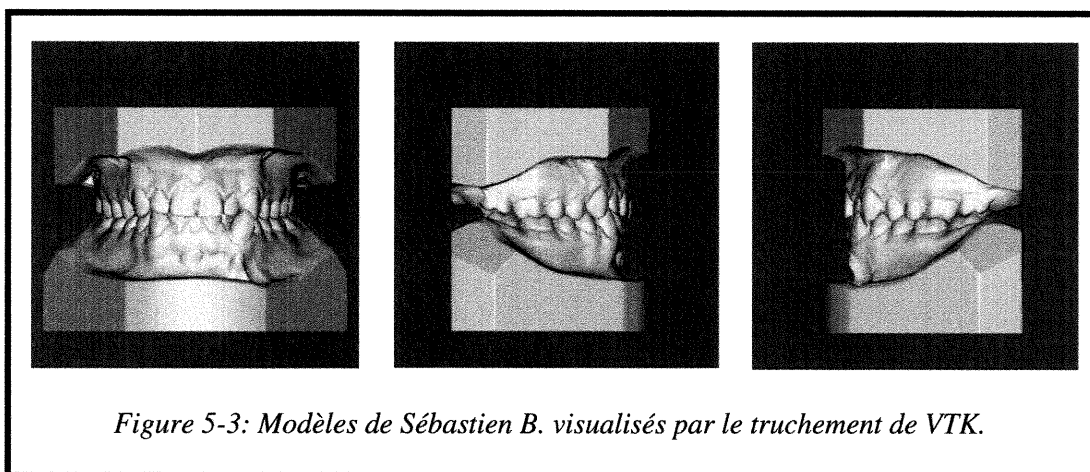
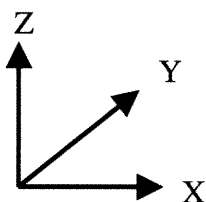


Figure 5-3: Modèles de Sébastien B. visualisés par le truchement de VTK.

5.2.2.4. Ajout de couleur

Les acteurs possèdent de nombreuses propriétés dont la couleur. Il est ainsi aisé de modifier celle-ci ou encore d'ajouter une texture. Dans la majeure partie des applications, l'utilisation des couleurs n'est pas suffisante pour produire un rendu réaliste des scènes.

Pour reproduire fidèlement l'aspect des surfaces et leurs irrégularités, il faut compléter l'habillage des surfaces par la description de textures et des propriétés de surfaces (brillante ou mate, transparente ou translucide).

Les textures peuvent être planes (bidimensionnelles) ou volumique (tridimensionnelles). Dans le premier cas, elles sont alors "collées" et ajustées sur la surface des objets. Dans le second cas, les objets sont "sculptés" dans la matière.

Les textures peuvent être numérisées ou synthétisées (issues de calculs).

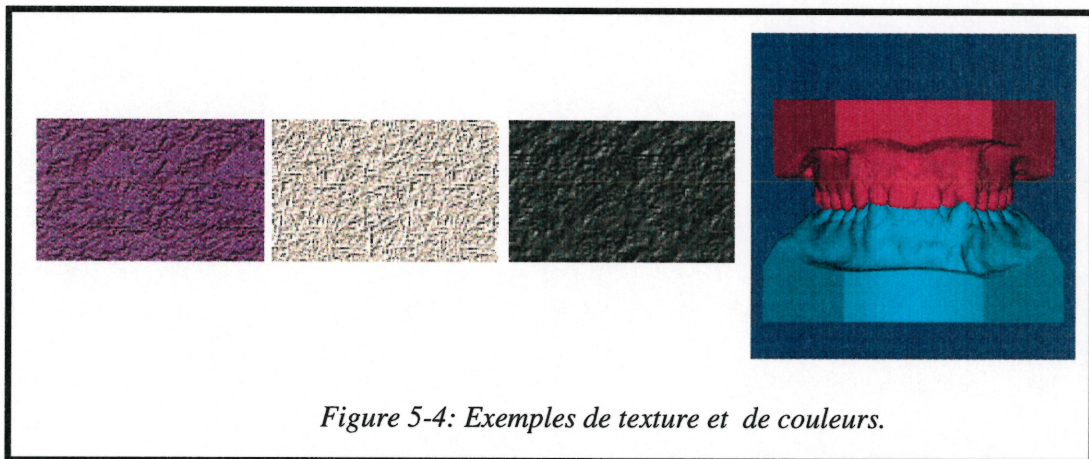


Figure 5-4: Exemples de texture et de couleurs.

5.2.2.5. Vue orthographique/en perspective

Pour afficher un objet sur un écran graphique, on effectue un changement de repère de manière à transformer en "coordonnées écran" les coordonnées de l'objet connues dans le repère global. On effectue une "projection" car on réalise une transformation ayant pour but de projeter la silhouette d'un objet sur un écran virtuel placé entre l'objet et l'observateur (appelé aussi plan de projection). Il existe deux types de projections planaires : orthographique ou perspective.

Une projection parallèle ou orthographique fait en sorte que tous les points soient projetés parallèlement à l'axe de la caméra. Le centre de projection est situé à l'infini ce qui a pour conséquence:

- le parallélisme de tous les vecteurs décrivant les projections,
- la conservation du parallélisme après projection,
- l'indépendance entre la taille d'un objet une fois projeté et sa distance à l'observateur.

Dans une projection en perspective, le centre de projection est situé à une distance finie ce qui a pour conséquence:

- l'augmentation de la taille d'un objet lors de la diminution de la distance entre l'objet et le centre de projection,
- la non conservation du parallélisme.

La perspective permet une vision plus réaliste de l'objet en trois dimensions sur un support en deux dimensions. Elle restitue un effet de profondeur augmentant le réalisme des scènes. Cette représentation est beaucoup plus proche de la réalité perçue par l'œil qu'une projection parallèle. La vue orthographique est une vision brute des modèles sans modification permettant d'apprécier la troisième dimension. Par contre, seule la vue orthographique permet de réaliser des mesures exactes de toutes les distances lors d'une impression papier.

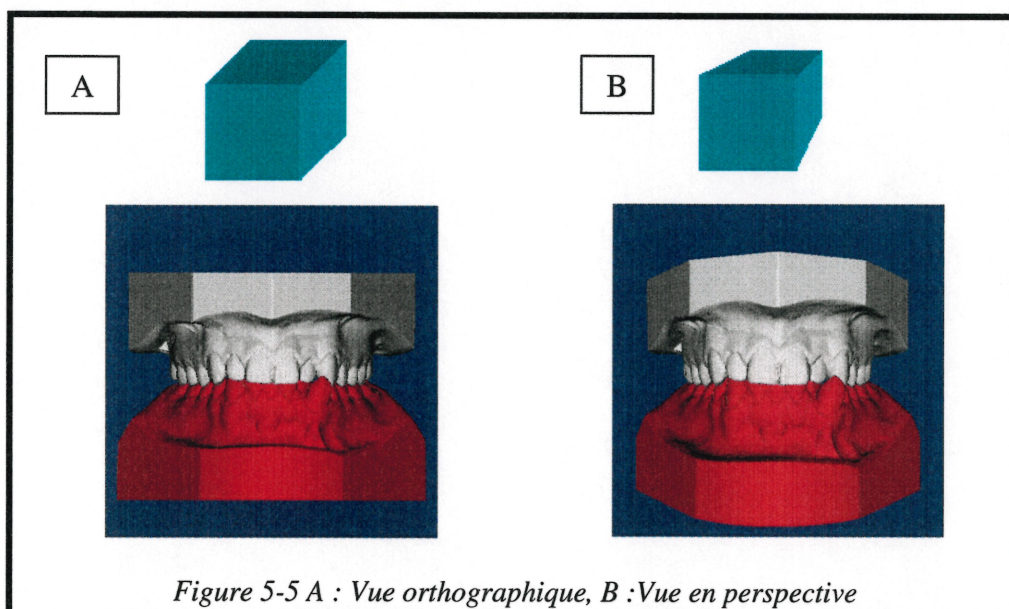


Figure 5-5 A : Vue orthographique, B : Vue en perspective

5.2.2.6. Lissage des facettes

Lors de la visualisation initiale, les facettes sont nettement visibles.

A chacune d'entre elles est associée une normale, vecteur perpendiculaire au plan de cette facette. La direction du vecteur normal à la surface peut être précisée au niveau de chaque facette ou de chaque sommet qui la constitue.

Cette normale est utilisée pour différencier les faces intérieures et extérieures de la facette et calculer l'effet de l'illumination. Chaque facette possède une normale donc une couleur, ce qui rend les frontières entre les facettes apparentes.

Afin d'obtenir un aspect plus lisse, il est possible d'utiliser un filtre de lissage des facettes. Le principe repose sur l'interpolation des normales des trois points du polygone formant la facette, afin de déterminer une normale moyenne (technique de Phong).

Par ce processus, les brisures entre les facettes ne sont plus visibles, l'apparence est plus continue, moins découpée.

Il est à noter qu'il s'agit juste d'un rendu et qu'il n'y a pas de perte de définition de l'objet lui-même.

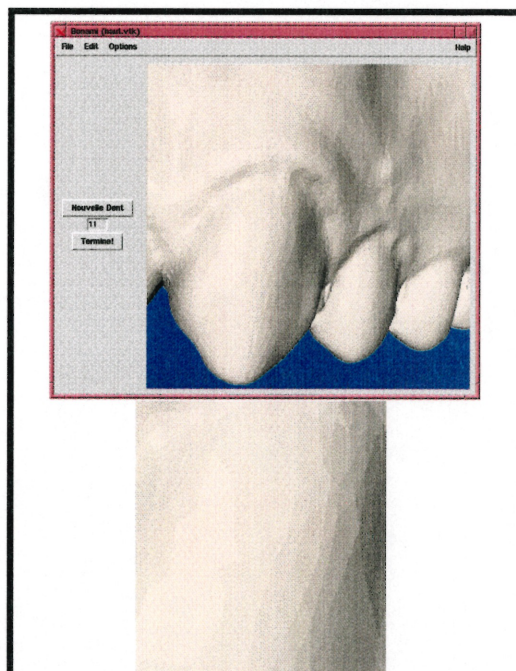


Figure 5-6: Visualisation des facettes

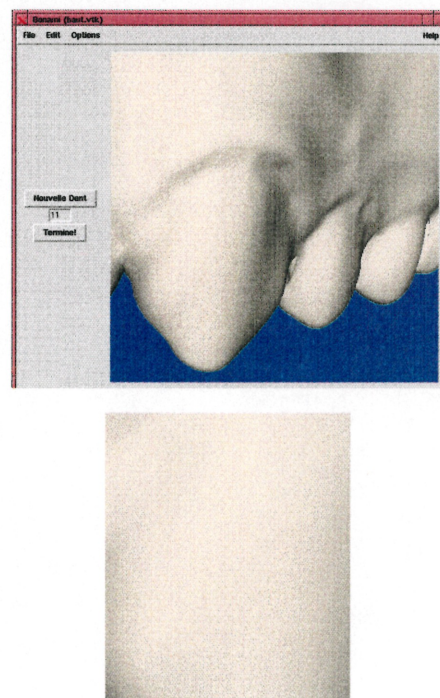
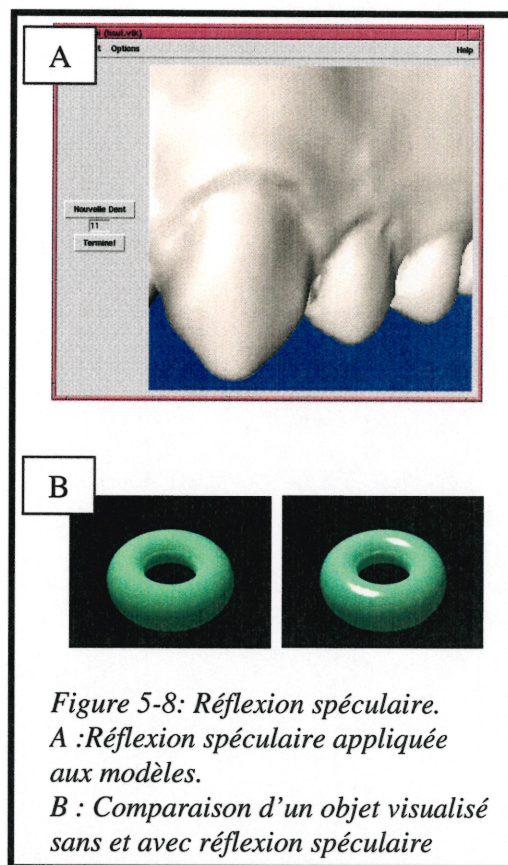


Figure 5-7: Lissage des facettes

Afin d'améliorer encore le rendu, il est possible d'ajouter un aspect de réflexion spéculaire. La réflexion spéculaire s'apparente à la réflexion d'un miroir, c'est la réflexion typique des objets luisants.

L'objet qui apparaissait mat a désormais un aspect brillant. Le principe repose sur la réflexion de la lumière sur l'objet, ce qui accentue l'impression de forme et donne un aspect de modèle savonné.



*Figure 5-8: Réflexion spéculaire.
A : Réflexion spéculaire appliquée aux modèles.
B : Comparaison d'un objet visualisé sans et avec réflexion spéculaire*

5.2.3. Animation des modèles

Avec un simple clic de souris, il est possible de bouger les modèles dans leur ensemble. En réalité, c'est la caméra qui est en mouvement. Toutes les vues du modèle peuvent être obtenues sans limitation.

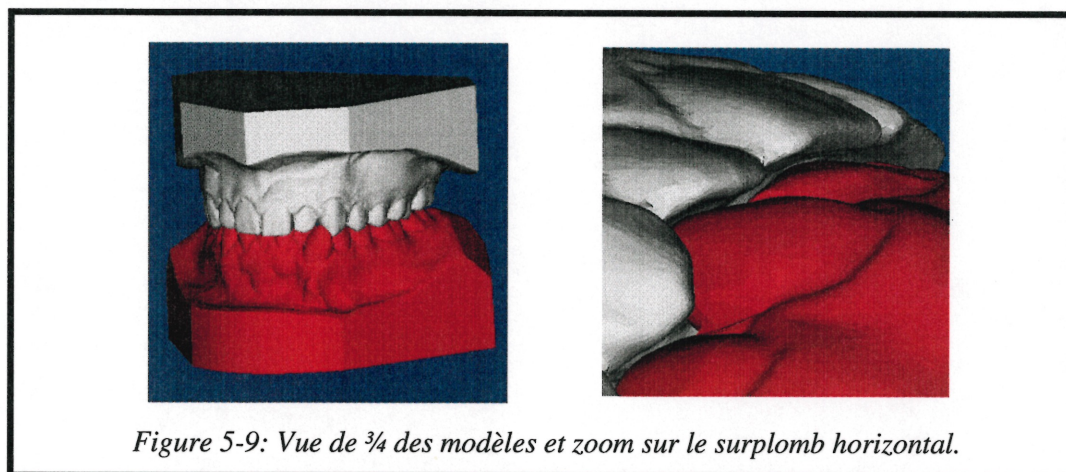
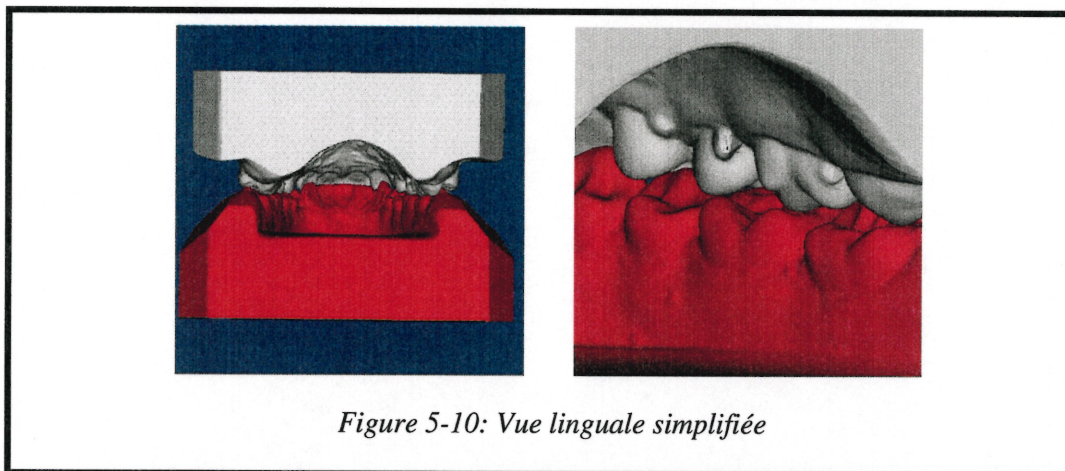


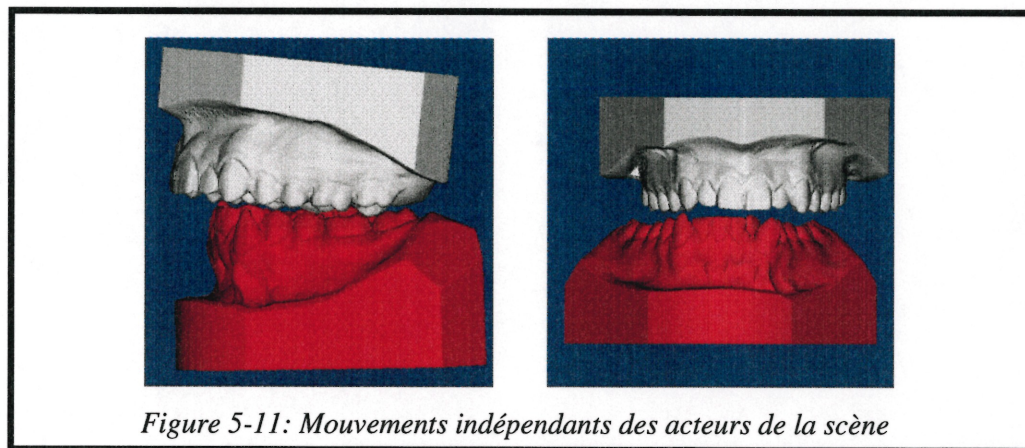
Figure 5-9: Vue de 3/4 des modèles et zoom sur le surplomb horizontal.

Les modèles sont ainsi visualisés aussi facilement que lors de la manipulation classique des modèles en plâtre. La caméra peut se placer à l'intérieur ainsi la vision linguale est aisée.



L'interaction entre l'utilisateur et l'objet se résume à trois types de mouvements qui peuvent être combinés : rotation, translation et zoom.

En sélectionnant un acteur spécifique, il est possible de le déplacer indépendamment des autres acteurs de la scène. Les modèles inférieur et supérieur peuvent être mis en mouvement séparément. On imagine aisément et nous le montrerons dans une étape ultérieure que si les dents sont sectionnées, il est facile de les déplacer indépendamment les unes des autres.

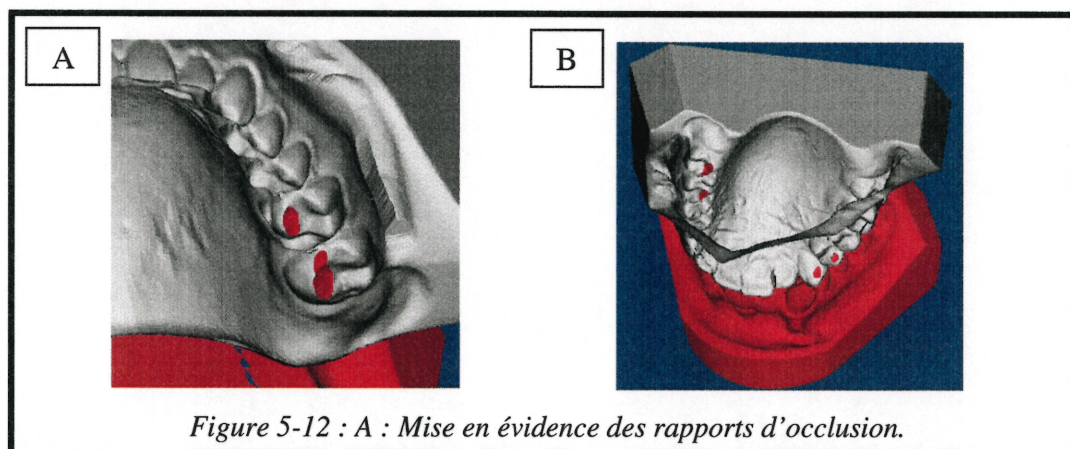


5.2.4. Modèles en occlusion

Afin d'obtenir tous les détails morphologiques, les modèles sont nécessairement scannés séparément selon différentes vues. La numérisation de chaque modèle individuellement ne donne cependant aucune indication sur les rapports d'occlusion. Il est impensable de chercher l'occlusion mathématiquement puisqu'elle ne répond pas à aucune loi.

Geodigm nous a fait part du procédé qu'elle a adopté. Initialement, la cire d'occlusion était scannée et les informations étaient mises en correspondance avec celles des modèles numérisés, mais ce processus ne leur semblait pas assez efficace. Désormais, les modèles sont taillés en occlusion (avec la cire) puis la partie postérieure est utilisée comme plan de référence. Les modèles sont alors scannés de nouveau mais cette fois-ci en occlusion et les données sont corrélées à celles des modèles pris séparément.

Afin de vérifier la qualité des résultats obtenus par cette technique, nous avons réalisé un test simple. Les modèles numérisés sont colorés de manière distincte puis les surfaces dont les normales pointent vers la caméra sont effacées. Ceci permet de voir à l'intérieur des dents. Les résultats sont présentés sur la figure 5.12.



Nous ne sommes pas habitués à voir ce genre d'images ainsi il peut être difficile de les visualiser correctement. Pour interpréter l'image A, il faut avoir à l'esprit que le palais est en premier plan et que les cuspides des molaires ne pointent

pas vers nous mais vers le modèle inférieur en rouge. Cette image est équivalente à une empreinte. Ainsi on remarque que le modèle inférieur en rouge perfore la surface occlusale des molaires supérieures. Sur la figure B, on note clairement que ce phénomène se retrouve sur l'ensemble des molaires supérieures. Les modèles ne sont pas simplement en contact dans cette zone mais pénètrent l'un dans l'autre. Il s'agit de petites erreurs de reconstruction lors du processus de mise en occlusion des modèles scannés.

5.2.5. Segmentation des dents

Lors de la réalisation du set-up classique la segmentation des dents est l'étape la plus délicate. Les dents doivent être séparées sans perte de substance puis identifier par numérotation.

Pour effectuer cette étape par ordinateur, plusieurs alternatives s'offraient à nous : mode automatique, semi-automatique ou manuel.

5.2.5.1. Mode automatique

Une segmentation totalement automatique nécessite un algorithme capable d'identifier correctement chaque type de dents puis de les séparer. La variabilité anatomique laisse présager un haut niveau de complexité pour la reconnaissance des dents. Quant à la segmentation, toute rotation ou malposition dentaire peut l'affecter. Ces deux niveaux de difficultés étant à l'origine de multiples erreurs, un mode complètement automatique a été rejeté.

5.2.5.2. Mode semi-automatique

Pour les mêmes raisons, les auteurs qui ont choisi le mode semi-automatique doivent intervenir afin de corriger les erreurs. Dans les études que nous avons analysées, le processus s'est révélé long et sans grands avantages. De plus la segmentation est réalisée en deux dimensions avec perte d'une partie de l'information (figures 2.47 et 2.49).

Ainsi, si les deux options précédentes ont été envisagées, le choix s'est porté sur le mode manuel.

5.2.5.3. Mode manuel

La segmentation est effectuée par découpage avec plans. La dent est isolée par des plans successifs. Cette méthode présente deux avantages : la segmentation est réalisée en trois dimensions et ce procédé est très précis.

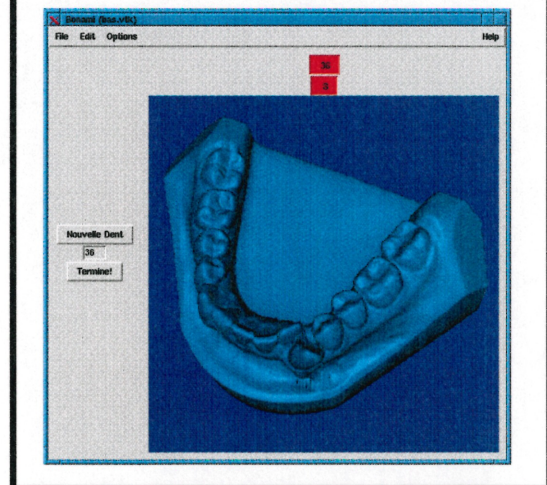
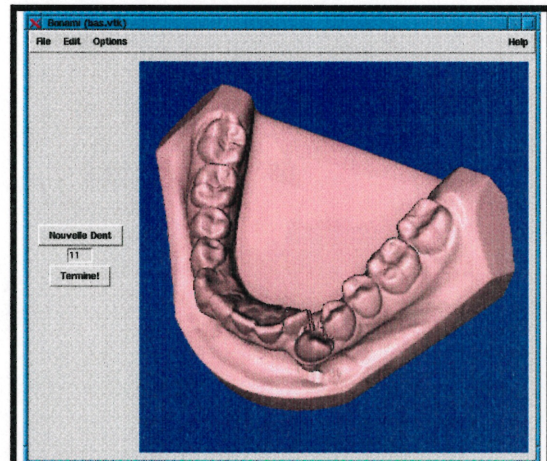
➤ Étapes

L'interface permet de sélectionner le modèle supérieur ou inférieur du patient.

La segmentation peut alors débuter.

Au début du processus, le manipulateur clique sur « nouvelle dent » et entre le numéro de dent qu'il va segmenter, selon la nomenclature internationale.

Ce numéro s'affiche en haut de l'écran.



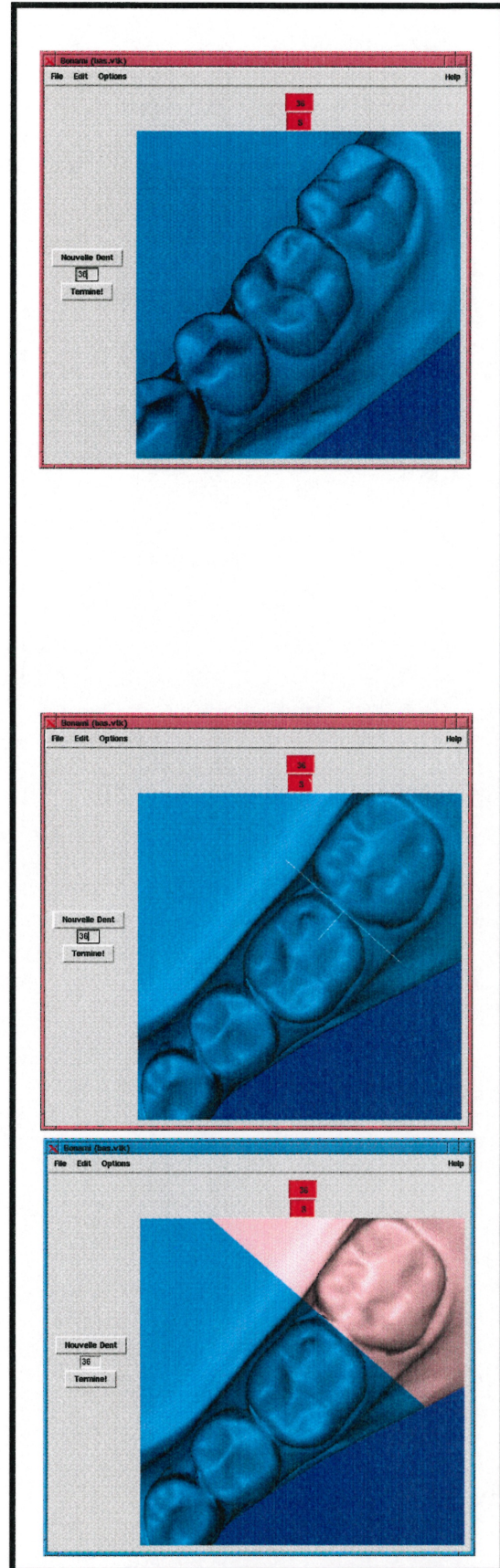
Afin de faciliter le découpage, il est important que la dent soit agrandie. En sélectionnant la dent avec la flèche sur l'écran, la caméra se rapproche automatiquement et rapidement de la région à découper. Cette fonction évite les manipulations de rotations, translations et agrandissement du modèle nécessaires pour un positionnement correct de celui-ci avant la segmentation.

Durant les essais des autres programmes de visualisation, cette étape est apparue lente et peu aisée.

Le premier plan de coupe est défini par le centre de projection de la caméra et une ligne sélectionnée par nos soins.

Une ligne perpendiculaire au plan de coupe permet d'identifier la région à conserver de celle à supprimer.

La zone en rose correspond à la partie du modèle à supprimer. La partie bleue est de nouveau découpée.

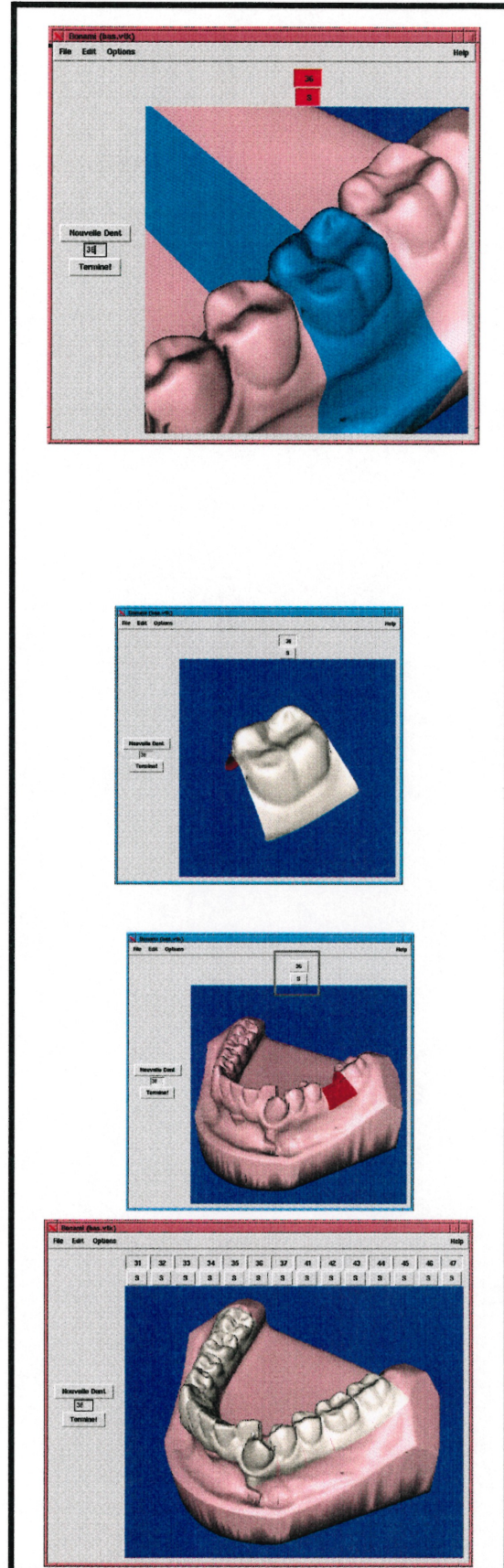


La dent est alors isolée étape par étapes par découpage par plans successifs. Comme il s'agit d'une véritable segmentation en trois dimensions, il est possible et conseillé de modifier la position du modèle. Ceci permet d'apprécier au mieux des points de contact afin d'augmenter la précision de la segmentation le positionnement du plan de coupe et de minimiser la perte de substance interdentaire.

La dent découpée peut être isolée et devient alors un acteur à part entière de la scène.

L'extraction de cette dent est simple, il suffit de cliquer sur l'icône identifiant cette dent situé en haut de l'écran.

La procédure est répétée pour chaque dent.



Chaque dent peut alors selon le plan de traitement être extraite. Dans notre exemple, 33 et 44 sont supprimées.

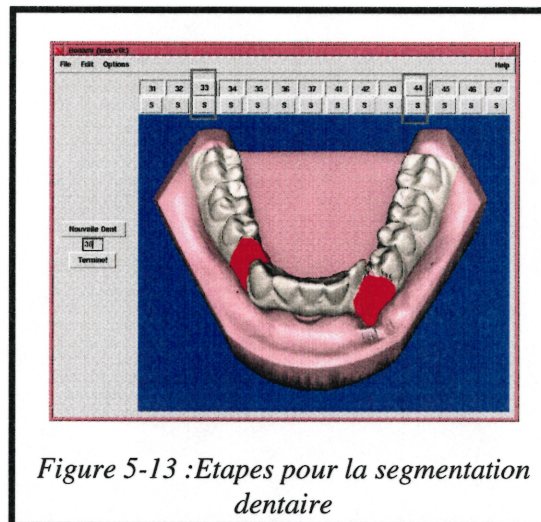


Figure 5-13 : Etapes pour la segmentation dentaire

5.2.6. Projection des modèles sur la radiographie

La radiographie est scannée en **!Fin de formule inattendue** 600 dpi puis la résolution est réduite à 150 dpi par filtrage afin de lisser les bruits présents. Les données obtenues, de type grille structurée, sont alors aisément introduites dans le programme VTK.

Le cliché est alors identifié comme un objet et devient un acteur de la scène. La radiographie possède les mêmes fonctions que les modèles et en particulier peut être animée.

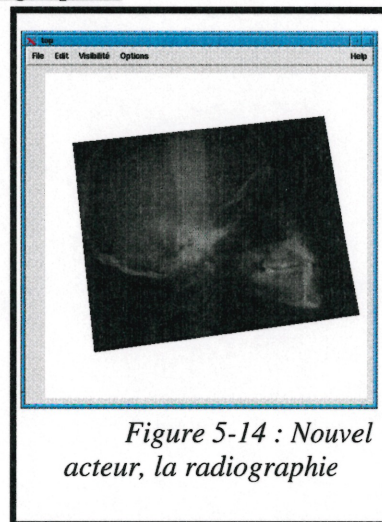


Figure 5-14 : Nouvel acteur, la radiographie

Dans la technique de set-up classique, une fois les dents séparées du modèle, l'orthodontiste utilise la radiographie et le modèle pour choisir le positionnement de l'incisive mandibulaire. Dans ce projet, l'idée est de corréler les informations des modèles en plâtre avec celles de la radiographie en superposant ces deux objets.

Pour ce faire, nous avons décidé de projeter la radiographie sur le modèle. Plusieurs points sont alors à considérer pour minimiser les erreurs :

- l'échelle : lors de la projection, on veillera à la mise à l'échelle de l'objet projeté, la radiographie sur le modèle en plâtre.

- le mode visualisation : il est important de se mettre en mode orthographique pour avoir une projection correcte sans déformation des structures osseuses sur le modèle.

Précédemment, nous avons précisé que les animations possibles pour un objet sont de trois ordres : translation, rotation et changement d'échelle. Lors de la réalisation de la radiographie céphalométrique de profil, le film est parallèle au plan sagittal médian de la tête. Si on considère que la radiographie appartient au plan Y-Z dans notre système de repère 3D, les transformations pour la superposition sur le modèle sont elles aussi de trois ordres :

- Translation 2D dans le plan Y-Z ;
- Rotation autour de l'axe des X ;
- Changement d'échelle dans le plan Y-Z.

La transformation est dite transformation rigide avec changement d'échelle ou encore transformation de similarité. Ainsi, celle-ci s'effectue en deux dimensions et le système à résoudre pour superposer les deux objets est une mise en relation de deux lignes, une appartenant au modèle et une à la radiographie, c'est à dire de 4 inconnues ou encore de 4 points à identifier.

En pratique, cette superposition est simple. L'orthodontiste identifie 2 points sur la radiographie et les mêmes points sur le modèle. Celle-ci vient alors se placer automatiquement à l'échelle sur le modèle qui sert de référence et les structures se superposent.

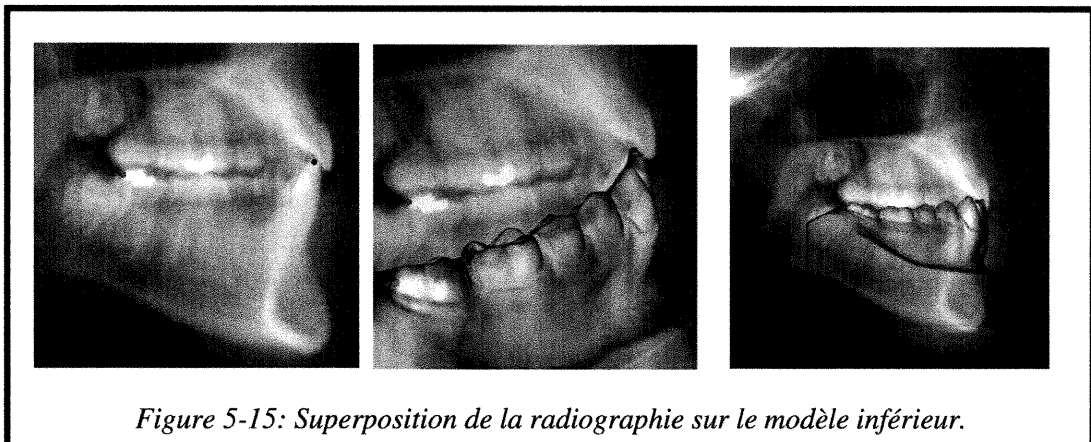


Figure 5-15: Superposition de la radiographie sur le modèle inférieur.

On peut alors voir très distinctement l'ensemble des structures de la radiographie comme la symphyse mandibulaire ou même la dent de sagesse « imprimées » sur la structure en plâtre. La radiographie est une texture projetée.

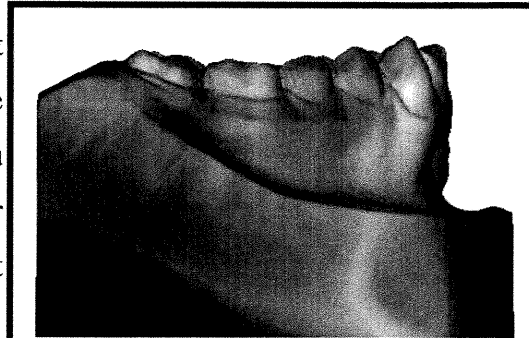


Figure 5-16: Modèle inférieur avec texture.

La méthode est identique pour positionner le modèle maxillaire.

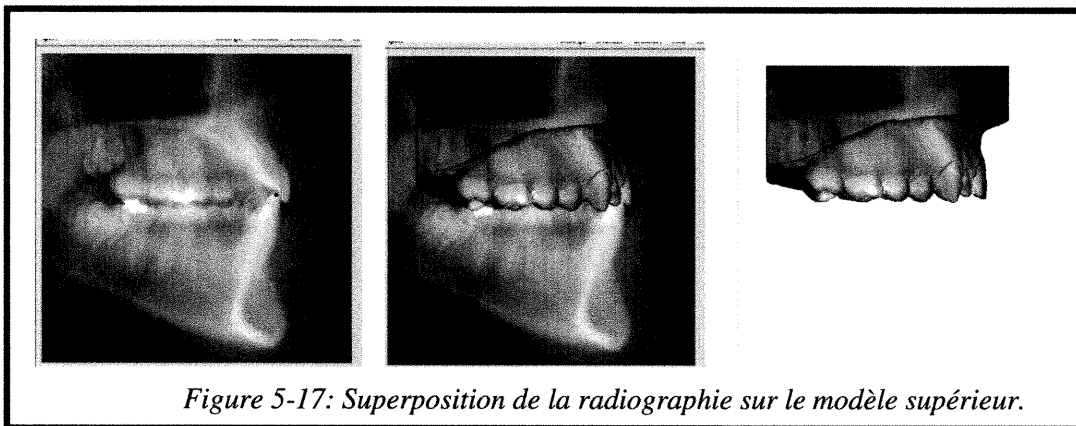


Figure 5-17: Superposition de la radiographie sur le modèle supérieur.

Il est aussi possible de positionner un des modèles puis l'antagoniste se place automatiquement puisque l'occlusion de départ a été enregistrée lors de la modélisation.

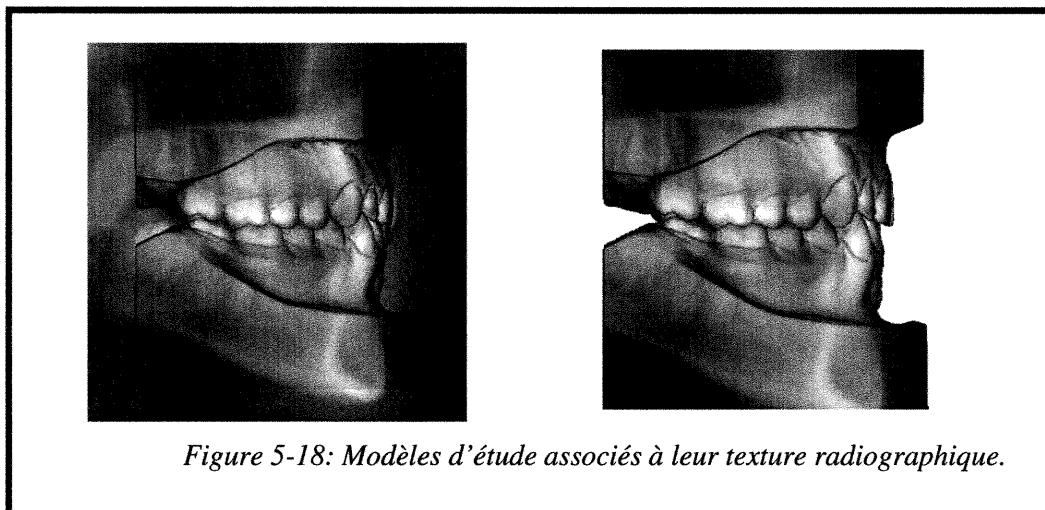


Figure 5-18: Modèles d'étude associés à leur texture radiographique.

5.2.7. Systeme de coordonnées des dents

Lors du set-up, chaque dent doit corriger sa position en premier, deuxième et troisième ordres.

Pour réaliser cette correction sur la maquette prévisionnelle par ordinateur, chaque dent doit posséder son propre système d'axes. Nous avons choisi de repérer l'axe long, le diamètre mésio-distal ainsi que la hauteur occluso-gingivale pour le positionnement des boîtiers.

5.2.7.1. Application de la méthode de Motohashi

Dans un premier temps, nous avons pris la décision d'implanter la méthode de repères de Motohashi étudiée dans la revue de littérature. La méthode consiste à sélectionner cinq points puis à construire les axes de repères.

➤ Etape 1

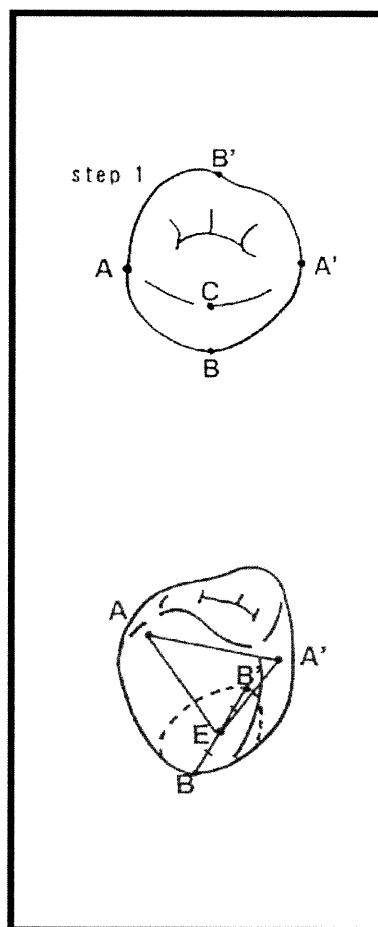
Pour chaque dent, sélectionner :

- A et A' points mésial et distal;
- B et B' points bucco et linguo-cervical ;
- E milieu de BB' ;
- C pointe cuspidienne.

Construire le plan représentatif AA'E.

Le plan AA'E correspond à un plan de coupe frontal pour une dent donnée. Il définit une orientation de premier et de troisième ordre pour l'alignement à suivre et est directement dépendant de la position plus ou moins antéro-postérieure des points A et A'.

B et B' sont facilement identifiés.



➤ Etape 2

Construire les projections perpendiculaires de B et C sur le plan représentatif. La ligne qui passe par ces points projetés est l'axe long de la dent, nommé ici ligne TI. Cet axe fournit une information d'orientation du deuxième ordre.

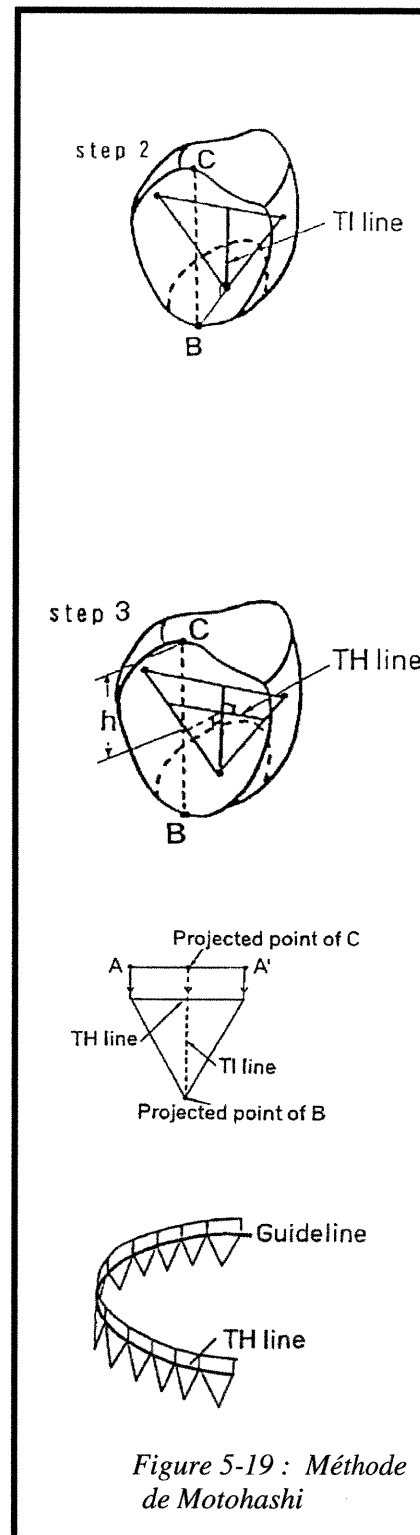
➤ Etape 3

Déterminer la ligne TH telle que :

- elle appartienne au plan représentatif,
- elle soit perpendiculaire à TI
- elle soit à une distance H, définie pour une dent donnée, de la projection de C.

De plus, le segment TH représente le diamètre mésio-distal puisque ses extrémités sont définies par la projection perpendiculaire des points A et A' sur la droite TH.

Ces deux droites TI et TH contiennent pour chacune des dents les informations nécessaires en vue d'un alignement dans les trois plans de l'espace.



Lors de la programmation de cet algorithme dans le programme VTK, les points sont représentés par des sphères:

➤ Sélection des points

Sélection des points **A** et **A'**: **AA'** représentant le diamètre mésio-distal de la dent.

Sélection des points **B** et **B'**: centrés dans le sens mésio-distal et situés à la jonction gingivo-dentaire.

Sélection du point **C**, point cuspidé (dans l'exemple de la molaire ci-contre, le point cuspidé doit être choisi dans le sillon médian intercuspide pour ne pas modifier l'orientation de l'axe long, on compense ensuite la différence de hauteur H)

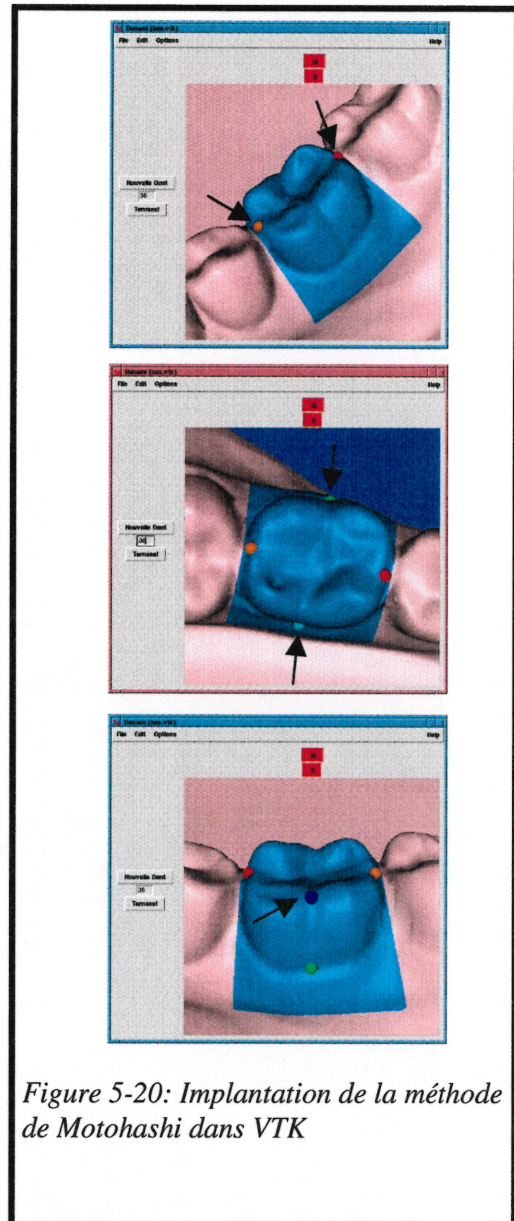


Figure 5-20: Implantation de la méthode de Motohashi dans VTK

Contrairement aux programmes commerciaux actuellement proposés, il est possible de déplacer arbitrairement le modèle au cours de la sélection des points A et A'. De plus, on peut aisément modifier la position de ces derniers et ce indéfiniment.

➤ Mise en évidence des axes

L'algorithme permet ensuite de déterminer l'axe longitudinal dentaire en noir, l'axe mésio-distal soit la ligne de jonction entre la zone bleue et verte et l'axe de positionnement du boîtier soit la jonction de la partie verte et de la face vestibulaire de la dent.

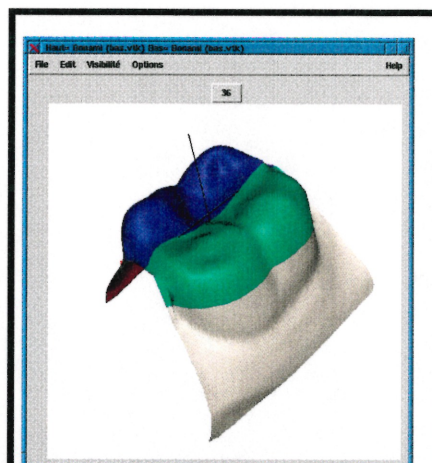


Figure 5-21 : Axes repérés pour une molaire

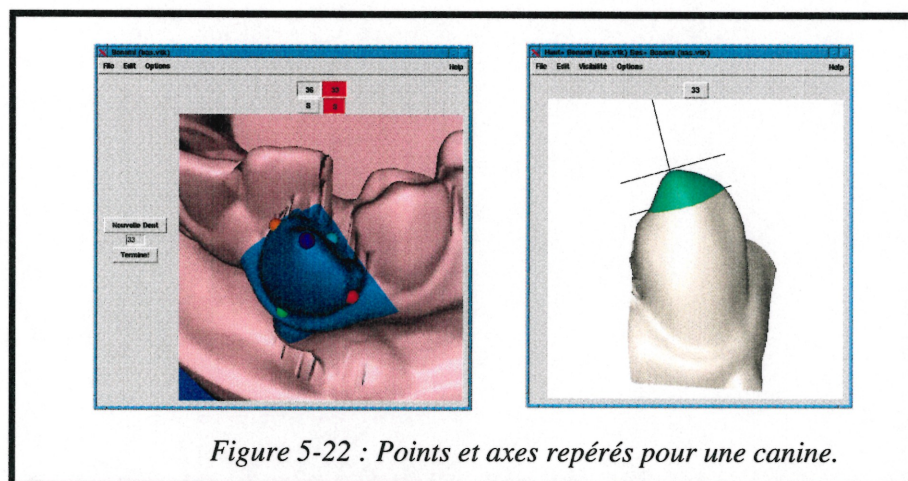


Figure 5-22 : Points et axes repérés pour une canine.

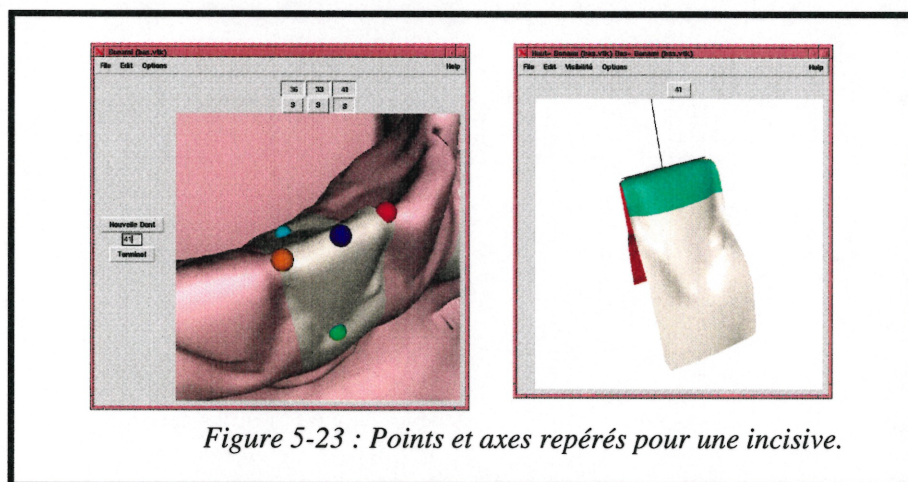


Figure 5-23 : Points et axes repérés pour une incisive.

5.2.7.2. Ajustement de la technique de Motohashi

Les points sélectionnés permettent de mettre en place un système de repères dentaires utilisés par la suite pour l'alignement des dents. Le positionnement précis de ces points est une étape primordiale pour minimiser les erreurs.

Lors des essais préliminaires, nous avons pu mettre en évidence que des adaptations de la technique de Motohashi étaient nécessaires. Les principaux problèmes que nous avons rencontrés étaient les suivants :

➤ **Positionnement du point cuspidé sur les incisives**

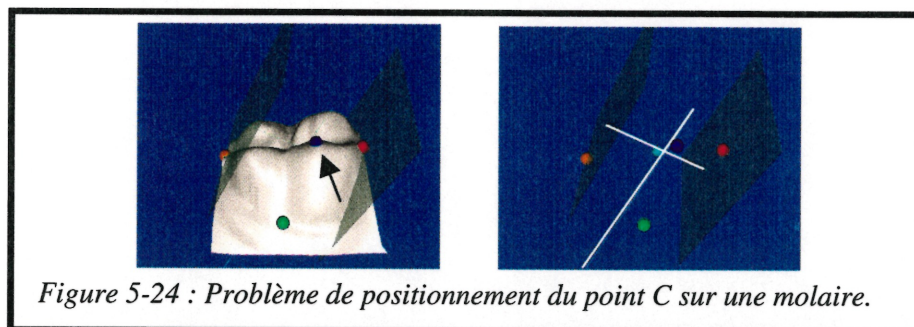
Le bon sens nous a amené à définir ce point comme appartenant au bord incisif et centré mésio-distalement. Il est probable qu'une erreur sera introduite à ce stade car il n'y a pas de pointe cuspidienne à proprement dite mais celle-ci est minime.

On peut noter que lors d'abrasions dentaires de la pointe cuspidienne, le même type de faute peut être incorporée et que le positionnement devient alors quelque peu subjectif.

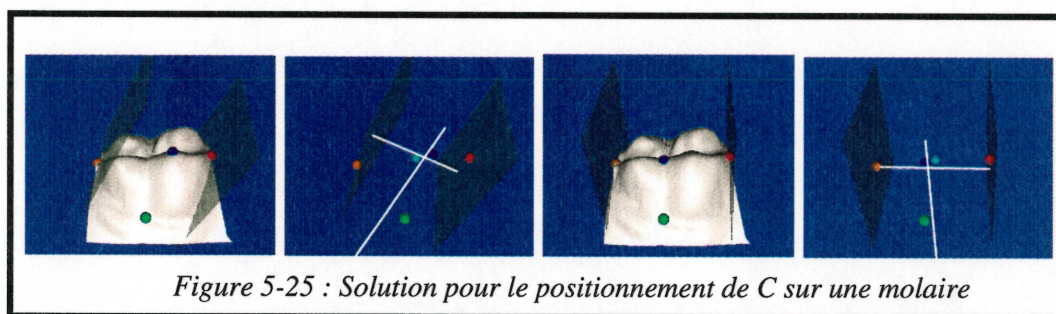
➤ **Positionnement du point cuspidé sur les molaires**

Motohashi ne fournit aucune indication pour le positionnement des points sur les molaires, cependant la technique doit être adaptée puisque la molaire comporte deux ou trois pointes cuspidiennes vestibulaires et que ces cuspidés sont très éloignées des points B et B' dans le sens mésio-distal.

Dans un premier temps, nous avons choisi de positionner les points A, A', B et B' comme pour les autres dents et avons sélectionné la cuspidé mésio-vestibulaire comme cuspidé de référence. Ce choix menait à une importante erreur dans la définition de l'axe long de la dent dans le deuxième ordre (inclinaison de CE)

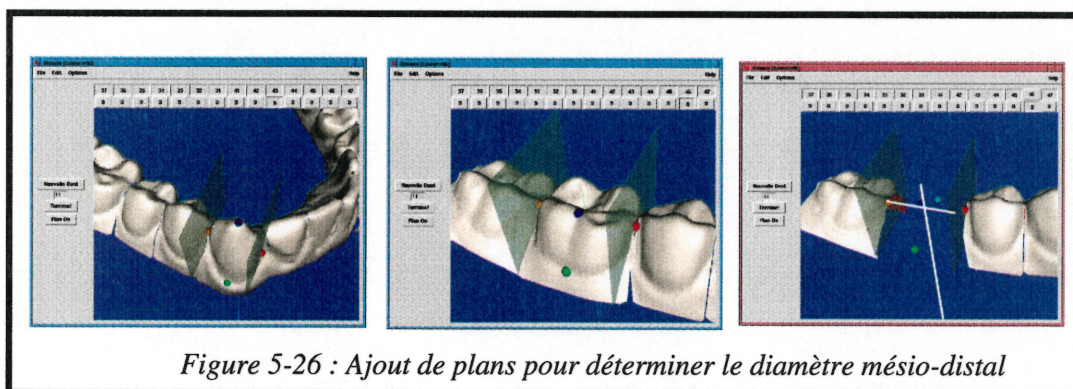


Dans un second temps, nous avons choisi de positionner les points A, A', B et B' classiquement et avons adapté la position de C. Ce point a été sélectionné à l'intersection des deux cuspidés au niveau du sillon médian intercuspide. L'erreur d'inclinaison de l'axe est corrigée mais ce point n'est pas correctement positionné en Z, soit verticalement. Comme les hauteurs sont introduites par l'orthodontiste selon la hauteur de collage désirée, il est aisé de modifier cette hauteur selon la nouvelle situation pour compenser la différence verticale.



➤ Positionnement des points A et A'

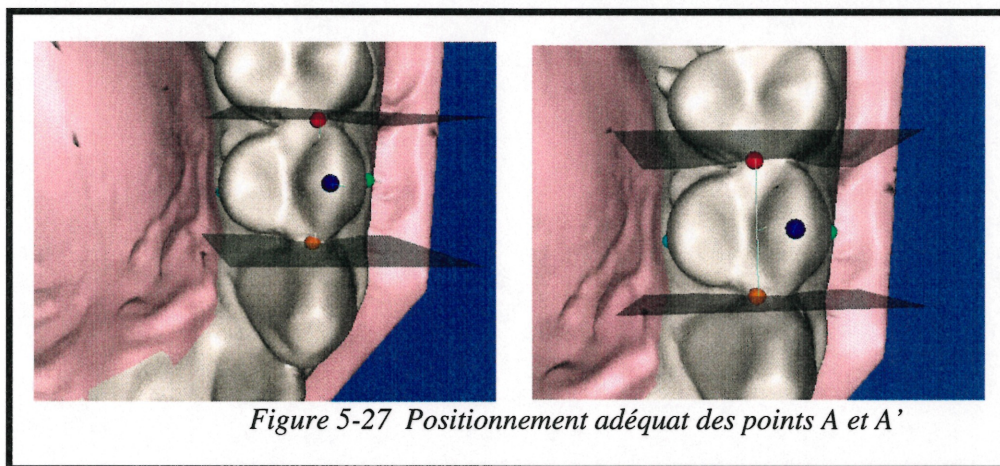
Pour déterminer de manière plus précise le diamètre mésio-distal, des plans encadrant le segment AA' ont été ajoutés. Ces plans apparaissent dès que les points A et A' sont sélectionnés et sont perpendiculaires au segment AA'.



En plus d'augmenter la précision pour définir le diamètre mésiodistal, ce procédé permet de s'assurer qu'il n'y a pas de perte de matériau entre deux dents.

Lors de l'emploi de la méthode de Motohashi, une erreur fréquente est l'inclinaison trop importante du plan représentatif en troisième ordre sur les molaires et les prémolaires. Cet écueil est directement lié au positionnement de A et A'. Ces points fournissent trois types d'informations, une pour la correction des rotations, une pour la largeur et une pour l'inclinaison en troisième ordre. Or si on positionne les points A et A' de manière à ce qu'ils déterminent exactement la largeur mésio-distale, ils sont souvent situés, sur les prémolaires surtout, en position vestibulaire, ce qui a une incidence sur l'inclinaison de l'axe longitudinal.

Une solution apportée à ce défaut est de sélectionner les points A et A' pour qu'ils déterminent le mieux possible la largeur de la dent, à ce stade les plans apparaissent, on peut alors tout en maintenant les points sur ces plans, pour conserver la distance adéquate, modifier leur position antéro-postérieure. Cette astuce permet d'éviter d'introduire une erreur en troisième ordre de l'inclinaison dentaire.



5.2.8. Matérialisation des plans de référence sur la radiographie

Lors de l'analyse céphalométrique, de nombreux points, angles, plans sont tracés. Toutes ces mesures peuvent évidemment être retranscrites sur le système proposé dans cette étude.

Nous avons cependant décidé de matérialiser uniquement deux plans de référence très utiles lors du diagnostic orthodontique et pour effectuer le set-up :

- ❖ Le plan de Francfort ;
- ❖ Le plan mandibulaire.

Le tracé de chacun des plans résulte de la sélection de deux points seulement puisque la radiographie est en deux dimensions. Ces points sont facilement identifiables et peuvent être modifiés indéfiniment.

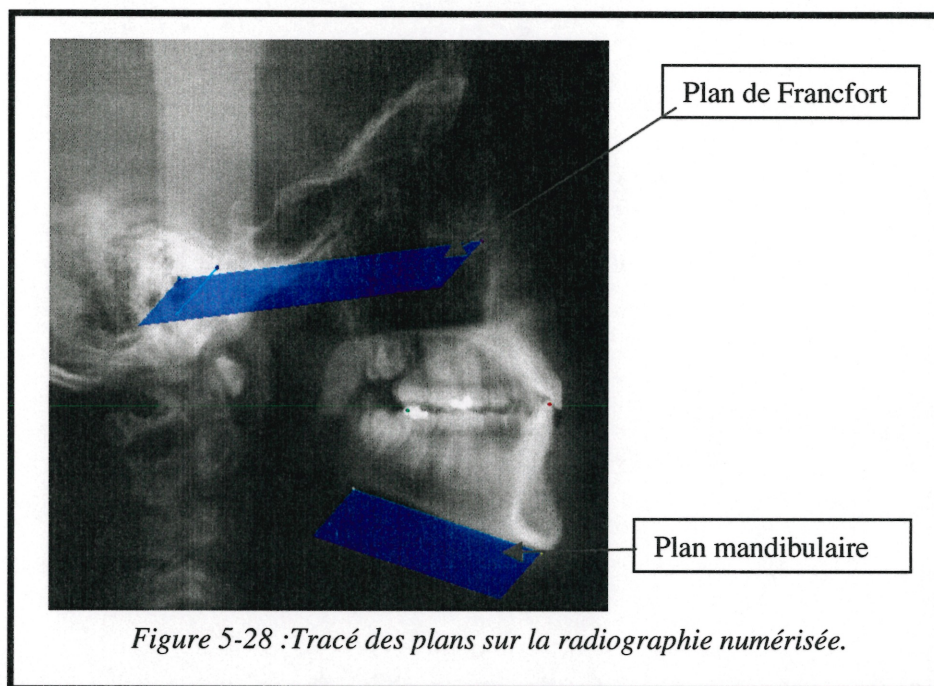
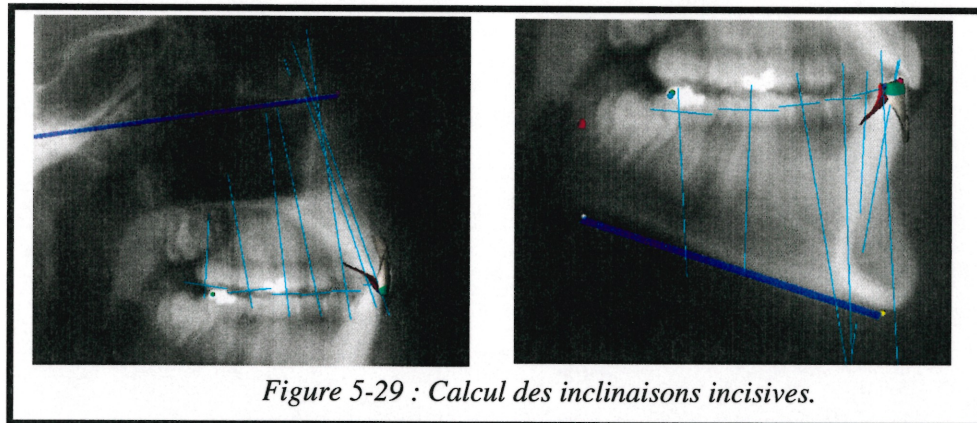


Figure 5-28 :Tracé des plans sur la radiographie numérisée.

5.2.9. Calcul des inclinaisons incisives

Pour initier un set-up, il est nécessaire d'établir un point de départ, le point de référence du set-up. Dans la méthode classique, ce point est déterminé sur le modèle et correspond à l'incisive inférieure dont la position semble la plus physiologique.

Après avoir déterminé les axes dentaires par la technique de Motohashi et identifié les plans de Francfort et mandibulaire, il est possible, par la superposition des modèles sur la radiographie, de calculer les inclinaisons supérieures et inférieures de chacune des incisives. L'ensemble de ces valeurs fournit l'information nécessaire pour débiter le set-up.

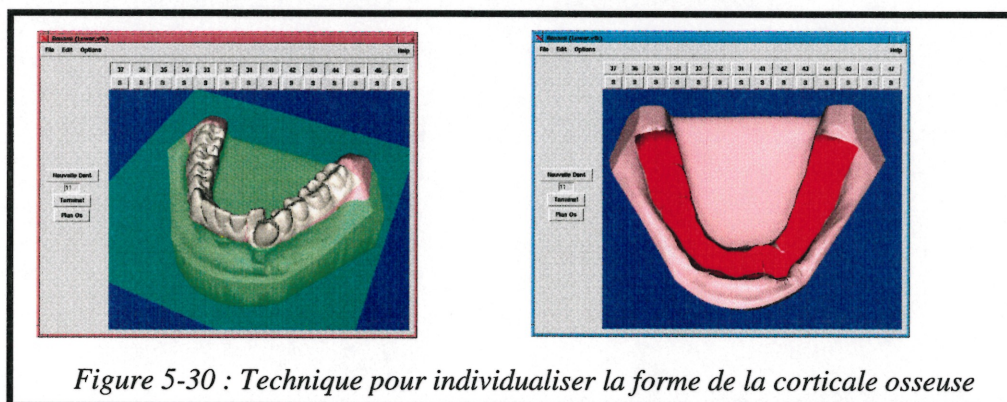


Il est aussi intéressant de vérifier les résultats obtenus avec le modèle virtuel 3D projeté sur la radiographie et la radiographie céphalométrique sur laquelle les racines des incisives ne sont généralement pas très nettes. L'orthodontiste peut alors en fonction de ces données choisir l'inclinaison incisive qu'il considère comme idéale pour la maquette prévisionnelle.

5.2.10. Choix de la forme d'arcade

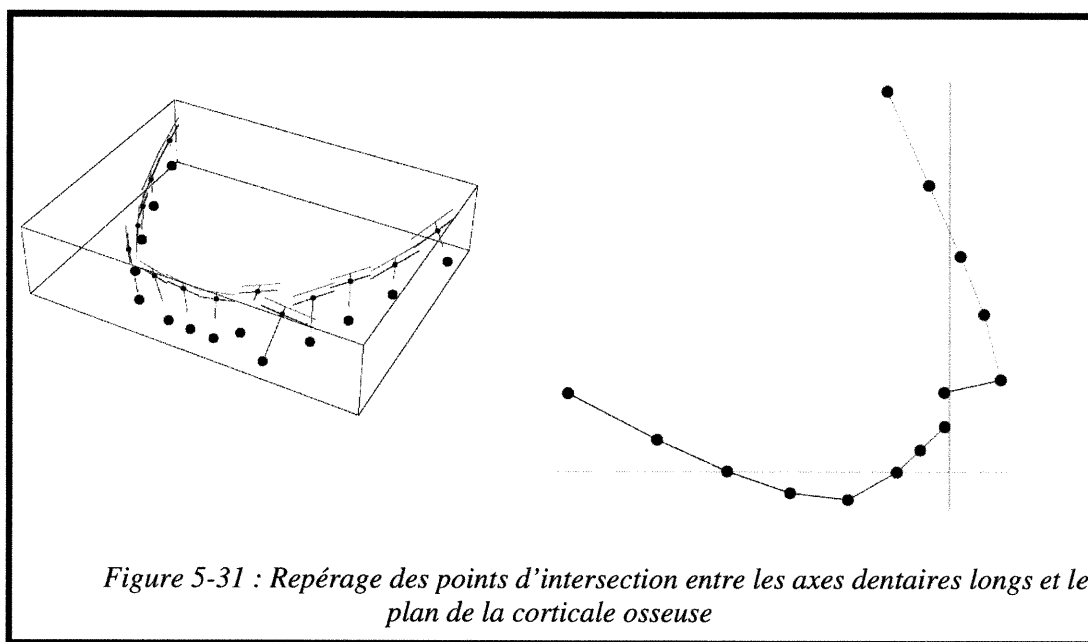
Le choix de la forme d'arcade est un débat complexe dans la profession. Dans ce travail, nous avons cherché à déterminer une forme d'arcade la plus physiologique possible. Ainsi nous n'avons pas déterminé de forme selon une règle spécifique mais nous avons privilégié une approche morpho-fonctionnelle.

L'idée de départ est qu'il est essentiel de respecter les limites de la corticale osseuse. Cette région a donc été isolée à partir des modèles numérisés 3D. Pour ce faire, trois points passant sous les dents au niveau de la corticale ont été sélectionnés afin de définir le plan de coupe puis ce plan a été individualisé.



Pour déterminer la forme d'arcade, nous avons utilisé la méthode des moindres-carrés. Cette méthode statistique est un instrument très utilisé en analyse de données. Elle repose sur le principe suivant : soit une série de N points expérimentaux, on se propose de trouver la courbe qui passe au plus près des points. Le critère minimisé est la somme des distances au carré entre les points et la courbe.

Dans notre travail, les points sélectionnés pour la forme d'arcade correspondent aux intersections entre les axes dentaires longitudinaux et le plan de coupe dans la corticale osseuse.



Nous avons délibérément limité les solutions à l'obtention d'une courbe quadratique qui est le type de courbe le plus répandu en clinique orthodontique. Il pourrait être envisageable de concevoir d'autres formes de courbes mais le système d'équations non linéaires qui en résulterait serait plus complexe à résoudre.

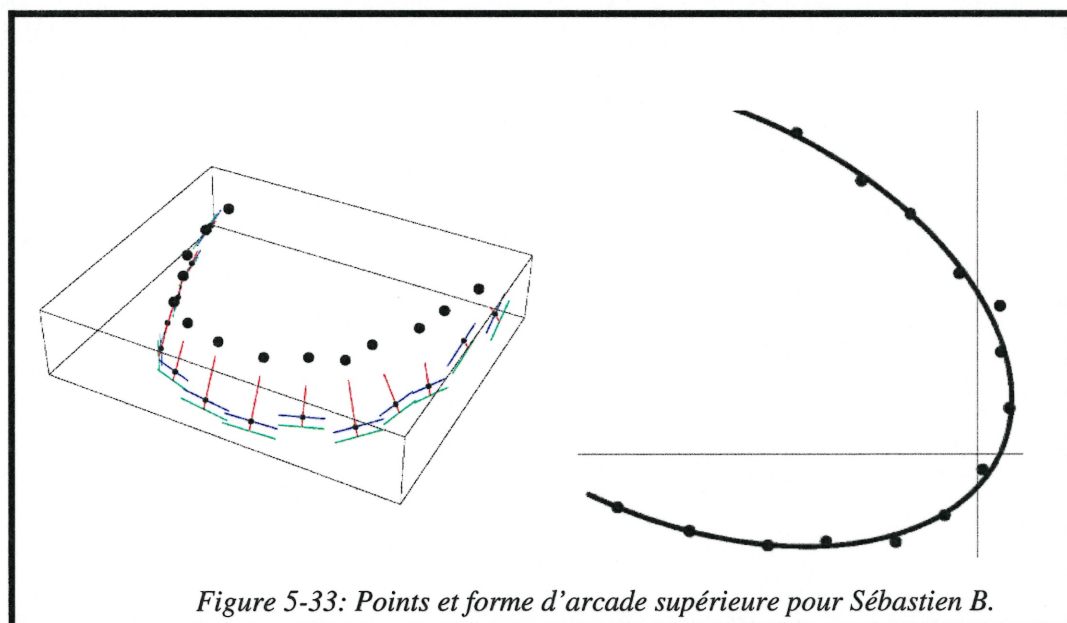
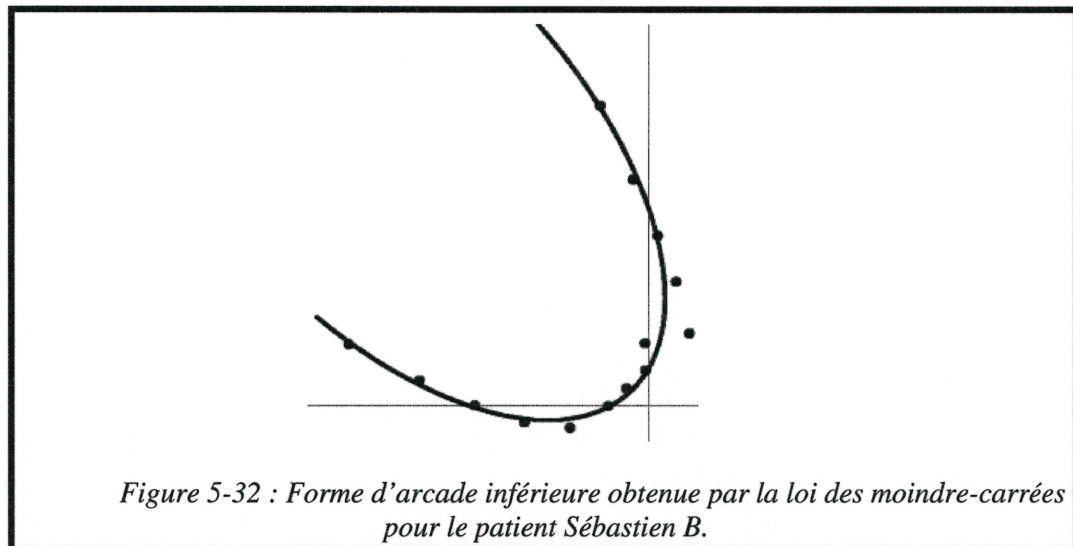
Le problème mathématique revient alors à résoudre l'équation suivante :

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

Cette équation est résolue par la méthode des moindres-carrés et la nature de la quadratique dépend du signe du discriminant ($\Delta = b^2 - 4ac$). Si Δ est positif, c'est une hyperbole; si Δ est négatif, c'est une ellipse. Dans la grande majorité des cas,

une ellipse va être obtenue car la position des molaires ne prédispose pas à une forme hyperbolique.

Dans notre exemple la méthode des moindres carrés est employée afin de rechercher la forme d'arcade idéale pour notre patient. Faisant suite à la décision d'extraire la dent 32, un ensemble de 13 points est pris en compte à la mandibule et de 14 points au maxillaire.



5.2.11. Alignement dentaire

La méthode proposée formule le problème d'alignement dentaire comme un problème d'optimisation qui consiste à satisfaire des contraintes exprimées sous forme de fonctions d'objectifs.

Une fois les axes de référence caractérisés et les contraintes sélectionnées, l'alignement est résolu numériquement de façon automatique.

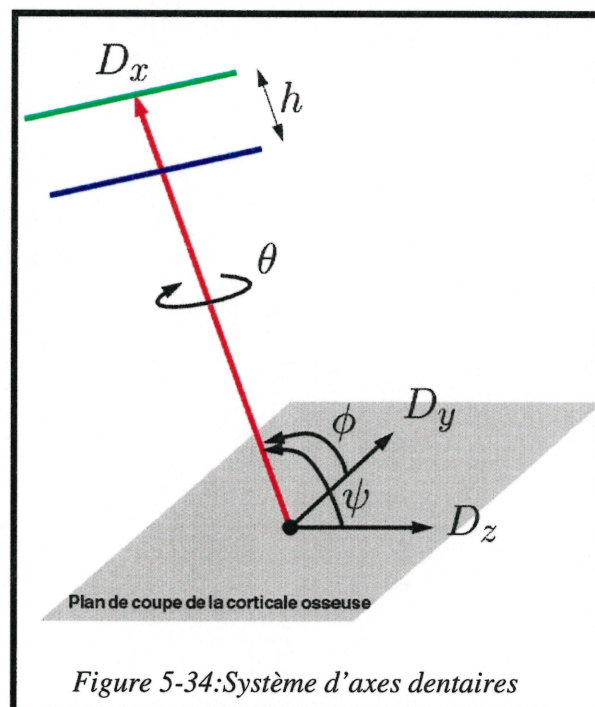
5.2.11.1. Notion d'alignement 3D

Le changement de position d'une dent lors de l'étape d'alignement est déterminé en trois dimensions par une transformation rigide de cette dent combinant une translation et une rotation.

Au préalable à tout déplacement, il est indispensable de définir le l'objet de référence et les modalités de mouvement. Pour de faire, on spécifie :

- Le système de référence à tradater;
- Le centre de rotation;
- L'ordre dans lequel s'effectuent les transformations que sont la translation et la rotation.

Le modèle privilégié est présenté sur la figure 5.34. La dent dans son ensemble, matérialisée par les axes de couleurs, subit les translations selon D_x , D_y et D_z . Le point de référence pour chaque dent est le point d'intersection de l'axe longitudinal dentaire (axe rouge), et du plan de coupe de la corticale osseuse. Ce point est aussi le centre de rotation pour le système.

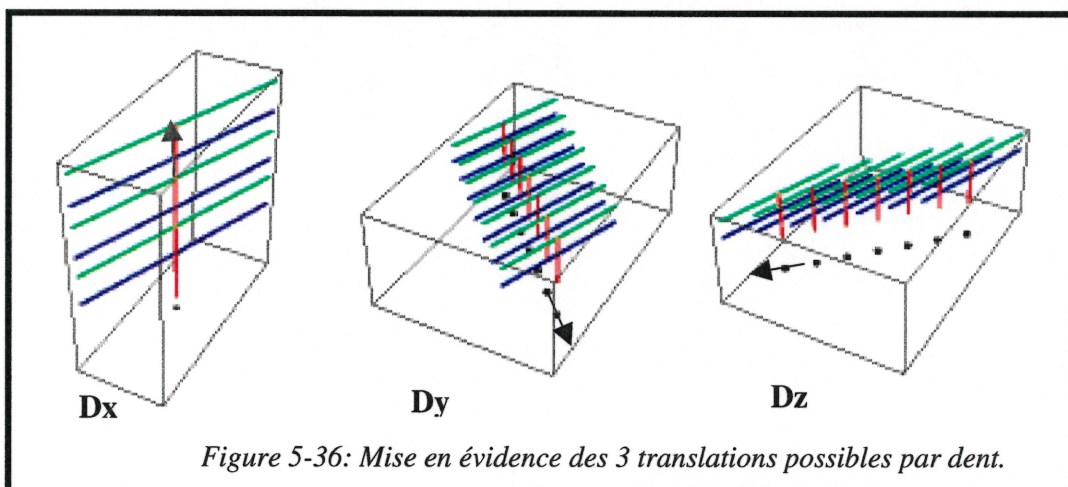
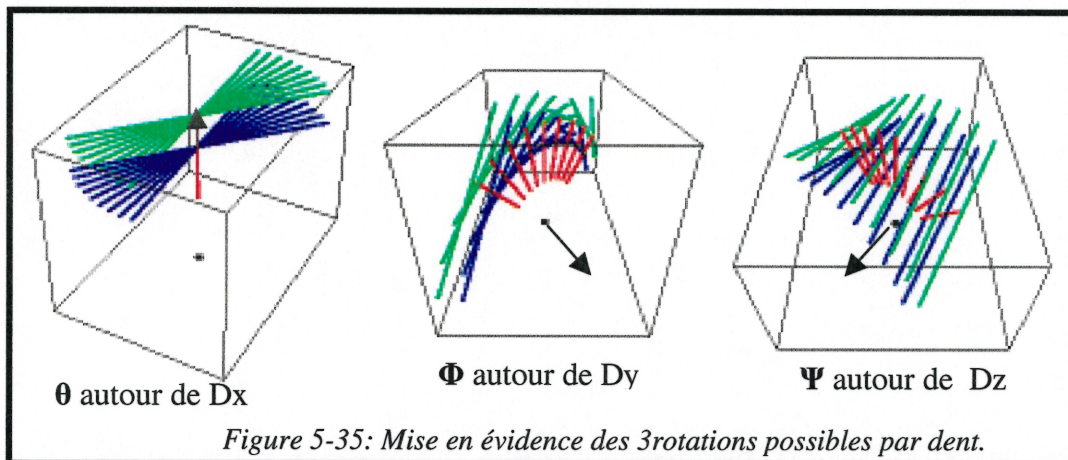


Le choix du point de référence s'appuie sur des considérations mathématiques afin de faciliter la minimisation. En effet, le calcul de l'intersection de la dent avec le plan osseux a un coût important lorsque la dent se déplace et rend la résolution mathématique du problème d'alignement complexe voire impossible.

5.2.11.2. Espace d'alignement

L'espace de travail correspond à l'espace pour aligner les dents. Nous avons spécifié que la transformation subie par chacune des dents est une combinaison de translation et de rotation dans l'espace en trois dimensions.

Pour une dent donnée, le nombre de paramètres est donc de six, 3 rotations et 3 translations, selon les axes définis précédemment. Ainsi pour une arcade donnée, l'espace de travail est déterminé par 84 paramètres.



5.2.11.3. Notion de fonction de coût

Le problème de l'alignement est traduit par un ensemble de contraintes imposées aux dents à aligner. Le programme permettant de résoudre les contraintes calcule, si elle existe, une solution qui satisfait toutes les conditions simultanément, c'est à dire l'alignement jugé idéal pour les contraintes données.

Mathématiquement, une contrainte est définie par une fonction positive continue de l'espace des alignements possibles dont le minimum correspond à la solution donc à la satisfaction de la contrainte. Le problème de l'alignement dentaire est représenté par une fonction de coût globale qui prend la forme: $f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$ où $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ sont les paramètres pour l'alignement des dents 1,2,3,...n respectivement. La solution est trouvée lorsque la fonction de coût globale atteint un minimum, d'où la notion de minimisation de fonction de coût. Ce minimum représente un compromis entre les différentes contraintes à satisfaire.

Non seulement les contraintes sont positives et continues mais elles sont conçues de manière à être facilement minimisées. Chacune d'entre elles doit avoir l'allure d'une parabole. Par exemple, si on veut contraindre deux dents pour qu'elles soient en contact, la fonction à minimiser est la distance entre les points de contact mise au carré.

Bien que chaque contrainte ait une allure similaire, elles n'ont pas nécessairement la même magnitude. On procède alors à une normalisation des contraintes de manière à obtenir des fonctions de coût similaires pour une même quantité de déplacement dentaire. Une fois les contraintes uniformisées, chacune d'entre elles a la même importance. L'utilisateur du système est alors libre de faire varier l'importance relative des contraintes en modifiant leur poids.

Comme nous l'avons précisé au préalable, notre fonction de coût est définie par 84 dimensions ; il est impossible d'illustrer une telle fonction par contre il est aisé de schématiser celle-ci (figure 5.37) pour 2 paramètres soumis à 4 contraintes séparément (A, B, C et D) ou conjointement (A+B+C+D).

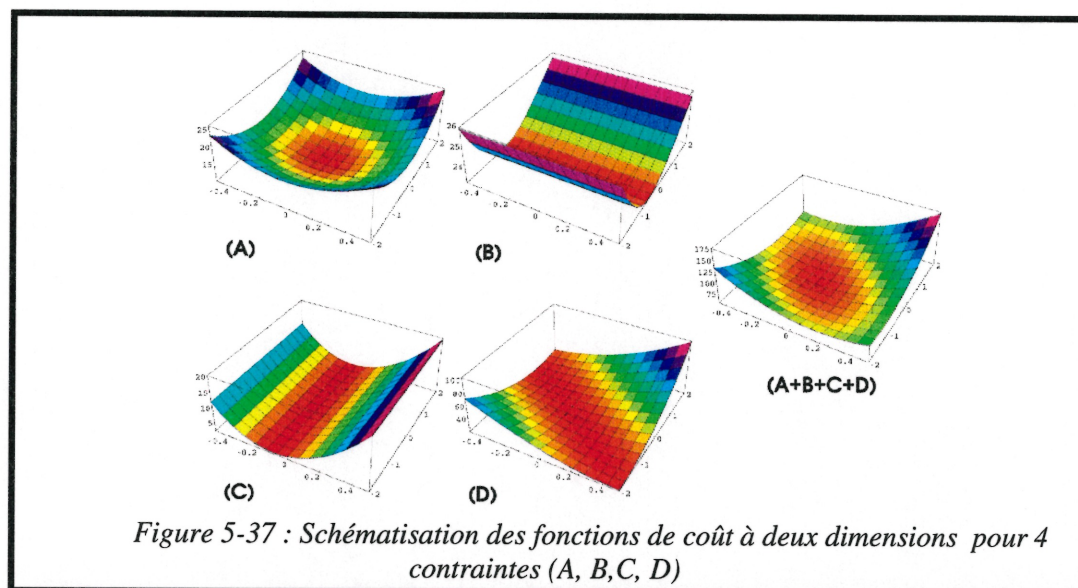


Figure 5-37 : Schématisation des fonctions de coût à deux dimensions pour 4 contraintes (A, B, C, D)

La difficulté réside dans le fait qu'avec 84 paramètres, la fonction de coût est complexe et contient un grand nombre de minima locaux. L'idée est de trouver un minimum local qui est en fait le minimum global et qui représente le meilleur compromis entre les contraintes. La technique d'optimisation utilisée pour minimiser la fonction de coût est la descente de gradient. Pour isoler le bon minimum, il est essentiel de connaître un bon point de départ, un estimé de la solution, qu'on va raffiner jusqu'au minimum local le plus proche. En orthodontie, la situation est idéale puisqu'on peut utiliser la position initiale des dents comme point de départ. A titre d'illustration, si toutes les dents étaient extraites, mélangées et déposées aléatoirement sur une table en guise de position départ, il serait totalement impossible de trouver un bon minimum local. La position initiale est essentielle et constitue le point origine dans la fonction à étudier.

5.2.11.4. Contraintes

➤ Nature des contraintes

Pour aligner les dents, on peut imaginer un ensemble de contraintes directement reliées aux objectifs orthodontiques de traitement. Le but premier étant d'obtenir un alignement dans des conditions les plus physiologiques possibles, un ensemble de contraintes pourrait être :

- Contrainte de base osseuse : dents situées dans la corticale osseuse,
- Contrainte de chaîne ou inter-dentaire : dent établissant avec ses voisines un point de contact,
- Contrainte d'alignement : correction de la position dentaire dans les trois ordres,
- Contrainte de forme d'arcade: on peut donner une forme (ellipse, parabole, etc.) et pénaliser pour la distance entre une dent et cette forme. Cette contrainte permet d'imposer une forme d'arcade précise,
- Contraintes biomécaniques. En particulier, on peut pénaliser des mouvements dentaires dans leur quantité ou tout simplement annuler la possibilité de mouvement de certaines dents,
- Contrainte de déplacement dentaire: On peut limiter la quantité de mouvement de certaines dents pour privilégier la solution la plus stable possible, comme la conservation de la distance inter-canine inférieure par exemple.
- Contrainte de symétrie : il est possible d'imposer une symétrie en position et/ou rotation lors de l'alignement pour un groupe de dents donné,
- Contrainte d'angle des incisives : On peut décider dès le début du set-up d'un angle optimal entre les incisives et le plan mandibulaire (ex: 90 degrés) et pénaliser pour des angles qui s'éloignent trop de cette valeur.

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive et la nature des contraintes peut être adaptée à la situation clinique.

➤ Poids des contraintes

D'un point de vue quantitatif, il est possible de hiérarchiser les contraintes ou encore mettre de l'emphase sur certaines d'entre elles, cela s'appelle mettre du poids

sur certaines contraintes. Lorsque la minimisation globale des contraintes ne peut satisfaire deux contraintes qui sont en opposition, elle satisfait celle de poids le plus fort. L'utilisation de contraintes hiérarchiques permet entre autres, d'orienter la recherche de solutions. Pour cela, on insère en plus des contraintes du problème initial (de poids le plus fort possible), des contraintes de poids plus faible qui serviront à exprimer un ensemble de préférences.

5.2.12. Mise en application de la technique de contraintes pour le problème de set-up.

5.2.12.1. Cas de Sébastien B.

Afin d'illustrer la notion de minimisation, nous avons décidé d'implanter successivement sur l'arcade mandibulaire plusieurs types de contraintes et de visualiser l'alignement qui en résulte. Dans l'ensemble des solutions présentées, l'extraction de la dent 32 est réalisée.

➤ Contrainte d'angle

L'inclinaison des incisives calculée lors de la superposition du modèle et de la radiographie variait de 75° à 84° . Nous avons établi une contrainte pour imposer une inclinaison de 90° à toutes les incisives.

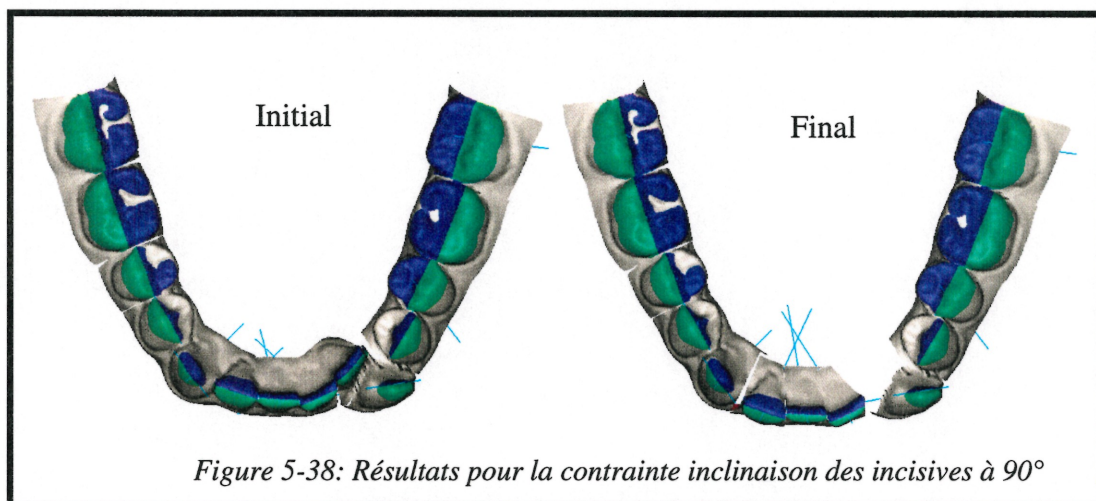
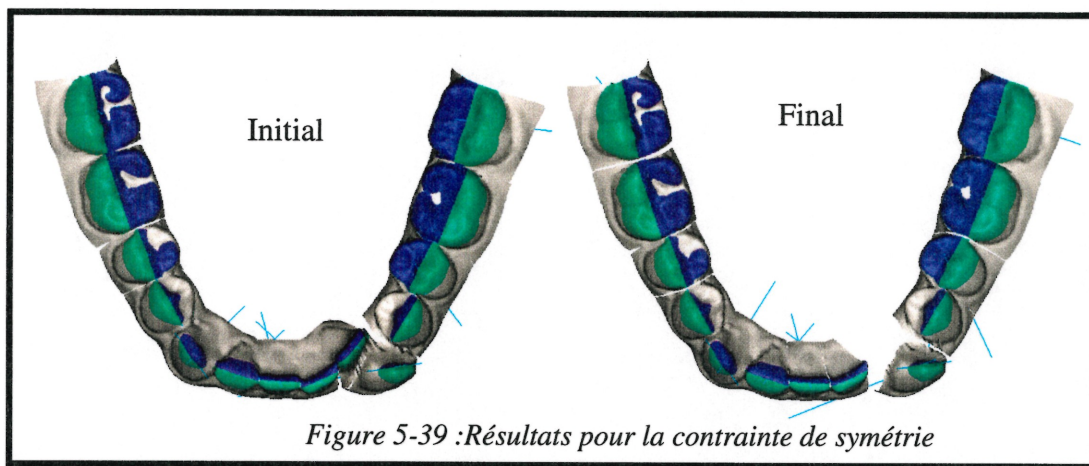


Figure 5-38: Résultats pour la contrainte inclinaison des incisives à 90°

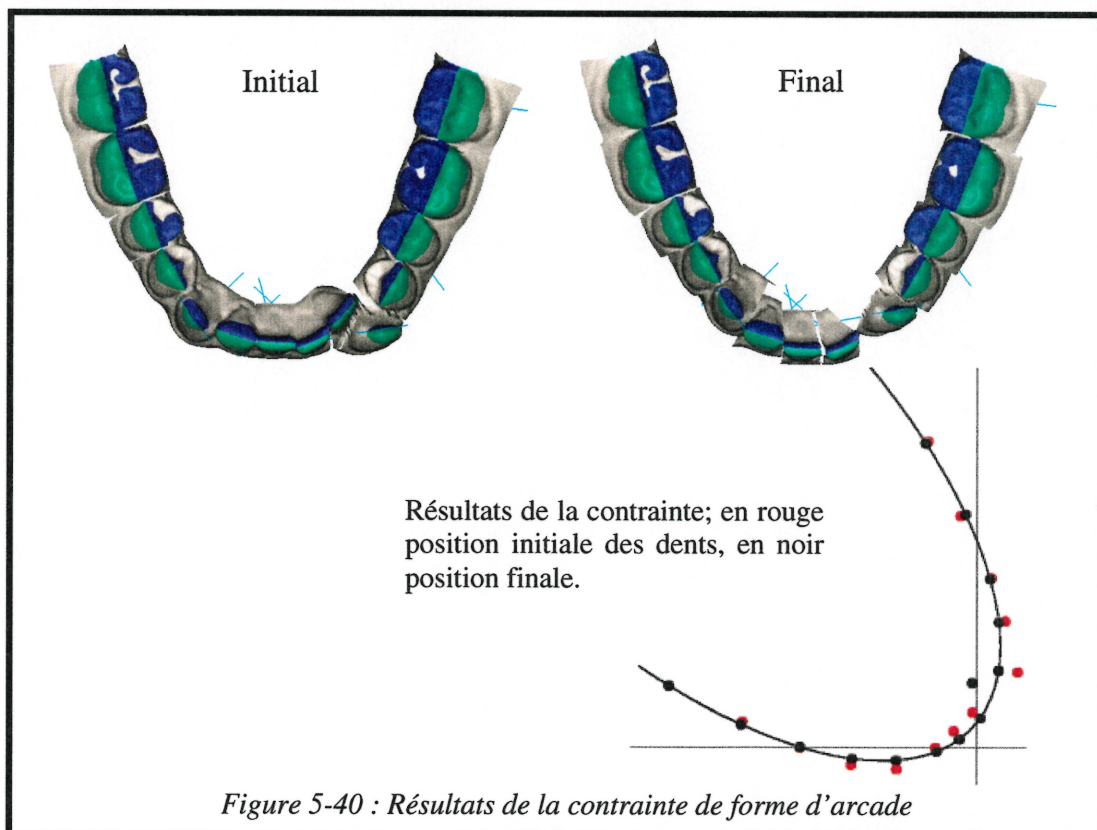
➤ Contrainte de symétrie :

Une symétrie est imposée en Y sur l'ensemble des dents mandibulaires



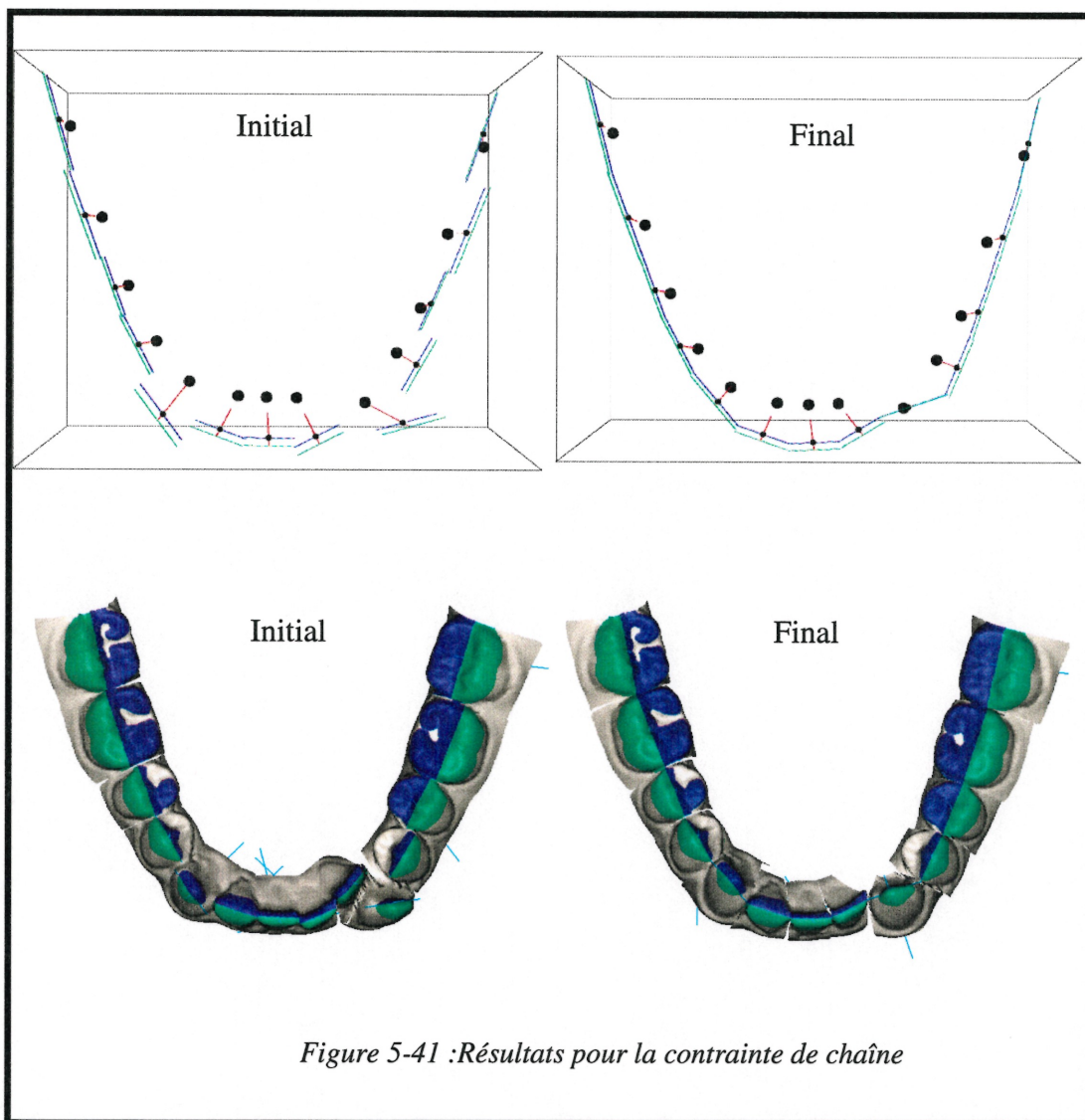
➤ Contrainte de forme d'arcade :

Précédemment, nous avons présenté les formes d'arcades obtenues par la méthode des moindres carrés pour le patient Sébastien B. Celles-ci sont utilisées comme contrainte en vue de l'alignement.



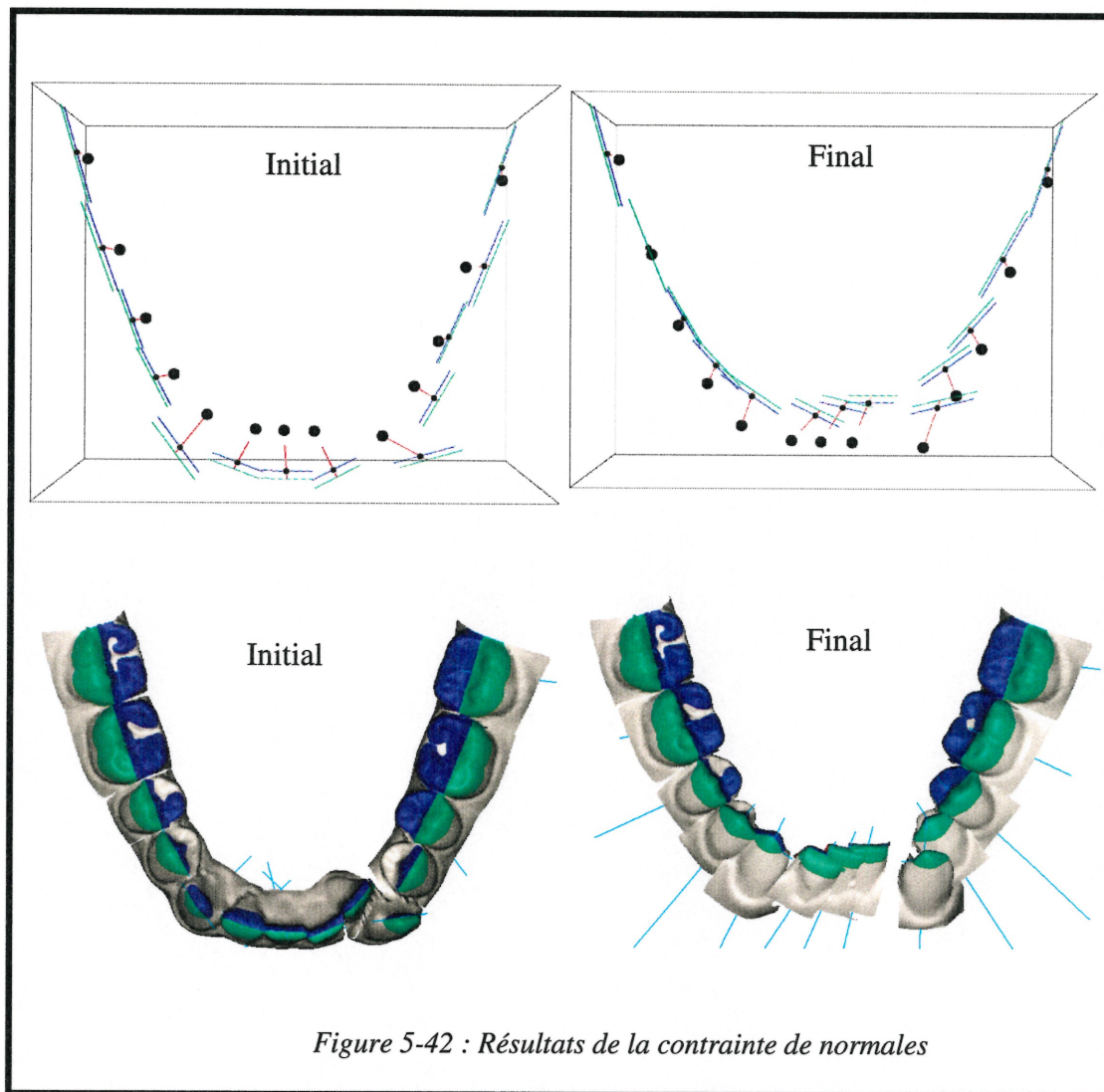
➤ Contrainte de chaîne :

Une contrainte pour lier les dents les unes avec les autres en chaîne permet d'établir des relations inter-dentaires.



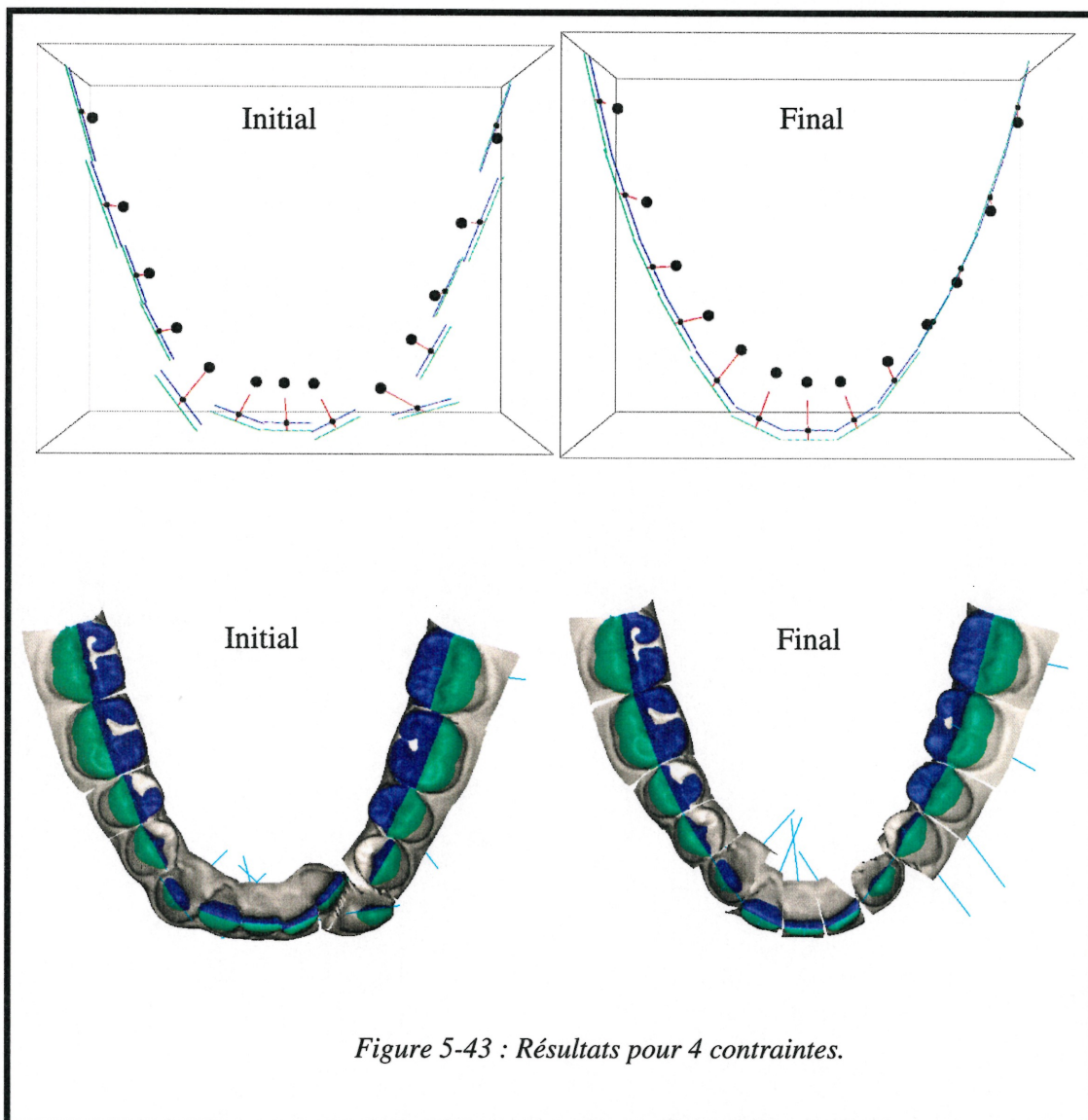
➤ Contrainte de normales

La contrainte de normales est une contrainte d'orientation imposée pour que les systèmes d'axes des dents adjacentes soient similaires. Elle suggère une variation en douceur des angles entre les axes mésio-distaux.



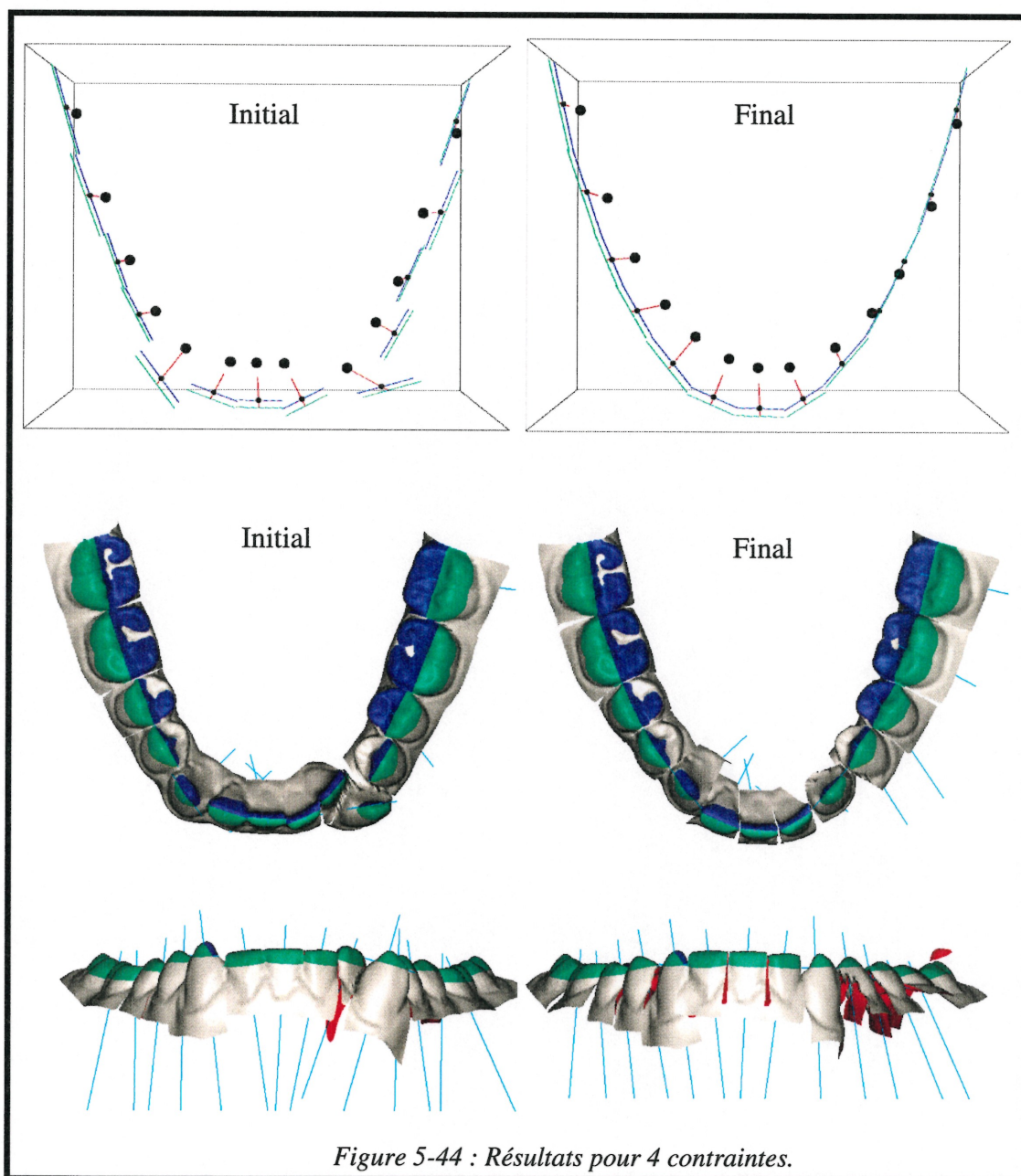
- Contraintes de chaîne, de symétrie, de forme d'arcade et d'inclinaison des incisives à 90°

Les quatre contraintes énumérées précédemment ont été additionnées pour former une fonction de coût exprimant l'ensemble des contraintes.



- Contraintes de chaîne, de symétrie, de forme d'arcade et d'inclinaison des incisives à 84°

Suite à l'analyse des résultats précédents, nous avons implanté les mêmes contraintes pour une inclinaison à 84° . En effet, pour ce patient une incisive a été extraite et il paraissait plus vraisemblable que l'inclinaison des incisives demeure identique pendant le traitement.



5.2.13. Résultats pour Sébastien B.

Pour ce patient, les choix suivants ont été réalisés :

- Contrainte d'inclinaison incisive : l'inclinaison incisive inférieure a été conservée à 84° puisqu'une incisive a été extraite et que le risque de perdre du torque sur les incisives en cours de traitement était à prendre en considération. L'inclinaison des incisives supérieures n'a pas été modifiée.
- Contrainte symétrie : le centre de la dent 41 appartient à l'axe de symétrie, pour les autres dents, la contrainte impose une symétrie d'une dent donnée avec sa controlatérale.
- Contrainte de chaîne : chaque dent doit être en contact avec ses voisines.
- Contrainte de forme d'arcade : La forme définie précédemment étant satisfaisante, celle-ci est employée comme référence.
- Les contraintes ont toutes un poids similaire.
- Les hauteurs de collage H sont entrées manuellement et correspondent aux prescriptions classiques.
- Les arcades supérieure et inférieure sont traitées indépendamment.

L'alignement est effectué de manière automatique dès l'introduction des contraintes. La minimisation de la fonction dure environ 1 minute sur un PC dont l'horloge interne est cadencée à 1,4 GHz et la solution peut être visualisée immédiatement en trois dimensions.

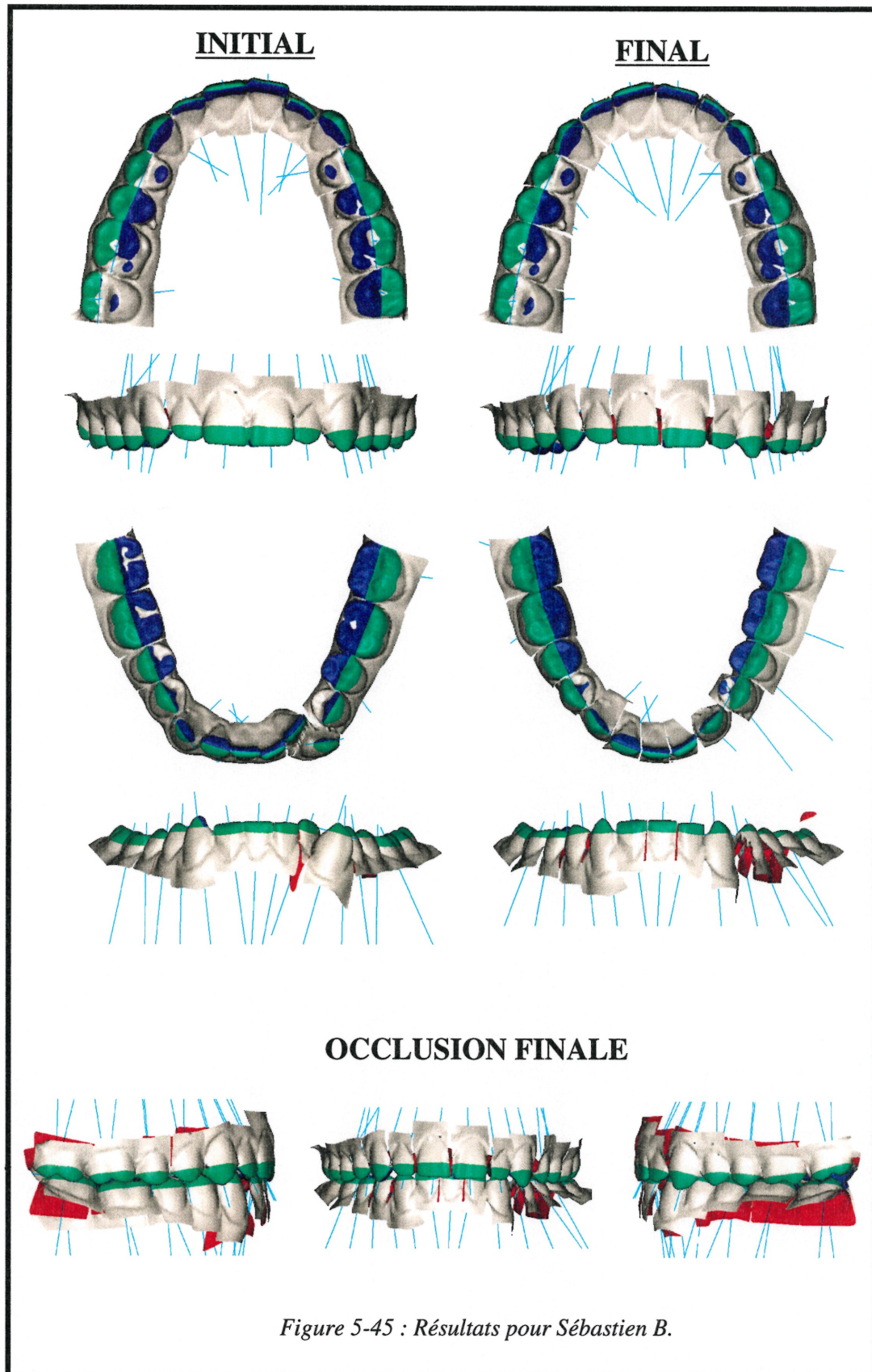


Figure 5-45 : Résultats pour Sébastien B.

L'application du programme de minimisation permettant de réaliser le set-up de Sébastien B. a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le programme trouve facilement une solution respectant les 4 contraintes et les alignements supérieur et inférieur sont jugés satisfaisants dans les trois ordres.
- Chaque dent est en contact avec la dent adjacente. A ce titre, il est bon de noter que lors de la segmentation des dents celles-ci sont creuses et sans parois mésiale et distale, ainsi, lors de leurs déplacements sur l'arcade, on peut apercevoir une lacune entre deux dents voisines alors que celles ci sont en contact.
- Bien que les arcades soient traitées indépendamment, lorsque les modèles sont placés en occlusion selon le bord postérieur des modèles initiaux numérisés, l'intercuspitation est conforme aux principes classiquement admis et on peut visualiser une classe I canine et molaire. Cette observation signifie que pour ce cas particulier les arcades devaient être coordonnées en début de traitement, il n'est alors pas nécessaire d'imposer des contraintes entre les deux arcades pour obtenir une occlusion idéale.
- Les lignes des milieux sont correctes étant donnée la thérapeutique choisie. (extraction d'une incisive)
- La forme d'arcade est harmonieuse, ovoïde. La contrainte de forme d'arcade est respectée et chaque dent est située strictement dans la corticale osseuse.
- Il n'y a pas d'expansion au niveau des molaires ou des canines, critères essentiels de stabilité en rétention.

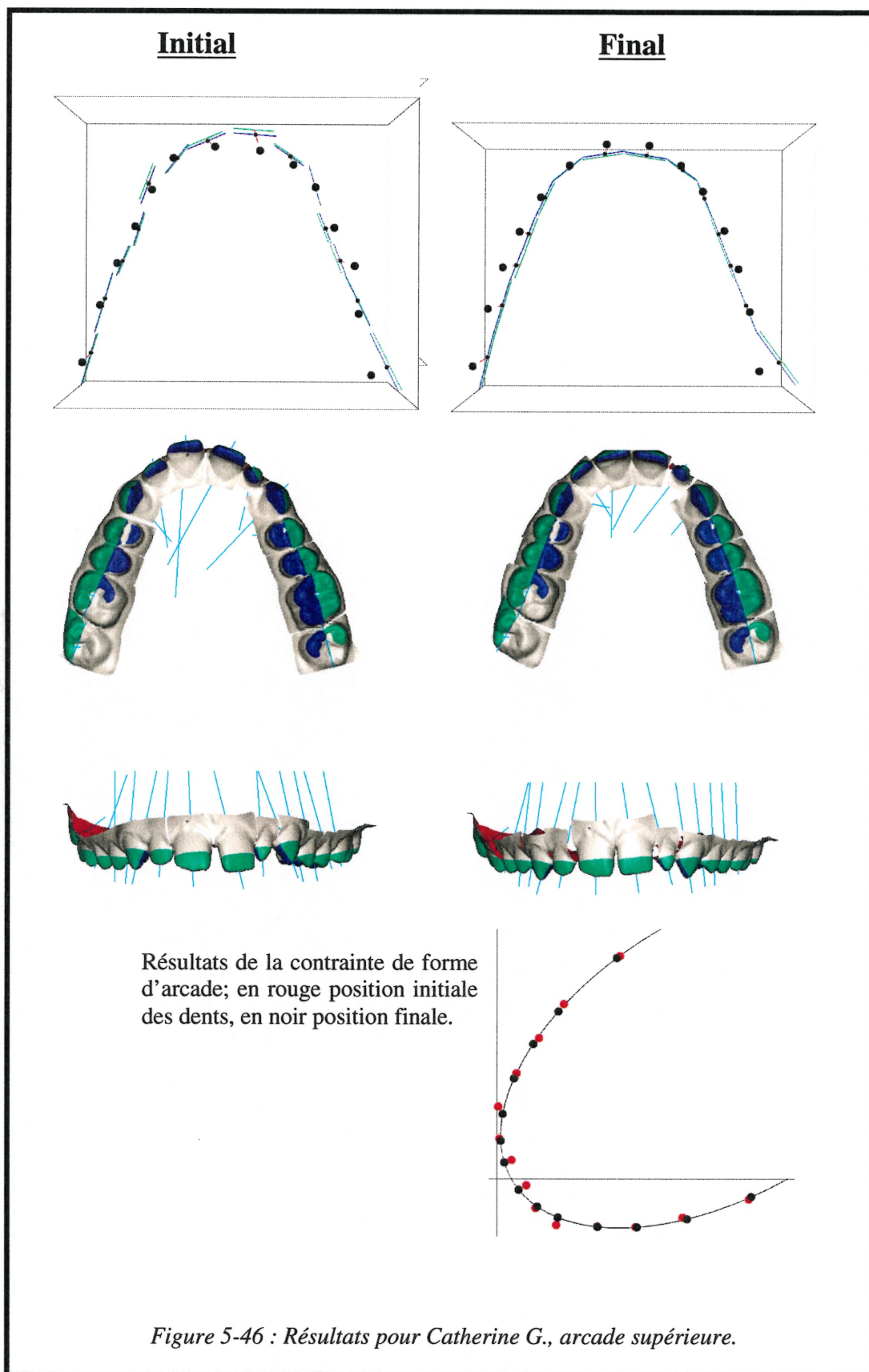
5.2.14. Cas de Catherine G.

Pour cette patiente, la malocclusion était plus sévère associant un problème dentaire et un décalage des bases osseuses. A l'examen des moulages orthodontiques, les points suivants ont été relevés :

- Espaces généralisés à l'arcade supérieure
- Incisive latérale gauche en grain de riz, incisives supérieures longues.
- Inclinaison labiale des incisives supérieures et inférieures
- Classe II dentaire canine et molaire plus importante à gauche qu'à droite
- Surplomb horizontal de 8mm
- Lignes des milieux non concordantes de 1mm
- Dysharmonie dento-dentaire : excès inférieur de 3 mm
- Arcades non coordonnées

Pour ce patient, les choix suivants ont été réalisés :

- Contrainte d'inclinaison incisive : l'inclinaison incisive inférieure a été conservée à 98° étant donné le surplomb horizontal. L'inclinaison des incisives supérieures a été modifiée de 10° .
- Contrainte symétrie : symétrie en Y des dents contro-latérales.
- Contrainte de chaîne : chaque dent doit être en contact avec ses voisines.
- Contrainte de forme d'arcade : La forme définie par la loi des moindres carrées est employée comme référence.
- Les contraintes ont toutes un poids similaire.
- Les hauteurs de collage H sont entrées manuellement et correspondent aux prescriptions classiques.
- Afin de prendre en considération le Bolton et en particulier la forme en grain de riz de 22, les largeurs mésio-distales des 4 incisives ont été augmentées.
- Les arcades supérieure et inférieure sont traitées indépendamment.

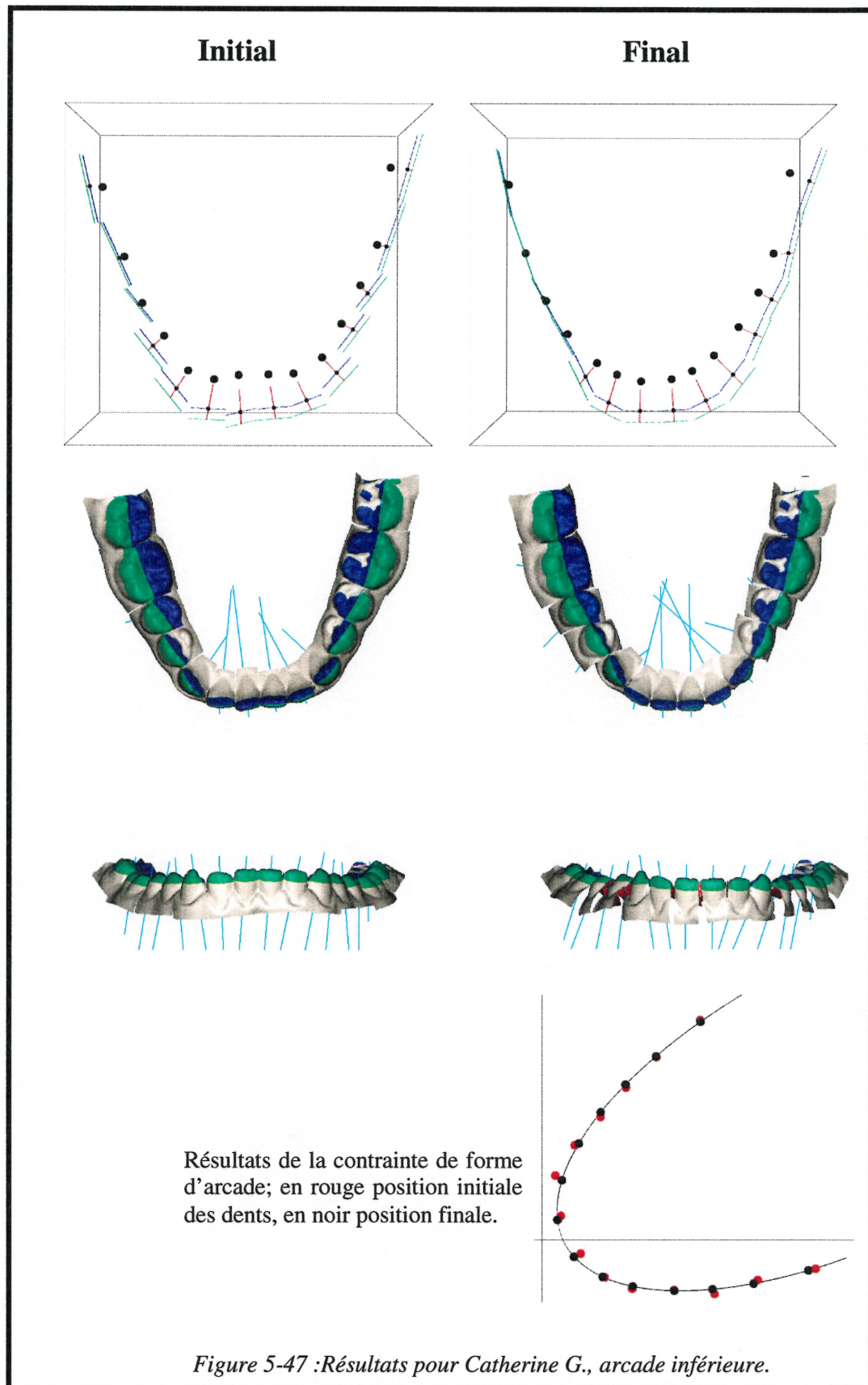


➤ Arcade supérieure

Les quatre même contraintes ont été implantées et l'alignement s'est effectué automatiquement après la minimisation de la fonction qui a duré environ 1 minute.

L'application du programme de minimisation permettant de réaliser l'alignement de l'arcade supérieure de Catherine G. a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le programme trouve facilement et rapidement une solution respectant les 4 contraintes.
- L'alignement supérieur est harmonieux, la forme d'arcade s'est corrigée d'elle-même, elle apparaît moins triangulaire, plus conforme aux « normes » orthodontiques établies. Cette configuration demeure cependant physiologique et toutes les racines sont situées dans la corticale osseuse comme le confirme la représentation Mathématica ci-contre.
- Les espaces pour agrandir le diamètre mésio-distal des incisives sont respectés. Ils sont répartis équitablement en mésial et en distal dans ce cas mais on peut facilement modifier cette variable si désiré.
- L'inclinaison incisive est corrigée et l'arcade apparaît symétrique.
- La sensibilité du système de coordonnées peut être mise en évidence par le problème d'orientation des incisives centrales dans le second ordre. Le point de contact entre ces dents est trop gingival. Une erreur dans le positionnement des points servant aux axes de référence mène à de tels défauts dans le set-up. Ceux-ci peuvent néanmoins être corrigés par la suite.
- Le troisième ordre n'est pas idéal sur 17 et cette dent n'a pas corrigé complètement sa position. Le défaut ne se situe pas durant la phase de l'alignement mais là encore lors du placement des points définissant les axes de référence.



➤ Arcade inférieure

L'application du programme de minimisation permettant de réaliser l'alignement de l'arcade inférieure de Catherine G. a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le programme trouve facilement une solution respectant les 4 contraintes.
- L'alignement inférieur met en évidence une labioversion excessive conformément à la contrainte d'inclinaison incisive de 98° par rapport au plan mandibulaire.
- L'ensemble des racines sont positionnées dans la corticale osseuse. Le plan de coupe osseux employé dans la méthode de détermination de la forme d'arcade est situé dans la corticale osseuse au niveau de la jonction gingivo-dentaire, ainsi si la contrainte de forme d'arcade est respectée, nous sommes assurés que les dents sont situées dans la corticale osseuse. Ceci est le cas pour l'alignement ci-contre d'après la confirmation avec la représentation Mathematica.
- L'arcade carrée avant le début du traitement virtuel est plus ovoïde en fin de traitement.
- Il n'y a pas d'expansion au niveau des molaires ou des canines, critères essentiels de stabilité en rétention.
- On peut visualiser quelques erreurs dans la correction des rotations pour 43 et 34 ou encore du torque, 33 et 43, l'ensemble de ces fautes sont là encore inhérentes au système de coordonnées utilisé.

➤ Occlusion

Prenant en considération la malocclusion initiale et en particulier l'importance du surplomb horizontal, les modèles sont présentés en occlusion après un avancement de 2,9mm du modèle inférieur. Cette condition était nécessaire pour l'obtention d'une classe I canine bilatérale.

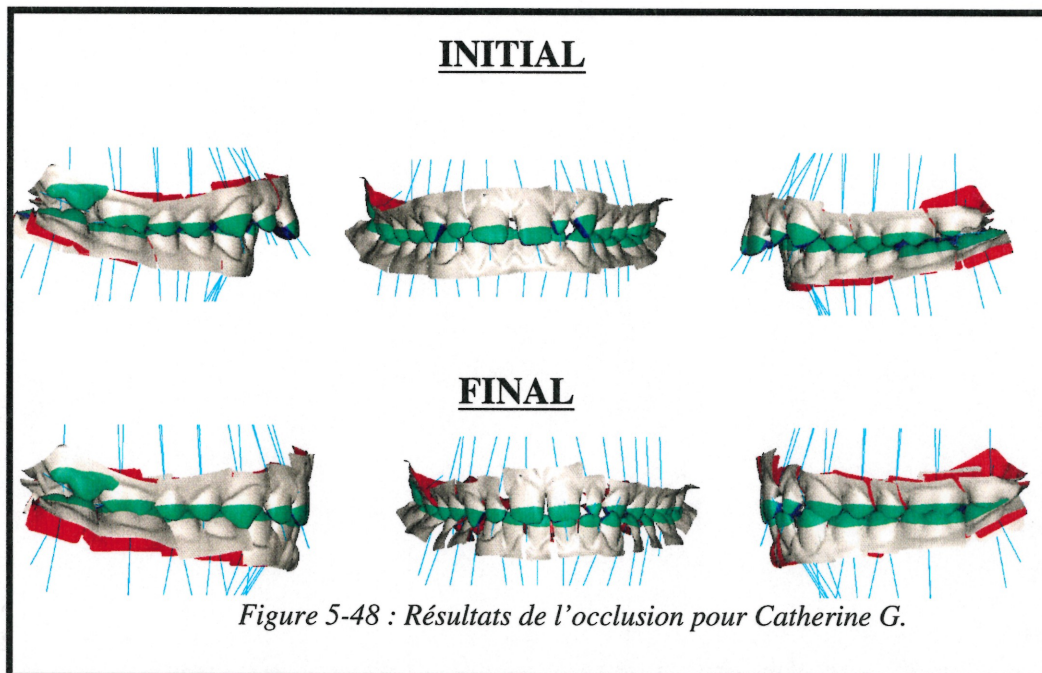


Figure 5-48 : Résultats de l'occlusion pour Catherine G.

Sur les résultats de l'occlusion finale, on peut noter :

- une bonne intercuspitation postérieure sauf au niveau des deuxièmes molaires.
- Un déficit dans la dimension transversale postérieure dû à l'avancement mandibulaire.
- Une intercuspitation antérieure peu satisfaisante.

L'ensemble des défauts s'expliquent par une résolution du problème de l'alignement de manière indépendante pour les deux arcades. Il n'y a en effet aucune contrainte de coordination pour les formes d'arcades supérieure et inférieure. Une telle contrainte s'avère importante dans la majorité des cas et essentielle pour les cas chirurgicaux ou de malocclusions sévères pour l'obtention d'une intercuspitation parfaite en fin de traitement.

CHAPITRE SIX

DISCUSSION

6. DISCUSSION

6.1. DE L'UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE VISION 3D EN ORTHODONTIE

L'essai des programmes disponibles sur le marché a permis de tester leur fiabilité, d'évaluer leurs points forts et leurs faiblesses pour une utilisation en pratique quotidienne orthodontique.

6.1.1. EMODEL

6.1.1.1. Modélisation au laser

En conjonction avec le récent développement de l'informatique graphique en dentisterie, l'utilisation du laser pour la modélisation des modèles orthodontiques est la technique la plus répandue. Ce procédé est appliqué en dentisterie pour l'obtention d'information 3D de modèles dentaires car il est rapide et de haute précision.

Cependant l'inconvénient majeur de la digitalisation au laser est la difficulté à reproduire précisément toutes les zones du modèle en plâtre du fait de la complexité anatomique. Le résultat est la présence de zones non définies ou mal définies avec pertes sensibles de données essentiellement dans la région vestibulaire au niveau des points de contact (Alcaniz, 1997 ; Motohashi 1999).

Pour l'obtention de modèles de bonne qualité, cette digitalisation doit s'effectuer en plusieurs étapes. Le modèle est digitalisé plusieurs fois sous des angles différents. Les différentes images sont ensuite mises en commun afin de reconstruire une image globale. Dans ce système les zones de lacunes comme la région antérieure du vestibule ou les parties cervicales dentaires sont minimisées (Motohashi, 1999 ; Hirogaki, 2001).

Ce procédé est celui adopté par Emodel. Les spécificités du processus ne peuvent être divulguées, cependant Dr Isaacson, célèbre orthodontiste et fondateur de Emodel, a accepté de nous fournir les indications qui suivent.

Les modèles sont passés individuellement sous le rayon laser sous plusieurs angles. Les changements d'orientation représentent les positions en x et en y alors que le rayon laser enregistre la position en z. Au total, pas moins de 48 vues et 6 millions de points sont répertoriés. Ce procédé dure environ 20 minutes.

Si le secret est de mise quant aux détails de la méthode utilisée, pour ce qui est de la visualisation, les modèles ne laissent paraître aucune zone d'ombre. L'agrandissement de l'image permet de visualiser nettement les facettes et confirme la technique employée. On remarque cependant que les zones inter-dentaires sont parfois mal définies et que certaines régions présentent des artefacts de reconstruction.

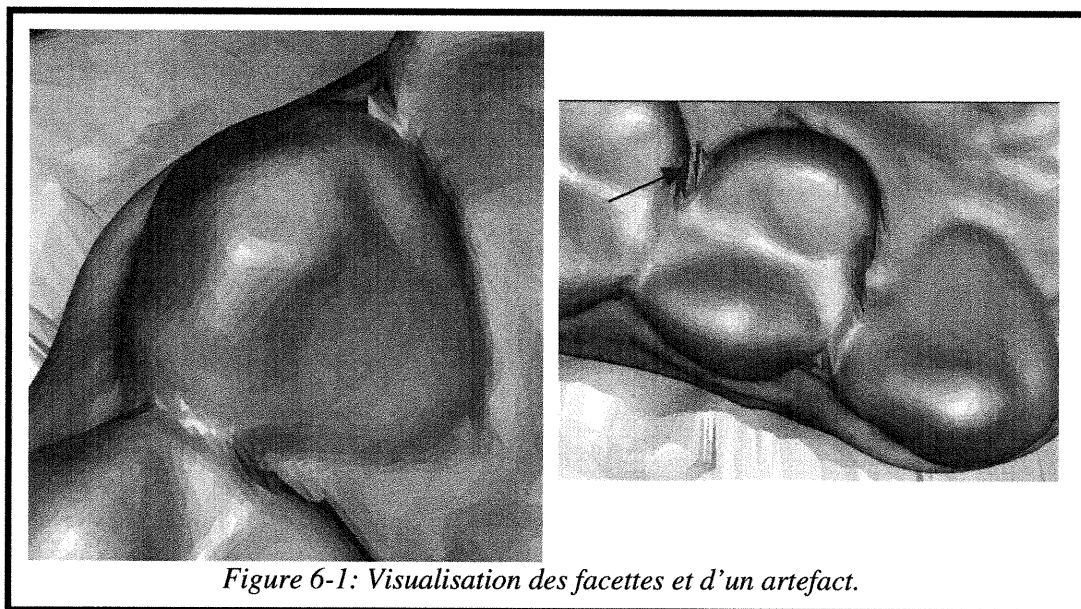


Figure 6-1: Visualisation des facettes et d'un artefact.

Afin de reproduire fidèlement l'intercuspidation ou la relation centrée, Dr Isaacson m'a précisé qu'initialement la cire d'occlusion avait été modélisée mais rapidement il est apparu plus efficace de digitaliser les modèles en occlusion en utilisant la partie postérieure du modèle comme référence. La même technique de reconstitution est ensuite employée afin d'obtenir une seule image analytique des modèles en occlusion.

Concernant cette reconstruction, nous avons pu mettre en évidence dans notre travail des erreurs menant à une occlusion non identique à celle des moulages fournis. Les modèles digitalisés ne sont pas seulement en contact mais pénètrent l'un dans l'autre. Le manque de précision mis ainsi en évidence souligne une des faiblesses du processus employé par EMODEL. Celui-ci reste à quantifier précisément afin d'évaluer les erreurs introduites pour l'exploitation des informations des modèles.

6.1.1.2. Mesures

Lors de l'essai du programme EMODEL pour les mesures, la manipulation 3D des modèles s'est avérée aisée et l'interface simple à comprendre et à utiliser.

La fiabilité de l'outil de mesure des dents, soit sa capacité à donner les mêmes résultats que le pied à coulisses électronique quelles que soient les conditions d'application, a été évaluée. Les deux mesures fournissent des résultats proches, ce qui s'apprécie par le coefficient de corrélation inter-classe (ICC) d'une valeur de 0.998. L'interface proposée est jugée extrêmement fiable.

Lors de l'évaluation de la validité des mesures par la technique de Bland et Altman, la plus grande différence à la moyenne est de 0,2260 mm, valeur faible qui confirme les bons résultats pouvant être obtenus par ce système.

On regrettera cependant le temps nécessaire pour effectuer ces mesures ainsi que la nécessité de placer dès le début de la procédure la dent de manière à visualiser la ligne de plus grand contour. Il est en effet impossible de modifier l'axe de visualisation du modèle une fois la mesure initiée.

6.1.2. ORTHOCAD

6.1.2.1. Modélisation par destruction contrôlée

Pour une modélisation de précision, il est possible de découper en tranches une structure et de photographier à chaque étape la surface de celle-ci. En pratique, ce procédé demeure peu répandu car il impose une destruction de l'objet à modéliser.

Aucun exemple d'application dentaire n'a pu être trouvé dans la littérature toutefois ce principe est employé dans le célèbre projet de l'homme visible.

Malgré nos multiples demandes, la société Orthocad n'a pas désiré fournir d'informations au sujet du processus de digitalisation. Le brevet de Kopelman et Taub sous titre de la société Cadent nous a permis de recueillir quelques informations. Un modèle physique solide, duplicata des modèles en plâtre ou moulage obtenu à partir des empreintes, est nécessaire. Cet objet subit une destruction contrôlée en tranches. Pour chaque tranche une image est réalisée, la séquence des images obtenues permet la reconstruction sous forme digitale en trois dimensions des modèles initiaux.

La visualisation des modèles scannés confirme l'emploi de cette technique et les tranches sont nettement visibles. L'avantage de cette technique est que les zones inter-dentaires sont très bien définies.

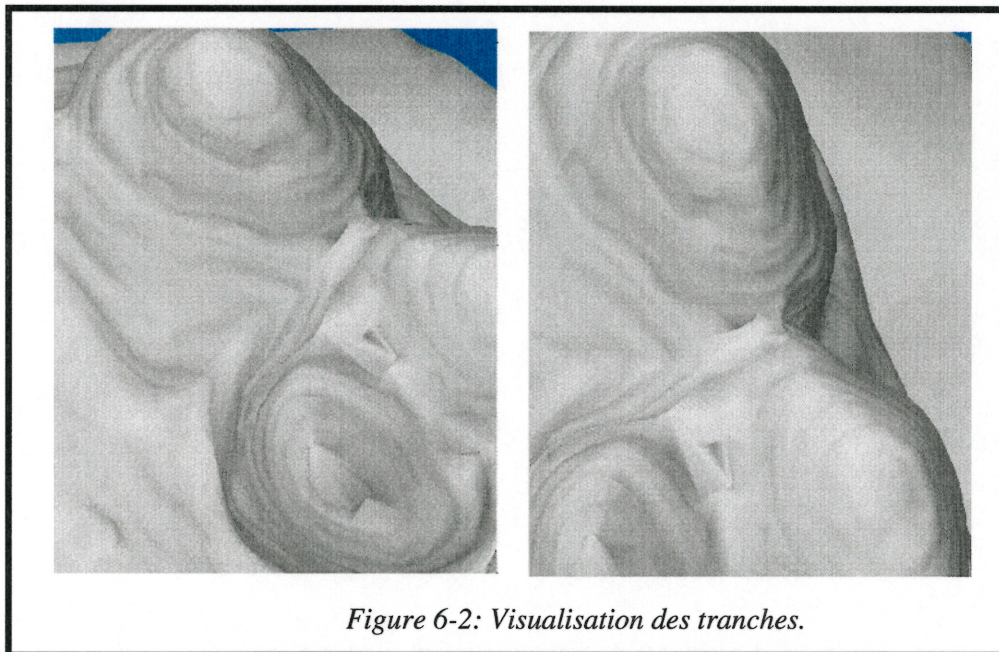


Figure 6-2: Visualisation des tranches.

La précision annoncée par la société est de 0,1mm or d'après le brevet les couches ont une épaisseur de 0,05mm à 0,2mm. Il n'est ainsi pas possible d'évaluer l'exacte précision d'un tel système.

Afin de comparer les images digitales des deux sociétés commerciales offrant la modélisation des modèles en plâtre, nous avons envoyé selon des conditions similaires les mêmes moulages à ces deux sociétés. Les modèles nous ont été ensuite réexpédiés mais à notre grand étonnement les modèles envoyés par Orthocad après digitalisation étaient fortement endommagés comme l'attestent les images suivantes. D'après l'examen détaillé des moulages, il semble peu probable que ces détériorations résultent du moyen de transport utilisé en effet les fractures ne sont pas franches et les fragments brisés ne se trouvaient pas à l'intérieur des paquets. L'endommagement provient fort probablement de la technique utilisée lors de l'obtention des duplicatas. Après interrogation d'Orthocad, ils n'ont pu fournir d'explications à cet incident et ont juste spécifié que la modélisation des modèles en plâtre n'était pas leur spécialité à la différence des empreintes.

Ce regrettable épisode me laisse penser que la modélisation sera d'autant plus précise que les étapes de laboratoire et les intermédiaires seront faibles.

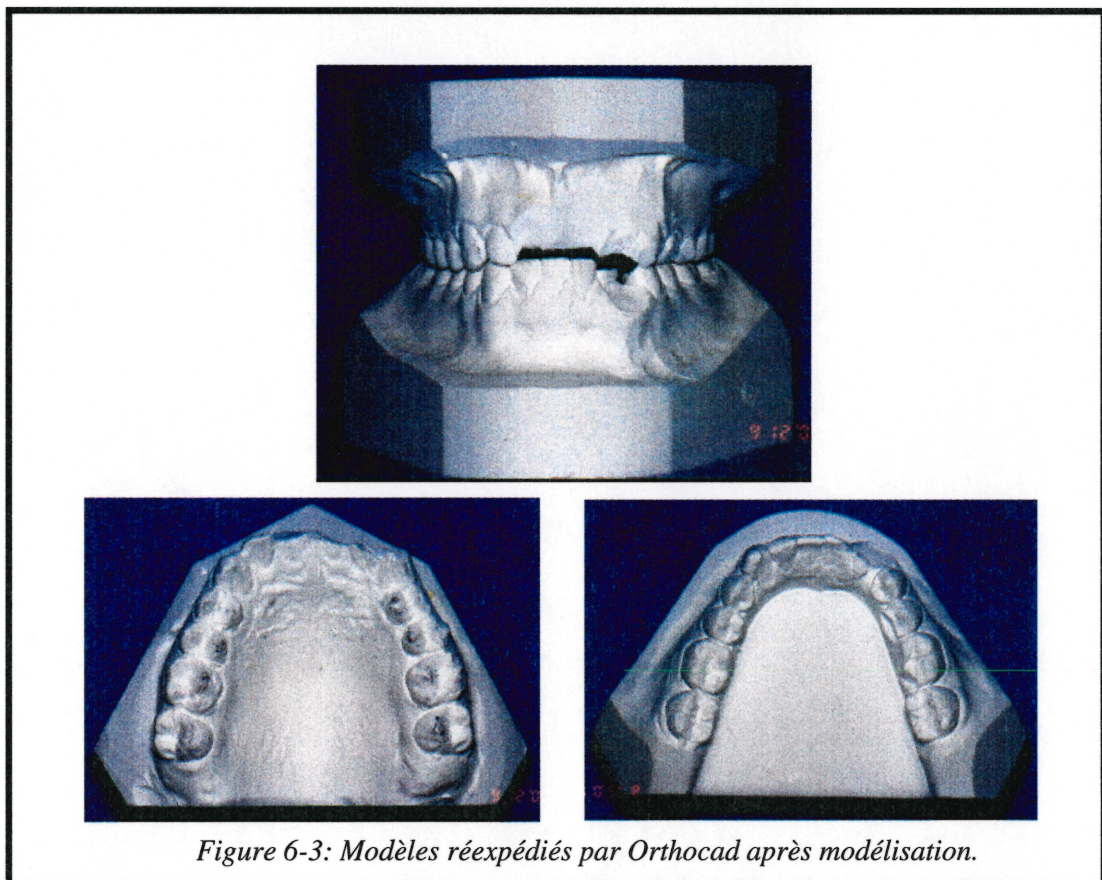
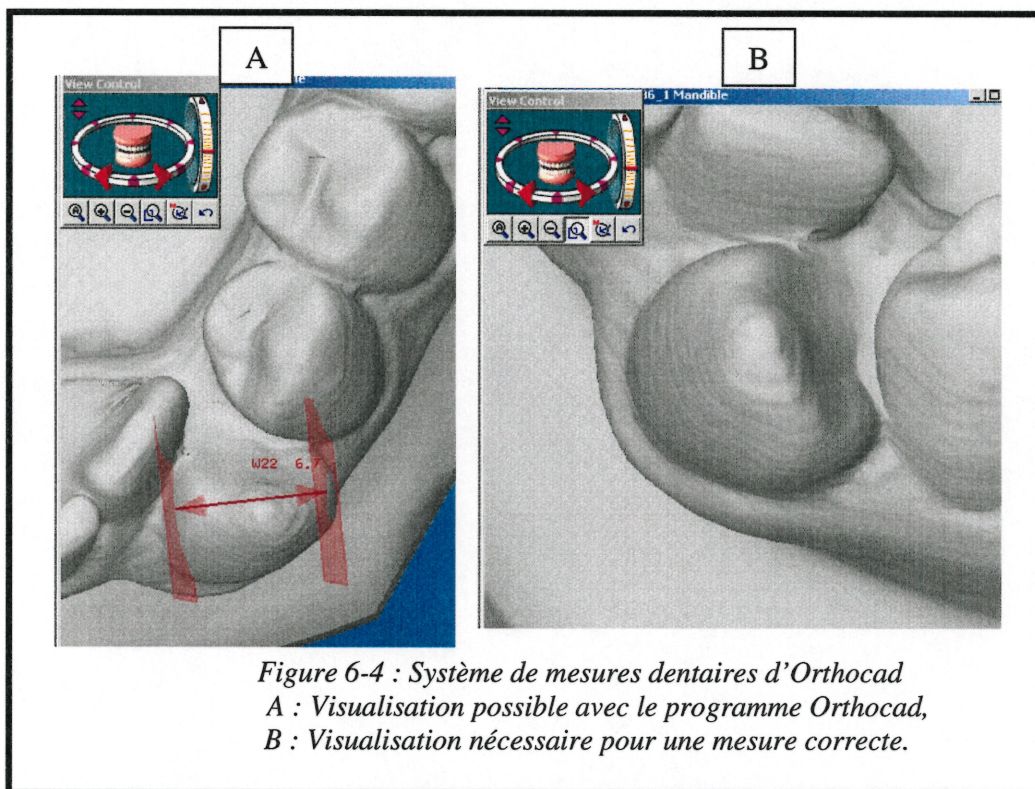


Figure 6-3: Modèles réexpédiés par Orthocad après modélisation.

6.1.2.2. Mesures

Lors de l'essai du programme ORTHOCAD, l'interface était accueillante et de nombreuses fonctions étaient disponibles, cependant la manipulation 3D des modèles a nécessité un grand temps d'entraînement pour un contrôle parfait.

Les mesures ne peuvent être effectuées qu'en vue occlusale stricte et il est impossible de modifier la position du modèle afin de visualiser le plus grand contour de chacune des dents en vue de calculer précisément le diamètre mésio-distal.



L'étude de la fiabilité du programme de mesures a permis de vérifier que pris dans son ensemble le système est valide. La fiabilité, même si elle est légèrement inférieure à celle de EMODEL, demeure excellente puisqu'elle a une valeur de 0,989. Ces excellents résultats doivent cependant être considérés avec précaution car les dents des modèles qui ont servi aux tests étaient relativement peu inclinées. Ainsi une fiabilité faible pour une dent fortement inclinée est masquée par les excellentes fiabilités des autres dents puisque le système est évalué dans son ensemble.

Lors de l'évaluation de la validité des mesures par la technique de Bland et Altman, les limites à la moyenne sont de +/- 0,4 mm pour Sébastien B. et +/-0,5mm pour Catherine G. Ces valeurs sont moins satisfaisantes que celles obtenues avec Emodel, cette faiblesse résulte fort probablement de l'impossibilité d'effectuer des mesures en trois dimensions avec ce système.

En effet, le système proposé par ORTHOCAD ne permet de réaliser que des mesures en deux dimensions puisque la vue proposée est strictement occlusale et ne peut être modifiée. Du fait du manque de flexibilité, ce système présente des écueils similaires à la méthode utilisant la photocopie. Des erreurs de mesure peuvent provenir des inclinaisons dentaires, des déviations des dents de l'axe perpendiculaire ou de la position chevauchée des dents.

Une étude sur un grand nombre de modèles permettrait de mieux définir la précision de cet outil.

6.1.3. De la recherche à une utilisation du système de mesures en pratique quotidienne

Les orthodontistes relèvent de nombreuses mesures sur les modèles en plâtre. De ces mesures, un groupe de paramètres orthodontiques sont obtenus afin de classer les malocclusions dentaires et squelettiques. Ces paramètres sont généralement une combinaison de mesures linéaires effectuées sur les modèles en plâtre. L'information recueillie se veut fiable et reproductible, en conséquence, la validation des systèmes commerciaux s'avère indispensable.

Dans notre travail, le diamètre mésio-distal des dents a été choisi comme référence. Les résultats des mesures sur les modèles 3D se révèlent d'une excellente fiabilité pour les systèmes pris dans leur ensemble cependant les écarts entre les mesures sont importants. Dans notre étude, la mesure est répétée 5 fois et la moyenne est proche de la valeur obtenue avec le pied à coulisses sur le modèle en plâtre. En pratique, il n'est pas envisageable de répéter ce calcul à plusieurs reprises.

Une fois les mesures effectuées, les systèmes permettent de calculer rapidement et automatiquement le Bolton ou la dysharmonie dento-dentaire sans aucun autre intermédiaire ce qui limite ainsi le risque d'erreur dans les opérations.

De tels outils peuvent ainsi s'avérer très profitables à une pratique orthodontique, on regrettera cependant qu'ils soient commercialisés sans étude préalable à grande échelle afin de vérifier leurs validités scientifiques et de calculer leurs réelles précisions.

6.2. SET-UP

6.2.1. Évaluation du programme de set-up développé

6.2.1.1. Visualisation des modèles et animation

Nous avons conservé la forme classique des modèles familiers à l'orthodontiste. Contrairement aux produits sur le marché, le rendu du modèle a été modifié. Dans le but de nous rapprocher des modèles en plâtre utilisés classiquement, nous avons privilégié un aspect de plâtre savonné.

Plus agréable à visionner, les modèles digitaux sont aussi plus faciles à déplacer. Toutes les modifications, translations, rotations, zooms peuvent être obtenus par un simple clic de souris contrairement aux interfaces proposées par EMODEL et ORTHOCAD.

L'ajout de la visualisation en perspective permet de représenter les modèles en trois dimensions en tenant compte des effets de l'éloignement et de leur position dans l'espace par rapport à l'observateur.

Cette représentation donne à l'observateur l'illusion de la réalité, du point de vue des formes et des proportions et indépendamment des couleurs.

6.2.1.2. Segmentation

Lors de la réalisation du set-up classique, la segmentation est une phase un peu délicate car il est absolument indispensable de ne rien perdre des dimensions mésio-distales des dents lors du sciage du modèle en plâtre. Cette difficulté n'est évidemment pas rencontrée lors de l'emploi des systèmes informatisés. La séparation des dents est virtuelle et peut être modifiée indéfiniment ce qui permet à l'orthodontiste d'effectuer la segmentation avec une grande précision. Le set-up proprement dit peut alors débiter avec des éléments indemnes et gagne en fiabilité.

Dans les programmes de conception assistée par ordinateur, plusieurs procédés sont retrouvés pour ce découpage dentaire. Alcaniz et Dirksen ont adopté un mode semi-automatique ce qui les contraint à travailler en deux dimensions et ainsi à perdre une partie de l'information. Ces deux méthodes nécessitent une intervention de l'orthodontiste afin de corriger les erreurs du programme. Celles-ci seront augmentées dans les cas de chevauchement, d'inclinaisons dentaires importantes et d'anomalies morphologiques. Ainsi, ces procédés nous apparaissent peu fiables.

Afin d'éliminer le caractère parfois aléatoire de cette segmentation, le choix s'est porté sur une séparation réalisée exclusivement par le manipulateur du programme. Comme Kuroda et Motohashi, la segmentation est réalisée totalement manuellement ce qui élimine les erreurs liées à la variété anatomique dentaire et à un type de malocclusion donnée. Les avantages principaux de cette méthode sont les possibilités de conserver des données en trois dimensions et d'effectuer une séparation de qualité supérieure à celle obtenue avec les modèles en plâtre puisqu'il n'y a aucune perte de matériel dentaire.

6.2.1.3. Projection des modèles sur la radiographie

Simon est le premier en 1917 à avoir choisi d'orienter la dentition par rapport à des repères anthropométriques afin de mieux mettre en évidence la relation entre la dentition et la face du patient (figure 2.2). La taille des moulages nécessaire pour cette approche était peu commode et ne permettait pas de poser les modèles

verticalement. Par la superposition entre les modèles 3D et la radiographie numérisée, nous avons souhaité réhabiliter l'approche gnathostatique en supprimant l'ensemble des écueils liés à la taille des modèles. Ce procédé permet à l'orthodontiste d'évaluer concrètement sur une image unique les relations entre les différents composants du complexe dento-facial plutôt que de construire cette image mentalement et de manière subjective en associant les informations.

Fiorelli lors de la conception de son occlusogramme a mis en relation les moulages et la radiographie mais sans une réelle superposition de ces deux éléments. Cette mise en correspondance permet de recueillir des données classiques pour le diagnostic mais elle offre aussi de nouvelles fonctionnalités pour la conception de set-up assistée par ordinateur.

Les images résultant de cette association sont tout à fait novatrices puisque la radiographie est une véritable texture sur le modèle en plâtre. De plus, il est possible d'ajouter des repères anatomiques tels le plan mandibulaire et le plan de Francfort afin de les conserver comme références lors de la réalisation du set-up.

Tom Marcel lors de son exposé sur l'utilisation du programme Orthocad regrettait que les mouvements simulés des modèles ne se fassent pas comme avec un articulateur. Lors de la superposition, il serait possible de repérer l'axe du condyle sur la radiographie et d'appliquer une contrainte pour que les mouvements d'ouverture et de fermeture de la mandibule soient réalisés selon cette référence.

6.2.1.4. Repères sur les dents

L'implantation du modèle de Motohashi afin de créer des axes de référence dentaires était facile à utiliser sur VTK. Cependant, au cours de cette implantation, plusieurs difficultés ont été rencontrées.

Les principaux écueils de cette méthode sont :

- Positionnement du point cuspidé sur les incisives :

Les points, matérialisés dans ce travail par des sphères, sont aisément disposés sur les canines et les prémolaires mais ceci est très différent pour les incisives. Lors de la description de sa méthode, l'auteur n'a pas fourni d'informations sur le

positionnement du point cuspidé sur les incisives. La logique veut qu'il soit placé au centre du bord occlusal dans les sens mésio-distal et vestibulo-lingual pour l'exactitude des axes de référence.

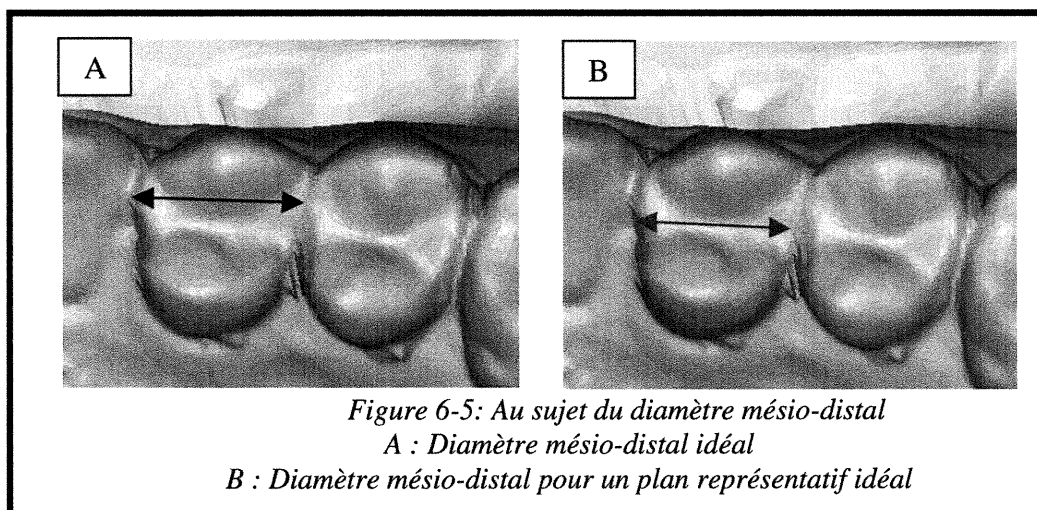
Lors des essais, le caractère s'est révélé parfois aléatoire menant à des erreurs dans l'axe de référence pour le deuxième ordre puis à des problèmes d'alignement comme dans le cas des incisives centrales supérieures de Catherine G. Dans une telle situation, lorsque cette erreur apparaît sur le set-up, il faut revenir à un stade antérieur et modifier en conséquence le positionnement des sphères.

➤ Positionnement du point cuspidé sur les molaires :

Les points A, A', B et B' sont placés comme sur les autres dents. Pour éviter les erreurs dans le système d'axes dentaire comme nous en avons discuté précédemment, le point cuspidé a été positionné dans le sillon intercuspide médian. L'erreur dans la position verticale introduite à ce niveau est compensée par adaptation manuelle de la hauteur H.

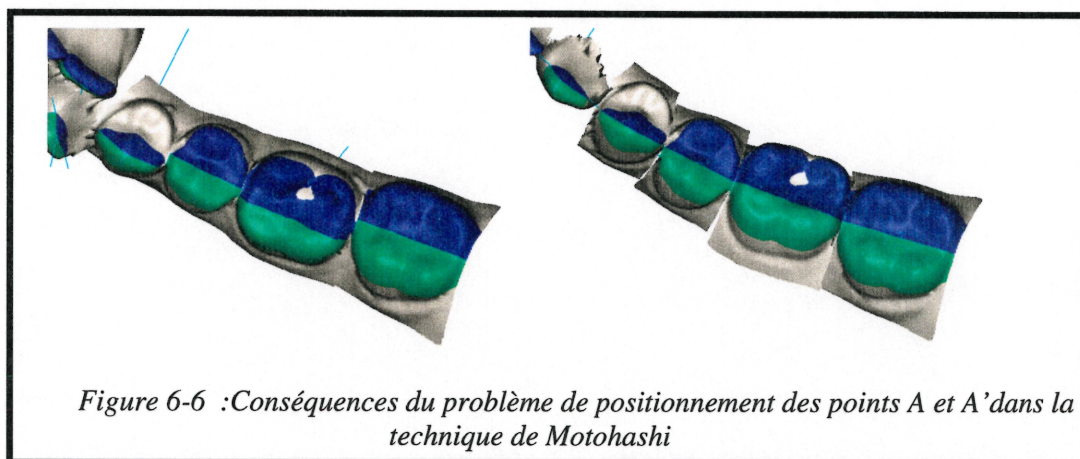
➤ Positionnement des points A et A'.

Ces points définissent le diamètre mésio-distal et déterminent avec le point E le plan représentatif, c'est à dire idéalement un plan vertical coupant la dent en deux parties égales. Or pour les prémolaires et les molaires, les points déterminant le diamètre mésio-distal ne sont pas situés dans le plan transversal médian mais plutôt vestibulairement comme l'indique la figure 6.5.

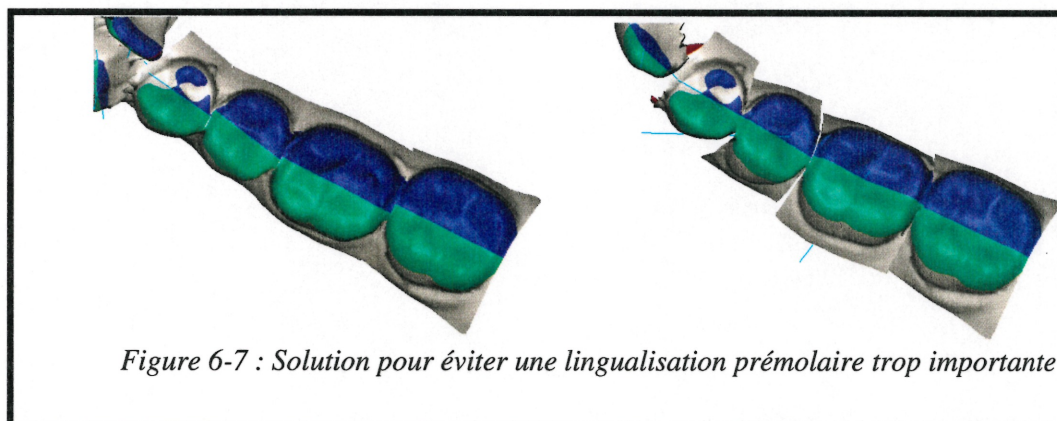


Ainsi, soit la longueur mésio-distale est correcte et le plan représentatif est peu erroné (erreur dans le troisième ordre), ce qui a des conséquences sur l'alignement automatique des dents, soit le plan est exact et c'est alors la largeur mésio-distale qui est diminuée créant des erreurs dans le set-up et le Bolton.

Lors des essais initiaux d'alignement en effectuant rigoureusement la technique de Motohashi, nous avons pu mettre en évidence une très forte lingualisation des dents conséquentes à l'erreur d'orientation de l'axe en troisième ordre. Cette erreur est la plus commune mais aussi à l'origine des plus importants problèmes d'alignement. La courbe de Monson se trouve surcorrigée et les diamètres inter-molaire et inter-prémolaire profondément diminués.



Pour contourner ce défaut, nous avons conservé la largeur mésio-distale et positionné les points plus lingualemment grâce aux systèmes des plans décrits dans nos résultats. L'alignement a été grandement amélioré et la lingualisation diminuée



Cette erreur est importante et il faut dès la sélection des points porter une attention toute particulière à la position du plan vertical médian sur les prémolaires et les molaires afin d'obtenir un set-up de qualité.

L'ensemble des problèmes rencontrés par l'utilisation du système d'axes développé par Motohashi ont permis de mettre en évidence une grande sensibilité du système. La moindre erreur de positionnement d'un des points entraîne de graves erreurs dans le système d'axes de référence et donc dans l'alignement. Afin de minimiser ces erreurs et de ne pas les cumuler au fur et à mesure des étapes du set-up, il est fortement suggérer de développer une méthode différente de détermination des axes dentaires. Cette méthode serait d'autant plus attrayante si elle permettait de définir les axes automatiquement ce qui réduirait considérablement les erreurs d'un positionnement subjectif et le temps nécessaire.

6.2.1.5. Forme d'arcade

➤ Critères de choix

Depuis plus d'un siècle, le sujet de la forme d'arcade est controversé. Trois thèmes qui se contredisent sont couramment étudiés :

- la recherche d'une arcade idéale,
- la variété des formes d'arcade en fonction des individus,
- l'instabilité post-traitement si la forme d'arcade initiale est fortement modifiée.

De nombreux articles font référence à la forme d'arcade idéale. Une grande variété de courbes géométriques a été utilisée : l'ellipse (Izard, 1927, Currier, 1969 Brader, 1972), la parabole (Mills et Hamilton, 1965), la caténaire (Scott, 1957, Burdi et Lillie, 1966) la forme d'équations (Hayashi, 1956, Kawata, 1973), et d'équations polynomiales (Lu, 1966, Pepe, 1975).

Pourtant, l'utilisation clinique de formes d'arcades géométriques standardisées n'est pas appropriée à chaque situation clinique. Deux points essentiels appuient cette idée :

- l'ensemble des études ont examiné l'adaptation de formes géométriques sur des sujets avec des occlusions normales
- la stabilité des arcades dentaires obtenues après traitement orthodontique n'a pas été complètement investiguée.

Riedel, en 1969, cite de nombreux auteurs qui pensent que changer les largeurs inter-molaires et inter-canines durant le traitement augmentent les probabilités de récurrence. Actuellement, cette idée prédomine, ainsi plus les changements de forme d'arcade durant le traitement sont importants, plus le risque de récurrence est important. Ceci est particulièrement vrai pour la distance inter-canine.

En 1995, De la Cruz et al. suggèrent que la forme d'arcade en début de traitement apparaît comme le meilleur guide pour la future forme d'arcade. Ainsi, lorsque la forme d'arcade initiale est modifiée, il y a une forte tendance, dans à peu près 70% des cas, à un retour à la forme originale après le retrait des appareils.

La complexité du choix de la forme d'arcade tient dans la variété des formes rencontrées. Aucune forme d'arcade que ce soit la Bonwill Hawley, la caténaire, la parabole... ne convient à tous les cas cliniques.

Un autre point important, souligné par White, est l'absence de symétrie parfaite des arcades. Du fait de la variabilité des arcades, White suggère de tracer une arcade de référence en début de traitement et de la conserver pour l'ensemble du traitement orthodontique.

Prenant en considération l'ensemble de ces points, nous avons ainsi délibérément fait le choix d'une forme d'arcade individualisée, déterminée selon les paramètres cliniques présents au début du traitement.

Les critères de choix de forme d'arcade reposent sur l'optimisation de la stabilité à venir. Le premier principe est de déterminer la forme d'arcade en respectant la morphologie de la base osseuse. Une asymétrie osseuse squelettique légère pourra alors être reproduite et conservée durant l'ensemble du traitement. Lors de la détermination de la forme d'arcade nous veillerons aussi à la conservation des dimensions inter-canine et inter-molaire et à l'obtention d'un angle inter-incisif idéal.

➤ **Forme d'arcade utilisée dans le programme développé**

Conformément aux études au sujet de la forme d'arcade, il est apparu essentiel de développer une méthode qui respectait les limites de la corticale osseuse. La région osseuse isolée sur les modèles numérisés 3D est située approximativement au niveau de la jonction gingivo-dentaire. Au cours de la phase d'alignement, la contrainte de forme d'arcade permet de s'assurer que toutes les dents sont strictement situées dans l'os.

Motohashi dans son programme de set-up informatisé a fait le choix d'une arcade de type Bonwill Hawley ce qui rend le système peu versatile et pas toujours respectueux de la morphologie osseuse. Une méthode basée sur la forme de la corticale osseuse permet de développer des formes respectant la physiologie et prend en considération la conservation des dimensions inter-canine inférieure et inter-molaire. Si la symétrie d'arcade n'est pas incluse dans les contraintes liées à l'alignement ou que son poids est faible par rapport aux autres contraintes, il est envisageable d'obtenir une forme d'arcade non symétrique mais fidèle à la morphologie de la base osseuse.

6.2.1.6. Alignement basé sur les contraintes

Le système développé dans ce travail est une approche novatrice pour résoudre le problème de l'alignement. La notion de contraintes permet d'adapter pour un patient donné les objectifs à atteindre et de les convertir en contraintes hiérarchisées ou non.

Ce principe, contrairement à un set-up réalisé entièrement manuellement ou régi uniquement par la forme d'arcade, reflète les différents objectifs d'un traitement orthodontique mais aussi les difficultés à tous les atteindre.

Ce qui est intéressant avec un tel concept, c'est l'analogie avec la clinique. Lors de la minimisation de la fonction d'alignement, la solution doit satisfaire toutes les contraintes mais ce n'est pas toujours possible; tout comme en clinique, il est parfois irréalisable de répondre à l'ensemble des exigences définissant la solution idéale. La notion d'atteinte de multiples objectifs reproduit fidèlement les complexités rencontrées au cours du traitement et introduit la notion de compromis pour certains d'entre eux.

L'orthodontiste peut dresser une série d'objectifs, les traduire en contraintes puis simuler le traitement grâce au programme de set-up. Traitement avec extractions, réduction inter-proximal, augmentation du diamètre mésio-distal et mouvements chirurgicaux peuvent être considérés pour une simulation de traitement. L'alignement est acquis en quelques minutes et les solutions thérapeutiques sont visualisées en 3D. En fonction de l'examen clinique et des résultats obtenus, l'orthodontiste peut évaluer le caractère plus ou moins judicieux des options thérapeutiques et choisir en conséquence la stratégie la plus efficace pour les besoins du patient.

Le traitement digital peut aussi se présenter sous une forme dynamique permettant au clinicien de visualiser le traitement à différentes étapes de l'alignement. Cette phase peut se diviser en 10 à 40 étapes selon la sévérité de la malocclusion et la quantité nécessaire de déplacement dentaire. A chacune d'entre elles, on peut envisager de générer un modèle physique en plâtre par stéréolithographie puis une série de gouttières en plastique rigide qui permettront le déplacement des dents. Ce principe est en fait celui utilisé par Invisalign et cette option 3D est facilement reproductible par le programme développé dans ce travail.

Lors de la mise en application du programme, les alignements obtenus ont été jugés satisfaisants et la correction dans les trois ordres permet l'acquisition d'arcades harmonieuses. Plusieurs points sont cependant à améliorer :

- Le système d'axes dentaires à l'origine de multiples erreurs
- L'aspect des dents qui apparaissent avec des lacunes après alignement.
Après segmentation, dans la zone gingivale au point de contact

apparaît une région lacunaire. Cet écueil devrait être rectifié par une reconstruction des parois latérales des dents au moment du découpage des dents.

6.2.1.7. Rapports d'occlusion

Dans l'un des cas présentés, l'occlusion finale est satisfaisante et dans l'autre cas elle est approximative. Le point concernant l'occlusion est le principal manque du programme actuel.

Les contraintes sont appliquées indépendamment sur les deux arcades et l'alignement se produit sans coordination entre les dents antagonistes. Lorsque les formes d'arcades sont quasiment coordonnées en début de traitement, l'occlusion finale est peu affectée. Cependant dans les cas de malocclusions sévères, d'incoordination importante ou encore de traitement combinant de l'orthodontie et de la chirurgie, les relations d'intercuspidation ne peuvent être convenables.

Pour pallier ce défaut, plusieurs contraintes devraient être développées dans des travaux ultérieurs :

- Contrainte de coordination d'arcade : selon le cas clinique, le modèle supérieur ou le modèle inférieur sert de référence pour définir l'arcade antagoniste.
- Contrainte de rapport d'occlusion : il serait judicieux d'ajouter des contraintes pour les surplombs horizontaux et verticaux aussi bien antérieurs que postérieurs.

Il serait aussi envisageable de développer un programme d'ajustement de l'occlusion finale afin que celle-ci soit idéale. Les paramètres de hauteur de collage, de correction des rotations, de torque pourraient ainsi être individualisées pour chaque patient. L'idée principale est de pénaliser la position d'une dent en fonction de sa distance et de ses points de contacts avec les dents antagonistes. La difficulté rencontrée pour cette contrainte est qu'elle n'est pas continue. Ce problème pour l'acquisition d'une intercuspidation idéale n'est pas trivial et pourrait être envisagé comme sujet de recherche à part entière!

6.2.2. Avantages du set-up assisté par ordinateur

En comparaison avec un set-up réalisé manuellement, le set-up informatisé dispose de nombreux avantages.

6.2.2.1. Processus accéléré

A la différence d'un set-up manuel, le système développé est précis et rapide. L'arrangement automatique des dents est effectué rapidement dès que les systèmes d'axes dentaires et les contraintes ont été établis. Il faut environ 45 minutes pour réaliser un set-up entier.

Lorsque plusieurs options thérapeutiques sont envisageables, la possibilité de réaliser différents set-up diagnostiques est un atout considérable qui permet de visualiser clairement les résultats. Le temps requis pour cette tâche est substantiellement réduit.

6.2.2.2. Objectivité des données

Few, Grew et Little ont rapporté qu'il existe une différence significative entre l'évaluation subjective d'un cas orthodontique donné et le diagnostic établi. Une approche cohérente du cas et une analyse logique des données semblait ainsi nécessaire pour donner de la pertinence à nos décisions thérapeutiques.

Bernard a développé un outil mathématique informatique afin de qualifier objectivement la malocclusion et de préciser la nécessité d'un traitement orthodontique.

Les informations recueillies pour la réalisation du set-up sur le modèle digital vont aussi dans ce sens et permettent une approche cohérente pour le diagnostic et le plan de traitement.

6.2.2.3. Évaluation quantitative

L'information concernant la forme et le changement de position des dents est une référence fondamentale pour le diagnostic et l'évaluation du traitement. (Alcaniz, 1998).

Lors de la réalisation du set-up manuel, il est difficile de quantifier les mouvements effectués et de définir le type de mouvement réalisé sur chacune des dents. La superposition des radiographies céphalométriques initiale et finale peut fournir des informations mais celles-ci sont en deux dimensions et ne concernent pas toutes les dents.

Le programme de set-up permet de pallier à ce manque. Plusieurs alternatives sont disponibles

- Superposition du modèle initial et du modèle de set-up. La partie postérieure du modèle sert de référence, il est alors aisé de quantifier exactement les translations et rotations effectuées par chacune des dents. Celle-ci s'effectue automatiquement et précisément.
- Superposition des modèles initiaux et finaux digitalisés. Des structures anatomiques au palais ou à la mandibule peuvent servir de référence comme l'a suggéré Commer (2000). Cette procédure fournit l'ensemble des paramètres de mouvement par la résolution d'une fonction définie par la distance entre les points initiaux et finaux.
- La digitalisation de la radiographie permet de définir un axe de repère comme le plan de Francfort. Chacun des modèles pouvant être placé en correspondance sur la radiographie, il est possible de superposer le modèle initial et final en fonction du plan de francfort. Il devient facile de calculer la quantité de mouvement 3D de chaque dent par rapport à ce système de référence.

6.2.3. Introduction d'images virtuelles dans la pratique orthodontique

6.2.3.1. Un outil de communication

L'introduction d'images de traitements virtuels dans les cabinets d'orthodontie ouvre de nouvelles perspectives dans la communication avec les patients.

La présentation en images de la situation clinique, la simulation du plan de traitement permettent au patient de se sentir impliqué avant même le début de nos thérapeutiques. Le patient devient un véritable acteur dans son traitement et cet état actif permet de susciter une grande motivation.

D'un point de vue éthique, lors des litiges, il est souvent souligné que le patient n'a pas assimilé toutes les subtilités reliées au traitement et que malgré toutes nos explications, il est souvent perdu au milieu d'un vocabulaire trop professionnel. L'orthodontiste dispose avec un tel programme d'un merveilleux outil en images pour faire passer son message. Le patient participe à la décision thérapeutique et il est alors enfin possible de parler de réel consentement éclairé à la signature du contrat de soins.

Lors de la réalisation des set-up manuels, il n'est pas envisageable pour une question de coût et de délais de disposer des modèles en plâtre présentant les différentes options thérapeutiques. Au contraire avec ce logiciel, toutes les options thérapeutiques peuvent être présentées afin de fournir au patient l'ensemble des informations nécessaires à sa décision. Le patient peut alors visualiser aisément les avantages et inconvénients d'une option ou encore les compromis à réaliser. Sarver (1998) a évalué les implications de l'introduction d'images vidéo pour la présentation de chirurgie. 92% des patients visualisaient mieux le traitement avec cette technologie et se sentaient mieux informés pour prendre leur décision.

Dans ce travail, nous avons polarisé nos efforts sur la réalisation d'un set-up le plus proche cliniquement des décisions faites par l'orthodontiste lors de l'élaboration du plan de traitement. Parcequ'un patient mieux informé, acteur de son traitement et qui comprend la nécessité d'une mécanique est un patient intéressé et coopératif, il serait envisageable à moyen terme de développer une interface didactique. Celle-ci permettrait au patient d'apprécier les effets secondaires d'une mécanique, les conséquences d'un mauvais port d'un appareil... L'idée est d'améliorer la coopération du patient et surtout de conserver celle-ci durant l'ensemble du traitement.

6.2.3.2. Qualité du traitement

Un autre bénéfice pour le patient est l'amélioration dans la qualité du traitement.

L'orthodontiste bénéficie d'un véritable guide thérapeutique. Comme un set-up classique, le programme permet d'identifier rapidement une dysharmonie dento-dentaire, de choisir la nature des extractions ou de définir l'ancrage.

Il dispose ainsi de nouvelles informations et fonctions pour une aide au diagnostic et dans l'apprentissage des thérapeutiques.

- Facilité dans l'accessibilité des données

Les mesures dentaires

Nous avons mis en évidence que les mesures des diamètres mésio-distaux sont fiables lorsque réalisées sur les modèles électroniques. Une fois que l'orthodontiste s'est familiarisé avec le logiciel, elles peuvent être effectuées rapidement et aisément et ne nécessitent aucun outil supplémentaire. Les erreurs de lecture sur le pied à coulisse standard sont fréquentes, cet écueil peut être corrigé par l'utilisation d'un pied à coulisse électronique ou encore lors de l'utilisation du set-up virtuel.

Les mesures inter et intra- arcades

Les mesures qui doivent être réalisées avec les modèles en occlusion sont commodément exécutées car il n'y plus de problèmes d'accessibilité de certains points. De plus, plusieurs mesures peuvent être effectuées conjointement.

La visualisation des rapports d'occlusion

Dans l'analyse classique des modèles, l'analyse de l'occlusion requiert un accès à l'intérieur des modèles pendant que les deux arcades sont maintenues en intercuspidation. Cette méthode est peu favorable à un examen précis, au contraire la technique assistée par ordinateur rend possible l'usage de nombreux outils comme des plans de coupes virtuels ou des zones transparentes, permettant d'accomplir des mesures très complexes classiquement.

- Aide au diagnostic

Forme d'arcade

Nous avons souligné l'importance du choix de la forme d'arcade. Avec un tel set-up, la forme de la base osseuse qui permet de définir l'arcade idéale est obtenue automatiquement.

Participation au choix thérapeutique

Cette méthode permet le développement d'un système de diagnostic automatique. En fait, l'utilisation des techniques informatiques de vision appliquées aux images dentaires 3D rend réalisable le calcul automatique de distances et de ratios géométriques. Le programme décrit précédemment exécute un calcul automatique des diamètres mésio-distaux de chaque dent et un calcul automatique de la forme d'arcade. Le développement et l'usage d'un tel procédé pourraient faciliter la conduite des études épidémiologiques en orthodontie.

- Apprentissage

Coopération à la formation

Cette technologie peut participer à la formation de l'orthodontiste par la superposition du modèle digital final à archiver et du modèle de début de traitement

ou encore du set-up. Le traitement achevé, cet exercice permet de comparer le projet avec les résultats obtenus en bouche afin de tirer les enseignements bénéfiques pour la poursuite de l'exercice professionnel du praticien.

Quantification des mouvements dentaires

La possibilité de quantifier exactement les mouvements orthodontiques qui se sont produits durant le traitement est essentielle dans la compréhension de nos thérapeutiques. Cette fonctionnalité est enfin rendue possible et en trois dimensions, ouvrant de nouvelles perspectives dans l'appréciation de nos thérapeutiques.

6.2.3.3. Risques d'un tel outil

L'utilisation d'un tel outil peut aussi présenter des écueils. Une fois le traitement réalisé, celui-ci est rarement parfaitement identique à celui présenté en début de traitement avec le set-up. Une présentation d'images virtuelles de prédiction de traitement pourrait-elle conduire à de plus grandes attentes de la part du patient par rapport à une présentation classique?

L'étude de Philippe (1995) vient souligner cette idée que la présentation d'images vidéo peut augmenter les attentes en termes de qualité de résultats.

Ainsi ce programme, qui apparaît comme un merveilleux outil de communication, peut rapidement représenter un danger médico-légal s'il n'est pas utilisé avec prudence. Il serait audacieux par exemple de fournir au patient une copie papier du set-up prédictif ou encore de présenter des modèles finaux idéaux pour chaque situation clinique alors que les contraintes anatomiques et biomécaniques ainsi que la coopération n'entrent pas en ligne de compte.

Sinclair (1995) a étudié les conséquences de la présentation d'images prédictives dans les cas d'ortho-chirurgie. D'après cet article, la peur que les attentes des patients soient trop importantes n'est pas justifiée. De même, Sarver indique que 89% des patients interrogés jugent les images prédictives réalistes et les objectifs initiaux atteints.

En conséquence, même si des études spécifiques au set-up virtuel s'avèrent nécessaires pour analyser l'impact de ce nouvel outil, on peut d'ores et déjà avancer qu'il doit être utilisé avec tact et mesures. Ce set-up virtuel final ne doit impliquer aucune garantie de résultats, ceci ne mènerait qu'à une augmentation des litiges.

CHAPITRE SEPT

CONCLUSION

7. CONCLUSION

Les objectifs principaux de cette étude étaient de vérifier la fiabilité des programmes commerciaux appliqués aux modèles orthodontiques 3D et de développer un programme original de set-up. Les résultats devaient permettre de vérifier la pertinence scientifique des différents programmes et leur utilité dans une pratique orthodontique quotidienne .

Dans une première partie, la présente étude a permis de mettre en évidence les points suivants :

- Emodel et Orthocad proposent des numérisations fidèles des modèles en plâtre et des interfaces de visualisation et d'animation adaptés aux besoins des orthodontistes.
- Lorsqu'elles sont comparées aux mesures réalisées manuellement avec un pied à coulisse, les mesures sur modèles digitaux sont extrêmement fiables.
- L'outil de mesure proposé par Emodel permet de réaliser les mesures dentaires en trois dimensions alors qu'Orthocad n'offre un système qu'en deux dimensions. Ce manque de flexibilité est à l'origine d'une moins grande précision pour des dents fortement inclinées ou encore chevauchées.

De tels outils peuvent ainsi s'avérer très profitables dans une pratique orthodontique quotidienne, on regrettera cependant qu'ils soient commercialisés sans étude préalable à grande échelle afin de vérifier leurs validités scientifiques et de calculer leurs réelles précisions. De plus les procédés de numérisation pourraient être modifiés afin d'améliorer la précision des modèles et la reproduction de l'occlusion. Enfin des procédés simples de visualisation tels lissage des facettes et réflexion spéculaire amélioreraient la présentation des modèles.

Dans une seconde partie, un programme original de set-up a été développé et décrit, les principales observations sont les suivantes :

- Le programme VTK est tout à fait adapté pour la visualisation et l'animation des modèles 3D. Sa versatilité a permis une exploitation rigoureuse des données et la programmation aisée des différentes étapes du set-up.
- Les différentes modes de visualisation soit en perspective pour obtenir une vision plus réaliste de l'objet en trois dimensions sur un support en deux dimensions soit orthographique pour effectuer des mesures exactes pourraient mieux répondre aux attentes des orthodontistes.
- L'amélioration du rendu des modèles reproduit un aspect de modèle savonné dont l'esthétique est plus agréable à visualiser et similaire à celui des modèles en plâtre classiques.
- La superposition des modèles digitaux sur la radiographie numérisée permet à l'orthodontiste d'évaluer concrètement sur une image unique les relations entre les différents composants du complexe dento-facial et fournit l'ensemble des informations utiles pour initier le set-up.
- La segmentation effectuée par découpage avec plans est très précise et permet de ne pas perdre de substance dentaire à la différence d'une segmentation à la scie lors de la réalisation d'un set-up classique.
- L'implantation dans notre programme du système d'axes de repères dentaires développé par Motohashi permet d'envisager un alignement automatique des dents et ainsi un gain de temps et de qualité. Cependant la mise en application de ce procédé a permis de mettre en évidence une trop grande sensibilité de ce système.
- Privilégiant une approche morfo-fonctionnelle, la forme d'arcade développée se veut physiologique et individualisée. Elle n'est pas déterminée selon une règle spécifique et répond aux critères de choix pour l'optimisation de la stabilité à venir.

- La méthode d'un alignement automatique basé sur le principe de la minimisation de contraintes est une approche novatrice et séduisante. La notion de contraintes permet d'adapter pour un patient donné les objectifs et reflète les difficultés rencontrées lors d'un traitement orthodontique. Cette méthode fournit des résultats satisfaisants cependant quelques points comme le rendu des dents après segmentation ou les rapports d'occlusion doivent être améliorés.

A la lumière des résultats obtenus et de nos lectures, plusieurs recommandations directement reliées au programme du set-up et concernant des études futures peuvent être avancées .

Le point le plus important est le système d'axes dentaires à l'origine d'erreurs multiples. Le système de Motohashi devrait soit être encore ajusté soit remplacé par un procédé totalement différent. On pourrait par exemple imaginer un système automatique capable de rechercher la ligne de plus grand contour de chaque dent et ainsi de les orienter. Un test préliminaire a d'ailleurs été essayé au cours de notre travail, il était basé sur le parallélisme des normales de la surface dentaire. Le point de départ était situé au niveau de la cuspide puis toutes les normales de la surface dentaire étaient recherchées jusqu'à leur concordance qui correspond à la ligne de plus grand contour. Ce projet n'a pas fait l'objet d'investigations supplémentaires étant donné son ampleur.

Le deuxième point essentiel est la recherche d'une intercuspidation idéale de fin de traitement. La notion de contraintes devraient être étendue pour établir les rapports entre les deux arcades ce qui impliquerait une coordination de celles-ci. On peut aussi imaginer un programme de recherche de l'occlusion idéale mais ce projet est complexe et devrait être envisagé comme sujet de recherche pour une nouvelle maîtrise.

De plus, il serait intéressant d'automatiser le système de segmentation des dents tout en conservant sa qualité pour un gain de temps substantiel, d'introduire le centre du condyle comme axe de référence pour les mouvements mandibulaires afin de simuler ces mouvements comme sur un articulateur.

L'introduction d'images de traitements virtuels dans les cabinets d'orthodontie est très prometteuse et ouvre de nouvelles perspectives tant dans l'objectivité des données par une approche cohérente pour le diagnostic et le plan de traitement, que dans l'auto-apprentissage de l'orthodontiste ou encore dans la communication avec les patients. Utilisé avec circonspection, un tel outil peut participer à la qualité des traitements et proposer une orientation plus didactique des choix thérapeutiques.

CHAPITRE HUIT

BIBLIOGRAPHIE

8. BIBLIOGRAPHIE

1. Alcaniz M, Montserrat C, Grau V, Chinesta F, Ramon A, Albalat S. An advanced system for the simulation and planning of orthodontic treatment. *Med Image Anal.* 1998 Mar;2(1):61-77.
2. Ayoub AF, Wray D, Moos KF, Jin J, Niblett TB, Urquhart C, Mowforth P, Siebert P. A three-dimensional imaging system for archiving dental study casts: a preliminary report. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg.* 1997;12(1):79-84.
3. Bailleul J. Technique du set-up ; application au tooth positionner. *Orthod Fr.* 1967;38 :503-515.
4. Begole EA, Cleall JF, Gorny HC. A computer program for the analysis of dental models. *Comput Programs Biomed.* 1979 Dec;10(3):261-70.
5. BeGole EA, Lyew RC. A new method for analyzing change in dental arch form. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1998 Apr;113(4):394-401.
6. Begole EA. A computer program for the analysis of dental arch form using the cubic spline function. *Comput Programs Biomed.* 1979 Sep;10(2):136-42.
7. BeGole EA. A computer program for the analysis of dental arch form using the catenary curve. *Comput Programs Biomed.* 1981 Mar-Jun;13(1-2):93-9.
8. Bennett, Sir Norman. *Science and practice of dental surgery*, London: Oxford medical publications, 1931:413.
9. Berkowitz S. Stereophotogrammetric analysis of casts of normal and abnormal palates. *Am J Orthod.* 1971 July; 60(1):1-18
10. Bernard C, Brodeur JM, Fournier A, Naccache H. Evaluation épidémiologique d'un instrument de diagnostic orthodontique assisté par ordinateur. *Rev Orthop Dento faciale.* 1993 ;27 :279-94.
11. Béry A. Réalisation d'un modèle occlusal prévisionnel sur articulateur semi-adaptable. *Rev Orthop Dento faciale.* 1986 ;20 :19-27.
12. Bhatia SN, Harrison VE. Operational performance of the travelling microscope in the measurement of dental casts. *Br J Orthod.* 1987 Jul;14(3):147-53.
13. Biggerstaff RH. Computerized diagnostic setups and simulations. *Angle Orthod.* 1970 Jan;40(1):28-36.

14. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*. 1986 Feb 8 :307-310.
15. Boersma H. A method for making dental casts with cold-curing polyester resin. *J Am Dent Assoc*. 1967 May;74(6):1265-7
16. Brader AC. Dental arch form related to intra-oral forces :PR=C. *Am J Orthod*.1972 ;61 :541-61.
17. Burdi AR, Lillie JH. A catenary analysis of the maxillary dental arch form during human embryogenesis. 1966 ;154 :13-20.
18. Burstone CJ. Dr. Charles J. Burstone on the uses of the computer in orthodontic practice (part 1). *J Clin Orthod*. 1979 Jul;13(7):442-53.
19. Burstone CJ. Dr. Charles J. Burstone on the uses of the computer in orthodontic practice (part 2). *J Clin Orthod*. 1979 Aug;13(8):539-51.
20. Burstone, CJ. Problem solving in orthodontics : goal-oriented treatment strategies. Chicago : Quintessence Pub. Co., 2000 : 267 p.
21. Butcher GW, Stephens CD. The reflex optical plotter. A preliminary report. *Br Dent J*. 1981 Nov 3;151(9):304-5.
22. Champagne M. Reliability of measurements from photocopies of study models. *J Clin Orthod*. 1992 Oct;26(10):648-50.
23. Commer P, Bourauel C, Maier K, Jager A. Construction and testing of a computer-based intraoral laser scanner for determining tooth positions. *Med Eng Phys*. 2000 Nov;22(9):625-35.
24. Currier JH. A computerized geometric analysis of human dental arch form. *Am J Orthod*. 1969 ;56 :164-79.
25. De la Cruz AR, Sampson P, Little RM. Long term changes in arch form after orthodontic treatment and retention. *Am J Orthod*. 1995 ;107 :518-30.
26. Dirksen D, Diederichs S, Runte C, von Bally G, Bollmann F. Three-dimensional acquisition and visualization of dental arch features from optically digitized models. *J Orofac Orthop*. 1999;60(2):152-9.
27. Duret F. La CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur) dentaire. *Actual Odontostomatol (Paris)*. 1991 Sep;45(175):431-54.
28. Faber RD. Occlusograms in orthodontic treatment planning. *J Clin Orthod*. 1992 Jul;26(7):396-401.

29. Fiorelli G, Melsen B. The "3-D occlusogram" software. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1999 Sep;116(3):363-8.
30. Fischer-Brandies H, Orthuber W, Laibe J, Menzel E. Continuous arch wire technique using the bending art system. *J Orofac Orthop.* 1997;58(4):198-205.
31. Goshtasby AA, Nambala S, deRijk WG, Campbell SD. A system for digital reconstruction of gypsum dental casts. *IEEE Trans Med Imaging.* 1997 Oct;16(5):664-74.
32. Graber TM, Vanarsdall, RL. *Orthodontics : current principles and techniques*, 3 rd ed, St. Louis, 2000, 1040 p.
33. Graber TM. *Orthodontics : principles and practice*, 3 rd ed, Philadelphia, 1972, 403-466.
34. Halazonetis DJ. Acquisition of 3-dimensional shapes from images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2001 May;119(5):556-60.
35. Harradine N, Suominen R, Stephens C, Hathorn I, Brown I. Holograms as substitutes for orthodontic study casts: a pilot clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1990 Aug;98(2):110-6.
36. Hayashi T. A mathematical analysis of the curve of dental arch. *Bull Tokyo Med Dent Univ.* 1956 ;3 :175-218.
37. Hirogaki Y, Sohamura T, Satoh H, Takahashi J, Takada K. Complete 3-D reconstruction of dental cast shape using perceptual grouping. *IEEE Trans Med Imaging.* 2001 Oct;20(10):1093-101.
38. Ho CT, Freer TJ. A computerized tooth-width analysis. *J Clin Orthod.* 1999 Sep;33(9):498-503.
39. <http://public.kitware.com/VTK/>
40. <http://www.cyberware.com/>
41. <http://www.dentalemodels.com/>
42. http://www.invisalign.com/html/Explore/explore_frameset.asp
43. <http://www.orthocad.com/>
44. Hunter WS, Priest WR. Errors and discrepancies in measurement of tooth size. *J D Res.* 1960 Apr ; 39(2) :405-414.

45. Izzard G. New method for the determination of the normal arch by the function of the face. *Int J Orthodont*. 1927 ;13 :582-95.
46. Kawata T. Statistical and dynamical analysis of dental arch form in adult human with normal occlusion. *J Osaka Univ School*. 1973 ; 13 : 582-95.
47. Keating PJ, Parker RA, Keane D, Wright L. The holographic storage of study models. *Br J Orthod*. 1984 Jul;11(3):119-25.
48. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. *Am J orthod Oral Surg*. 1945 ;31 :297-304.
49. Kim SH, Park YG. Easy wax setup technique for orthodontic diagnostic. *J Clin Orthod*. 2000 Mar;34(3):140-4.
50. Klette R, Schluns K, Koschan A. Computer vision : three dimensionnal data from images. Singapore, Springer, 1998, 392p.
51. Knierim RW. A simplified wax setup technique. *J Clin Orthod*. 1975 May;9(5):305-7.
52. Kopelman A, Taub E. Method and system for acquiring three dimensional teeth image. Brevet n°6099314. 2000 Aug ; 14p.
53. Korkhaus G. A new orthodontic symmetrograph. *Int J Orthod*. 1930 ;16 :665.
54. Kuroda T, Motohashi N, Muramoto M. Method of and apparatus for making a dental set-up model. 1997 Feb, brevet n°5605459, 15p.
55. Kuroda T, Motohashi N, Tominaga R, Iwata K. Three-dimensional dental cast analyzing system using laser scanning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1996 Oct;110(4):365-9.
56. Laurendeau D, Guimond L, Poussart D. A computer-vision technique for the acquisition and processing of 3-D profiles of dental imprints : an application in orthodontics. *IEEE Trans Med Imag*. 1991 Sept ;10(3) :453-461.
57. Lebret L. Growth change of the palate. *J D Res*. 1962 Dec ;41(6) :1391-1404.
58. Lu KH. An orthogonal analysis of the form, symmetry and asymmetry of the dental arch. *Arch Oral Biol*. 1966 ;11/1057-1069.
59. Lundstrom A. Introduction to orthodontics. Toronto, McGraw-Hill, Blakiston Division. 1960. 315p.

60. Machen DE. Legal aspects of orthodontic practice: risk management concepts. Diagnosis, root resorption, and progress monitoring. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989 Mar;95(3):267-8.
61. Machen DE. Legal aspects of orthodontic practice: risk management concepts. Professional liability insurance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989 Apr;95(4):357-9.
62. Machen DE. Legal aspects of orthodontic practice: risk management concepts. Periodontal disease in orthodontic practice. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989 May;95(5):445-7.
63. Machen DE. Legal aspects of orthodontic practice: risk management concepts. Short- and long-term risk management strategies. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1989 Jun;95(6):524-5.
64. Mah J, Sachdeva R. Computer-assisted orthodontic treatment: the SureSmile process. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2001 Jul;120(1):85-7.
65. Marcel T. Our digital model experience : a six month Orthocad user report. *Pac Coast Soc Orthod Bul.* 2001 Summer ;73(2) :3-5.
66. Marchal A, Deblock L, Ray B. Interêts des occlusogrammes dans les cas dissymétriques. *Rev Orthop Dento Faciale.* 1998 ; 32 :429-438.
67. Marcotte MR. The use of the occlusogram in planning orthodontic treatment. *Am J Orthod.* 1976 Jun;69(6):655-67.
68. Marcotte MR. The use of the occlusogram in planning orthodontic treatment. *Am J Orthod.* 1976 Jun;69(6):655-67.
69. Martensson B, Ryden H. The holodent system, a new technique for measurement and storage of dental casts. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1992 Aug;102(2):113-9.
70. Martin JH, McEwen JD, Spence JA. Methods available to improve the surface hardness and appearance of study models. *Dent Pract Dent Rec.* 1970 Dec;21(4):131-6.
71. McCance AM, Perera S, Woods SJ. Trimming study models for photocopying. *J Clin Orthod.* 1991 Jul;25(7):445-7.
72. McGuinness NJ, Stephens CD. Storage of orthodontic study models in hospital units in the U.K. *Br J Orthod.* 1992 Aug;19(3):227-32.

73. Mills LF, Hamilton PM. Epidemiological studies of malalignment, a method for computing dental arch circumference. *Angle Orthod.* 1965 ;35 :244-8.
74. Mormann WH, Brandestini M. Die CEREC computer reconstruction : inlays, onlays und veneers. Berlin : Quintessenz verlags, 1989.
75. Moorrees CFA, Thomsen S, Jensen E, Yan PK. Mesiodistal crown diameters of the deciduous and permanent teeth in individuals. *J D Res.* 1957 Feb ;36(1) :39-54.
76. Motohashi N, Kuroda T. A 3D computer-aided design system applied to diagnosis and treatment planning in orthodontics and orthognathic surgery. *Eur J Orthod.* 1999 Jun;21(3):263-74.
77. Oliver OA, Irish RE, Wood CR. The labio-lingual technique, St Louis : Mosby, 1940.
78. Pepe SH. Polynomial and catenary curve fits to human dental arches. *J Dent Res.* 1975 ;54 :1124-1132.
79. Perera PS. Orienting dental casts to cephalometric radiographs. *Angle Orthod.* 1981 Jul;51(3):246-51.
80. Phillips HC, Hill BJ, Cannac C. The influence of video imaging in patients perceptions and axpectations. *Angle Orthod.* 1995 ;64 :263-70.
81. Proffit, WR. Contemporary orthodontics, 3rd ed, Mosby, St. Louis, 2000, 742 p.
82. Redmond WR. Digital models: a new diagnostic tool. *J Clin Orthod.* 2001 Jun;35(6):386-7.
83. Rekow D, Nappi B. Automation and expert systems for design and fabrication of dental restoration. In Taylor R, Lavallée S, Burdea G. Computer integrated surgery. MIT Press, Cambridge, 1995.
84. Remise C. Occlusogrammes. Note de cours de la partie plan de traitement. 1999.
85. Richmond S. Recording the dental cast in three dimensions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1987 Sep;92(3):199-206.
86. Riedel RA. Current orthodontic concepts and techniques, Graber TM, WB Saunders Co. 1969.
87. Robertson NR, Kennedy DS. The photography of orthodontic study models. *Eur J Orthod.* 1984 Feb;6(1):70-4.

88. Roswick NA, Simon WJ. Impressions for study models, *Dent Assist*. 1974 Nov;43(11):10-7.
89. Rudge SJ. A computer program for the analysis of study models. *Eur J Orthod*. 1982 Nov;4(4):269-73.
90. Ryden H, Bjelkhagen H, Martensson B. Tooth position measurements on dental casts using holographic images. *Am J Orthod*. 1982 Apr;81(4):310-3.
91. Sachdeva RC. SureSmile technology in a patient--centered orthodontic practice. *J Clin Orthod*. 2001 Apr;35(4):245-53.
92. Sarver DM. Video-imaging and treatment presentation: medico-legal implications and patient perception. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1998 Mar;113(3):360-3.
93. Schirmer UR, Wiltshire WA. Manual and computer-aided space analysis: a comparative study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1997 Dec;112(6):676-80.
94. Scott JH. The shape of dental arches. *J Dent Res*. 1957 ;36 :996-1003.
95. Scott PJ. The reflex plotters : Measurements without photographs. *Photogrammetric Record*. 1981; 10:435-446.
96. Sinclair PM, Kilpelainen P, Phillips C, White RP. The accuracy of videoimaging in orthognathic surgery. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1995 ;107 :177-85.
97. Singh IJ, Savara BS. A method for making tooth and dental arch measurements. *J Am Dent Ass*. 1964 Dec ;69 :719-721.
98. Smith R. Www cyber smiles. *Ortho Prod*. 2000 Nov.
99. Stanton FL, Fish GD, Ashley-Montagu MF. Description of three instruments for use in orthodontic and cephalometric investigations, with some remarks on map construction. *J D Res*. 1931 : 885-902.
100. Takada K, Lowe AA, DeCou R. Operational performance of the Reflex Metrograph and its applicability to the three-dimensional analysis of dental casts. *Am J Orthod*. 1983 Mar;83(3):195-9.
101. Terai H, Shimahara M, Sakinaka Y, Tajima S. Accuracy of integration of dental casts in three-dimensional models. *J Oral Maxillofac Surg*. 1999 Jun;57(6):662-5.
102. Van der Linden, FP. *Diagnosis and treatment planning in dentofacial orthopedics*. London, Quintessence Pub. Co., 1987. 336 p.

103. Van der Linden FP, Boersma H, Zelders T, Peters KA, Raaben JH. Three-dimensional analysis of dental casts by means of the optocom. *J Dent Res.* 1972 Jul-Aug;51(4):1100
104. Van der Linden FP. A new method to determine tooth positions and dental arch dimensions. *J Dent Res.* 1972 Jul-Aug;51(4):1104.
105. Visessaksanti U. An easy method of checking archform and canine width. *J Clin Orthod.* 1998 Oct;32(10):608-10.
106. Watt A. *Computer graphics.* 2nd ed, Addison –Wesley, 1993, 500p.
107. White LH. The clinical use of occlusograms. *J Clin Orthod*; 1982 Feb ;16(2) :92-103.
108. White LW. Accurate arch-discrepancy measurements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1977 Sept;72(3):303-8.
109. Wolk RS. New concept for impressions and models. *J Clin Orthod.* 1985 Mar;19(3):202-4.
110. Yamamoto K, Hayashi S, Nishikawa H, Nakamura S, Mikami T. Measurements of dental cast profile and three-dimensional tooth movement during orthodontic treatment. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1991 Apr;38(4):360-5.
111. Yamany SM, Farag AA, Tasman D, Farman AG. A 3-D reconstruction system for the human jaw using a sequence of optical images. *IEEE Trans Med Imaging.* 2000 May;19(5):538-47.
112. Yamany S, A. Farag, and N. A. Mohamed. Orthodontics Measurements using Computer Vision. *Proc. of IEEE-EMBS.* 1998 ; 20, part 2 :536-569.
113. Yen CH. Computer-aided space analysis. *J Clin Orthod.* 1991 Apr;25(4):236-8.

CHAPITRE NEUF

ANNEXES

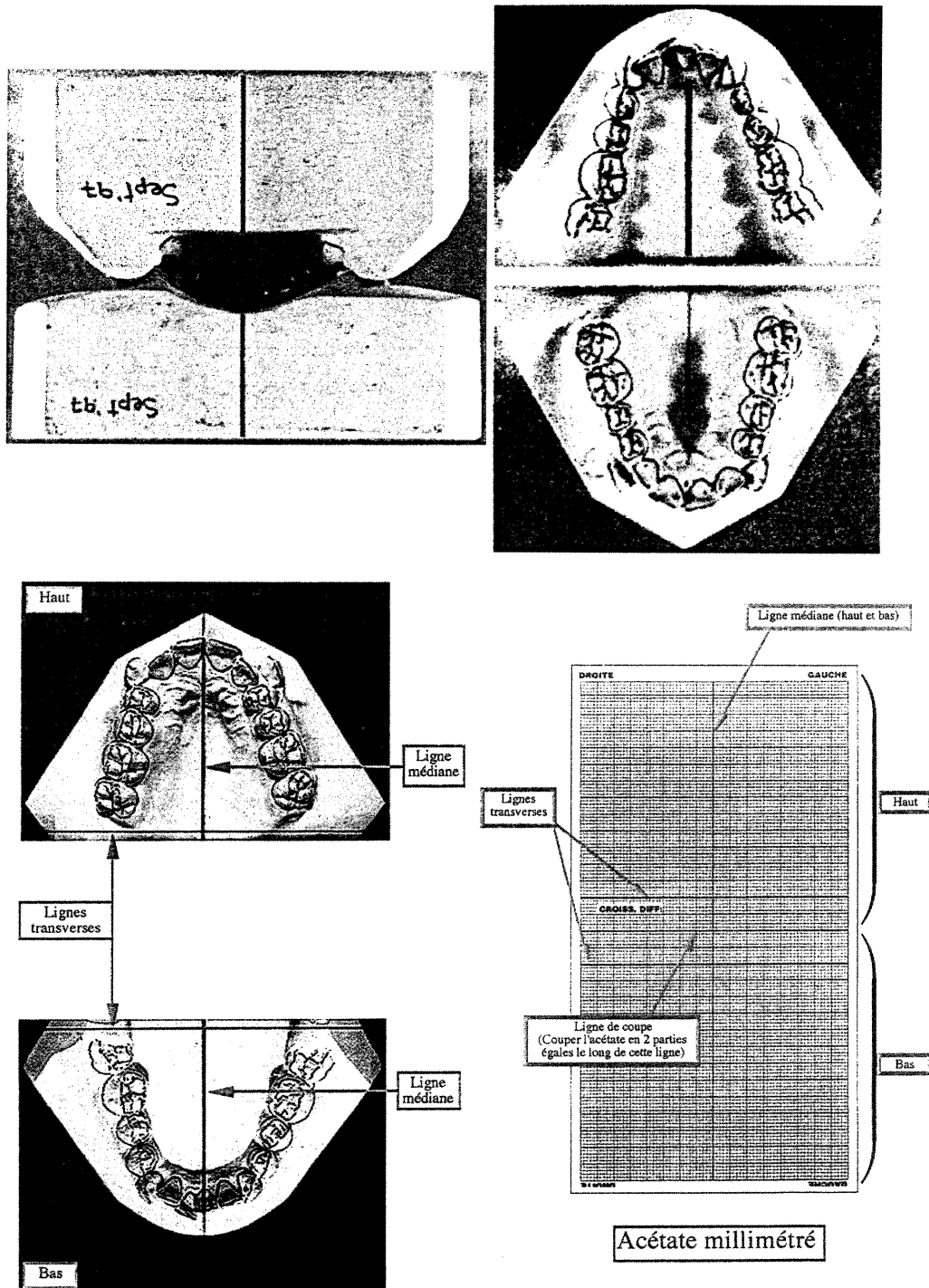
9. ANNEXES

9.1. ANNEXE 1 : CHARTE POUR ÉVALUER LA DYSHARMONIE DENTO-DENTAIRE, LE GATWD.

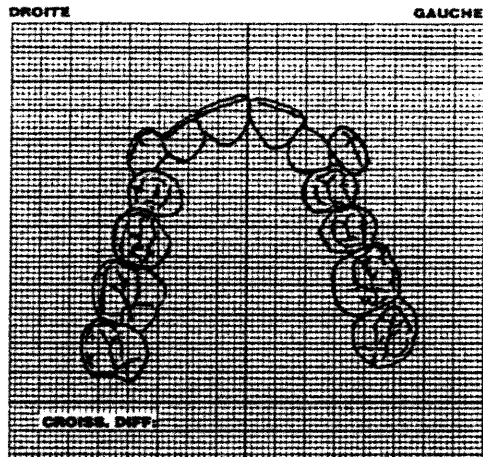
CUMULATIVE PERCENTAGE RATIOS (%)

	Ratio	2 S.D. Below	Mean	2 S.D. Above
CPR1	<u>Md. 1-1</u> Mx. 1-1	57.91	63.69	69.47
CPR2	<u>Md. 2-2</u> Mx. 2-2	69.35	74.51	79.67
CPR3	<u>Md. 3-3</u> Mx. 3-3	74.53	78.73	82.93
CPR4	<u>Md. 4-4</u> Mx. 4-4	80.58	84.04	87.50
CPR5	<u>Md. 5-5</u> Mx. 5-5	84.71	88.09	91.47
CPR6	<u>Md. 6-6</u> Mx. 6-6	88.82	91.98	95.14
CPR7	<u>Md. 543</u> Mx. 543	92.52	97.72	102.92
CPR8	<u>Md. 54</u> Mx. 54	96.46	103.71	110.96
CPR9	<u>Md. 654</u> Mx. 654	98.84	104.56	110.28

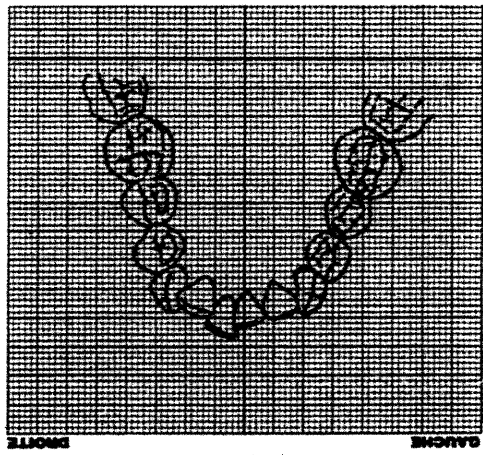
9.2. MÉTHODE POUR LA RÉALISATION DE L'OCCLUSOGRAMME
À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL



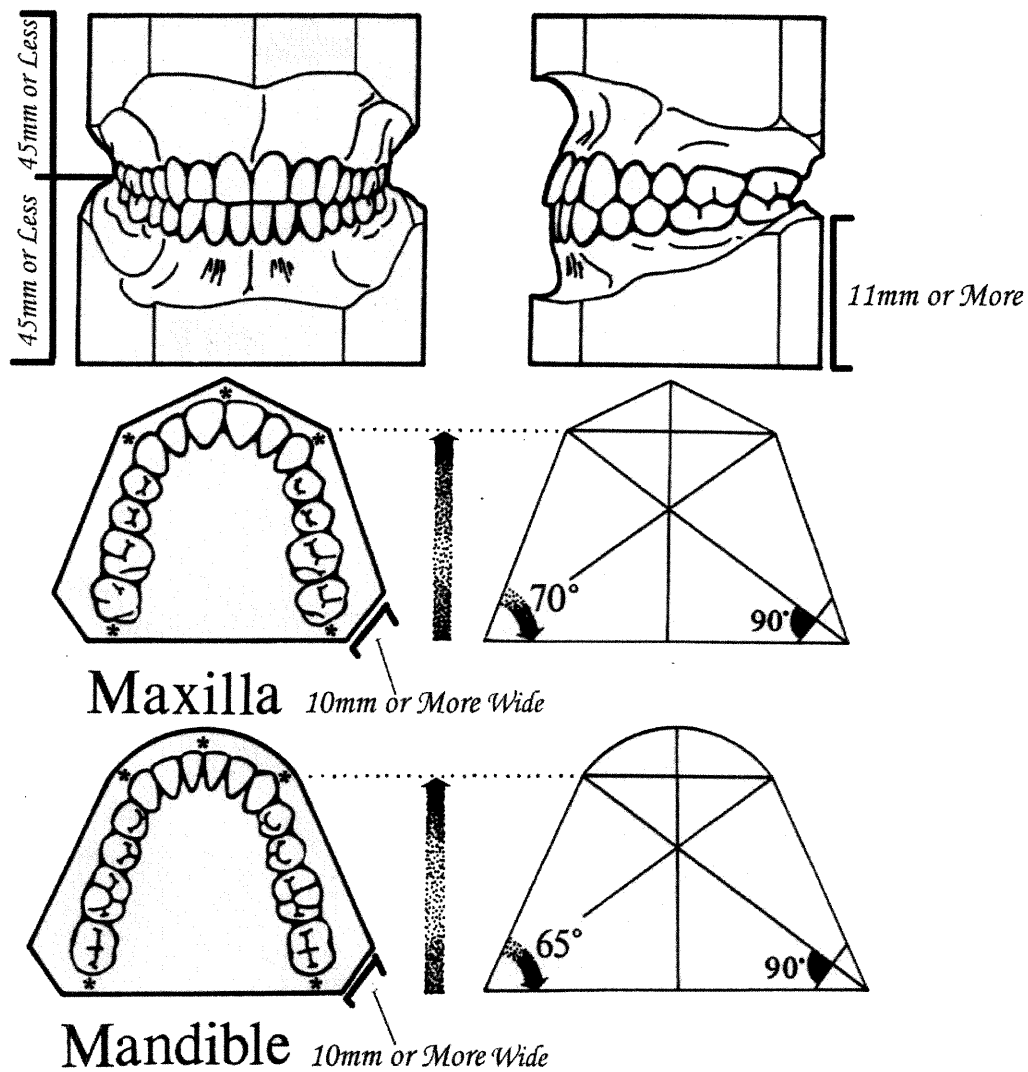
Photos Polaroid 1:1



Tracés
détaillés
des
modèles



**9.3. TAILLE DES MODÈLES RECOMMANDÉ PAR EMODEL POUR
LA NUMÉRISATION**



NOTE: Please try to avoid Undercutting where the teeth meet the gums.