

UNIVERSITE DE STRASBOURG
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2019

N° 32

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 26/04/2019

par

QUARRÉ Luc

né le 08/03/1991 à GUEBWILLER

**ACQUISITION OPTIQUE TRIDIMENSIONNELLE DU VISAGE :
METHODE ET INTERET DANS LE PROJET ESTHETIQUE**

Président : Professeur HUCK Olivier

Asseseurs : Docteur ETIENNE Olivier
Docteur BAHI-GROSS Sophie
Docteur PILAVYAN Elise

Membre invité : Docteur GERMAIN Paul

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE DE STRASBOURG

Doyen : Professeur C. TADDEI-GROSS

Doyens honoraires : Professeur R. FRANK
Professeur M. LEIZE
Professeur Y. HAIKEL

Professeurs émérites : Professeur W. BACON
Professeur H. TENENBAUM

Responsable des Services Administratifs : Mme F. DITZ-MOUGEL

Professeurs des Universités

V. BALL	Ingénierie Chimique, Energétique - Génie des Procédés
A. BLOCH-ZUPAN	Sciences Biologiques
F. CLAUSS	Odontologie Pédiatrique
J-L. DAVIDEAU	Parodontologie
Y. HAÏKEL	Odontologie Conservatrice - Endodontie
O. HUCK	Parodontologie
M-C. MANIERE	Odontologie Pédiatrique
F. MEYER	Sciences Biologiques
M. MINOUX	Odontologie Conservatrice - Endodontie
A-M. MUSSET	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
C. TADDEI-GROSS	Prothèses
B. WALTER	Prothèses

Maîtres de Conférences

Y. ARNTZ	Biophysique moléculaire
S. BAHİ-GROSS	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
L. BIGEARD	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
Y. BOLENDER	Orthopédie Dento-Faciale
F. BORNERT	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
A. BOUKARI	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
O. ETIENNE	Prothèses
F. FIORETTI	Odontologie Conservatrice - Endodontie
C-I. GROS	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
S. JUNG	Sciences Biologiques
N. LADHARI	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
D. OFFNER	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
M. SOELL	Parodontologie
D. WAGNER	Orthopédie Dento-Faciale
E. WALTMANN	Prothèses

Equipes de Recherche

N. JESSEL	INSERM / Directeur de Recherche
Ph. LAVALLE	INSERM / Directeur de Recherche
H. LESOT	CNRS / Directeur de Recherche
M-H. METZ-BOUTIGUE	INSERM / Directeur de Recherche
P. SCHAAF	UdS / Professeur des Universités / Directeur d'Unité
B. SENGER	INSERM / Directeur de Recherche

Remerciements :

Au Président du jury, Monsieur le Professeur Olivier HUCK.

Vous me faites l'honneur de présider ce jury et de juger ce travail.

Au Directeur de cette thèse, Monsieur le Docteur Olivier ETIENNE,

Vous m'avez fait l'honneur d'accepter la direction de cette thèse. Pour votre engagement et votre implication auprès des étudiants, pour la passion que vous transmettez, je vous témoigne ma plus grande gratitude.

Aux membres du jury, Mesdames les Docteurs Sophie BAHY-GROSS et Elise PILAVYAN. Vous me faites l'honneur d'apporter vos expériences à la critique de ce travail en siégeant dans mon jury de thèse. Je vous prie de bien vouloir accepter ma respectueuse considération.

Au membre invité du jury, Monsieur le Docteur Paul GERMAIN. Pour avoir été un excellent maître de stage, pour votre sympathie et votre sourire m'ayant permis de vivre un apprentissage chaleureux, et pour avoir accepté de juger ce travail, je vous remercie infiniment. Je vous prie de bien vouloir trouver ici ma sincère reconnaissance, et tout mon respect.

À Jacques, mon très cher ami, je ne saurais te remercier assez pour l'immense pierre que tu as apporté à cet édifice. Au delà du sacrifice de temps et de ta personne tu as su te montrer disponible et à l'écoute pour les différentes étapes de ma vie et ce depuis notre rencontre. Mes amitiés les plus sincères et profondes.

Comme dirait Albert « La valeur d'un homme tient dans sa capacité à donner et non dans sa capacité à recevoir. »

À Jean-Marc, maître prothésiste de talent, amoureux de transmettre son savoir-faire. Ton aide a été primordiale dans l'élaboration de ce projet. Je suis fier d'avoir travaillé avec toi et je te témoigne toute ma reconnaissance.

À la digne Barbara, au vaillant Adrien, à l'intrépide Massimo et au loyal Olivier, fervent défenseurs de la cause par vos relectures ou votre contribution. Un grand merci pour votre soutien et votre aide qui me fut si précieuse.

À mes parents, pour leur soutien inconditionnel. Tout au long de mon cursus, ils m'ont toujours encouragé et aidé. Ils ont su me donner toutes les chances pour réussir.

À mes deux grandes sœurs Cyrielle et Ulrike qui m'ont toujours soutenu dans mes choix et qui m'ont sans cesse permis de grandir en me servant d'exemples.

À mes très chers amis Gautier, Matthieu, Nicolas, Julien, Arnaud, Pierre et Eduard pour vos encouragements au cours de ce travail et pour votre amitié indéfectible le reste du temps.

À ma grande tante Maria, pour son expérience de la vie et son amour inconditionnel.

À la société 3D dental store, en particulier Bastien, Nicolas et Jean-Michel pour leur professionnalisme, leur réactivité et leur faculté à résoudre les problèmes rencontrés.

**ACQUISITION OPTIQUE
TRIDIMENSIONNELLE DU VISAGE :
METHODE ET INTERET DANS LE PROJET
ESTHETIQUE**

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	12
INTRODUCTION	13
1 ACQUISITION.....	16
1.1 DIFFERENTES METHODES DE SCANNAGE TRIDIMENSIONNEL	16
1.1.1 Avec contact.....	17
1.1.2 Sans contact.....	17
1.1.2.1 Scanner sans contact actif	18
1.1.2.1.1 Par temps de vol.....	18
1.1.2.1.2 Par triangulation laser	18
1.1.2.1.3 À lumière structurée.....	19
1.1.2.1.4 Interférométrie et Moiré.....	19
1.1.2.2 Scanner sans contact passif	20
1.1.2.2.1 Photogrammétrie.....	20
1.2 APPLICATION CLINIQUE PAR PHOTOGRAMMETRIE	21
1.2.1 Concept et principe (Définition)	21
1.2.2 Logiciel de photogrammétrie.....	24
1.2.2.1 Précision des logiciels.....	25
1.2.3 Précision d'acquisition et validation clinique de la photogrammétrie.....	25
1.2.3.1 Photogrammétrie multi-caméra (système commercialisé : Di3D, 3Dmd, ...).....	25
1.2.3.2 Photogrammétrie mono-caméra.....	26
1.2.4 Application dans d'autres domaines.....	26
1.2.4.1 Médical.....	26
1.2.4.2 Archéologie	28
1.2.4.3 Patrimoine.....	28
1.2.4.4 Divertissement (Fifa, cinéma)	28
1.2.4.5 Topographie cartographie	29
1.2.4.6 Criminologie.....	29
1.2.4.7 Milieu industriel	29
1.2.5 Méthode et protocole.....	30
1.2.5.1 Matériel	30
1.2.5.1.1 Choix de l'appareil.....	30
1.2.5.1.1.1 Boîtier	30
1.2.5.1.1.2 Capteur.....	31
1.2.5.1.1.3 Objectif	31
1.2.5.1.1.4 Entretien du capteur et de l'objectif.....	32
1.2.5.1.1.5 Réglage de l'appareil	32
➤ Mode « manuel ».....	32
➤ Mode « rafale »	34
1.2.5.1.2 Ordinateur (configuration requise).....	34
1.2.5.1.3 Outils complémentaires	35
1.2.5.2 Environnement de prise de vue.....	36
1.2.5.2.1 Espace nécessaire	37
1.2.5.2.2 Eclairage	37
1.2.5.2.3 Flash.....	38
1.2.5.3 Préparation du patient	38
1.2.5.3.1 Positionnement sujet opérateur.....	38
1.2.5.3.2 Orientation naturelle de la tête.....	38
1.2.5.3.3 Accessoires	39
1.2.5.3.4 Cheveux et pilosité	39
1.2.5.3.5 Regard.....	39
1.2.5.4 Capture	40

1.2.5.4.1	Schéma de capture	40
1.2.5.4.2	Sourire forcé : un sourire plein	42
1.2.5.4.3	Avec écarteur	43
1.2.5.4.3.1	Du visage	43
1.2.5.4.3.2	De la « zone buccale »	43
1.2.5.4.4	Prérequis pour la mise à l'échelle réelle de l'objet virtuel	43
1.2.5.5	Transfert et sélection des photos	44
1.2.5.6	Logiciel de reconstruction 3D	45
1.2.5.6.1	Photocan Agisoft	45
1.2.5.6.1.1	Aperçu de la présentation du logiciel	45
1.2.5.6.1.2	Créer un « chunk » ou « morceau »	46
1.2.5.6.1.3	Importer les photos	46
1.2.5.6.1.4	Estimation de la qualité	47
1.2.5.6.1.5	Aligner les photos	47
1.2.5.6.1.6	Délimiter le volume de reconstruction	49
1.2.5.6.1.7	Construction d'un nuage dense	50
1.2.5.6.1.8	Construction du maillage	52
1.2.5.6.1.9	Aligner et fusionner les morceaux	54
1.2.5.6.1.10	Texture	56
1.2.5.6.1.11	Mise à l'échelle réelle	58
1.2.5.6.1.12	Enregistrement des données	60
1.2.5.6.1.13	Exporter les données (STL, PLY, ...)	61
1.3	APPLICATION CLINIQUE PAR SCANNAGE BELLUS	61
1.3.1	<i>Fonctionnement de la caméra</i>	61
1.3.2	<i>Matériel nécessaire</i>	62
1.3.2.1	Caméra Bellus	62
1.3.2.2	Tablette ou Smartphone	62
1.3.2.3	Aligneur frontal	63
1.3.2.4	Aligneur buccal	63
1.3.3	<i>Méthode et protocole</i>	64
1.3.3.1	Préparation du patient	64
1.3.3.1.1	Positionnement sujet/opérateur	64
1.3.3.1.2	Cheveux et accessoires	65
1.3.3.2	Numérisation	65
1.3.3.2.1	Schéma de capture	65
1.3.3.2.2	De face avec aligneur buccal et frontal en place	66
1.3.3.2.3	De face avec aligneur frontal en place et grand sourire	67
1.3.3.3	Export des données	67
1.3.3.4	Scan de l'aligneur buccal	67
2	CONCEPTION DU SOURIRE	70
2.1	WAX-UP NUMERIQUE, DIFFERENTS LOGICIELS	70
2.1.1	<i>En deux dimensions</i>	71
2.1.2	<i>En trois dimensions (pas de logiciel « prêt-à-l'emploi »)</i>	71
2.2	AVEC EXOCAD	72
2.2.1	<i>Les outils de visualisation utiles dans Exocad</i>	72
2.2.2	<i>Nouveau bon de commande</i>	73
2.2.3	<i>Module « Model creator »</i>	74
2.2.4	<i>Module « CAO »</i>	76
2.2.4.1	Importer les fichiers	76
2.2.4.2	Alignement des scans	78
2.2.4.2.1	Méthode directe	79
2.2.4.2.1.1	Les points de repères d'alignement	81
2.2.4.2.1.1.1	Les repères anatomiques	81
2.2.4.2.1.1.2	Les repères propres	81
2.2.4.2.1.1.3	Les dents	82
2.2.4.2.1.1.4	Zone des yeux	82
2.2.4.2.1.1.5	Zone du nez	82
2.2.4.2.1.1.6	Tiers supérieur de la face	82
2.2.4.2.1.2	Aligner le scan du visage « écarteur » avec empreinte intra-oral des arcades dentaires	83
2.2.4.2.1.3	Aligner le scan du visage « sourire » avec scan du visage « écarteur »	84
2.2.4.2.2	Méthode indirecte (par le biais d'un aligneur)	87
2.2.4.2.2.1	Différents types d'aligneurs	88

2.2.4.2.2.1.1	Du commerce	88
2.2.4.2.2.1.2	Bourrelets d'occlusion pour édenté complet	89
2.2.4.2.2.1.3	Aligneur « fait-maison »	90
2.2.4.2.2.2	Aligner le scan intra-oral avec le scan de l'aligneur	91
2.2.4.2.2.3	Aligner le scan du visage « aligneur buccal et frontal en place » avec le scan de l'aligneur.....	92
2.2.4.2.2.4	Aligner le scan du visage « aligneur buccal et frontal en place » avec le scan du visage « sourire aligneur frontal en place »	93
2.2.5	<i>Wax-up (mock-up virtuel)</i>	95
2.2.5.1	Règles et critères esthétiques	95
2.2.5.1.1	Analyse de face et de profil	95
2.2.5.1.1.1	De face	95
2.2.5.1.1.2	De profil	96
2.2.5.1.2	Analyse dento-labiale.....	98
2.2.5.1.3	Analyse dentaire.....	101
2.2.5.1.4	Analyse gingivale	105
2.2.5.2	En pratique sur Exocad®	107
2.2.5.2.1	Mise en articulateur	107
2.2.5.2.2	Module Smile design.....	109
2.2.5.2.2.1	Import de photographies de face sourire et avec écarteur	110
2.2.5.2.2.2	Choix de la grille de proportion.....	111
2.2.5.2.3	Modelage	112
2.2.5.2.4	Validation du projet	115
3	CHAMP D'APPLICATION	117
3.1	MOCK-UP.....	117
3.1.1	<i>Impression du modèle</i>	117
3.1.2	<i>Réalisation du mock-up</i>	119
3.1.3	<i>Corrections et modifications du mock-up et enregistrement</i>	121
3.2	USINAGE PROTHESE FIXEE	121
3.3	GUIDE DE CHIRURGIE GINGIVALE ET OSSEUSE.....	121
3.3.1	<i>Alignement CBCT</i>	123
3.4	PLANIFICATION IMPLANTAIRE	124
3.5	IMPRESSION DE PROTHESES AMOVIBLES COMPLETES IMMEDIATES	124
	CONCLUSION.....	125
	BIBLIOGRAPHIE	128

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : ARBORESCENCE DES TECHNIQUES D'ACQUISITION.....	16
FIGURE 2 : ARBORESCENCE DES TECHNIQUES DE NUMERISATION SANS CONTACT PAR REFLEXION OPTIQUE.....	18
FIGURE 3 : SCHEMAS REPRESENTATIFS DES DIFFERENTES ETAPES DU PRINCIPE D'ACQUISITION PAR PHOTOGRAMMETRIE	22
FIGURE 4 : RECAPITULATIF DU CHAMPS D'APPLICATION DE LA PHOTOGRAMMETRIE EN CHIRURGIE DE LA FACE SOUS FORME DE TABLEAU. SIGAUX ET AL (24): PHOTOGRAPHIE 3D EN CHIRURGIE DE LA FACE : PRINCIPES, INTERETS ET PERSPECTIVES (2017).....	27
FIGURE 5 : POSITION DE LA CIBLE DE VUE.....	39
FIGURE 6 : PRISE DE CLICHES SUR 3 ETAGES	40
FIGURE 7 : POSITION DE L'OPERATEUR LORS DE LA PRISE DES PHOTOGRAPHIES	40
FIGURE 8 : PHOTOGRAPHIES A 180° AUTOUR DU VISAGE DU PATIENT	41
FIGURE 9 : CADRAGE DU SUJET PHOTOGRAPHIE.....	41
FIGURE 11 : PHOTOGRAPHIE DU PATIENT EN "SOURIRE FORCE"	42
FIGURE 14 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA CREATION D'UN MORCEAU SUR PHOTOSCAN®	46
FIGURE 15 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'AJOUT DE PHOTOGRAPHIES DANS LE MORCEAU SUR PHOTOSCAN®.....	46
FIGURE 16 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ESTIMATION DE LA QUALITE DES PHOTOGRAPHIES	47
FIGURE 17 : SCHEMA ILLUSTRANT LA METHODE D'ALIGNEMENT DES IMAGES PAR LE LOGICIEL	47
FIGURE 19 : CAPTURE D'ECRAN AVANT L'ALIGNEMENT DES PHOTOGRAPHIES.....	48
FIGURE 20 : VISUALISATION DU NUAGE CLAIRSEME.....	49
FIGURE 21 : CAPTURE D'ECRAN DES DIFFERENTS OUTILS PERMETTANT DE DEPLACER, REDIMENSIONNER ET PIVOTER LE VOLUME DE RECONSTRUCTION	49
FIGURE 22 : CAPTURE D'ECRAN DE LA CONSTRUCTION D'UN NUAGE DENSE.....	50
FIGURE 24 : VISUALISATION DU NUAGE DENSE	51
FIGURE 25 : CAPTURE D'ECRAN DE LA CONSTRUCTION D'UN MAILLAGE	52
FIGURE 26 : CAPTURE D'ECRAN DES PARAMETRES DE CONSTRUCTION DU MAILLAGE	52
FIGURE 27 : CAPTURE D'ECRAN POUR LE LISSAGE DU MAILLAGE.....	54
FIGURE 30 : CAPTURE D'ECRAN POUR L'IMPORT DES MASQUES.....	55
FIGURE 32 : CAPTURE DES DIFFERENTS OUTILS DE SELECTION	55
FIGURE 33 : VISUALISATION DU MODELE APRES ALIGNEMENT DES MORCEAUX	56
FIGURE 34 : CAPTURE D'ECRAN DE LA CONSTRUCTION D'UNE TEXTURE	57
FIGURE 35 : CAPTURE D'ECRAN DES PARAMETRES DE CONSTRUCTION D'UNE TEXTURE	57
FIGURE 36 : VISUALISATION DE LA NUMERISATION 3D DU VISAGE DU PATIENT OBTENUE PAR PHOTOGRAMMETRIE VIA LE LOGICIEL PHOTOSCAN PRO DE AGISOFT® EN COMPARAISON D'UNE PHOTOGRAPHIE 2D	58
FIGURE 37 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'AJOUT D'UN REPERE SUR LE MODELE 3D.....	59
FIGURE 38 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA SELECTION DES REPERES ET DE LA CREATION D'UNE BARRE D'ECHELLE.....	59
FIGURE 39 : SCHEMA DES DIFFERENTES ETAPES PERMETTANT LA TRANSFORMATION DU MODELE 3D A LA BONNE ECHELLE	60
FIGURE 40 : CAMERA BELLUS FIXEE SUR UNE TABLETTE (A GAUCHE) ET SUR UN SMARTPHONE (A DROITE)	62
FIGURE 41 : PHOTOGRAPHIE DU PATIENT AVEC L'ALIGNEUR FRONTAL EN PLACE.....	63
FIGURE 42 : PHOTOGRAPHIES DE L'ALIGNEUR BUCCAL	63
FIGURE 43 : PHOTOGRAPHIE DU PATIENT LORS DE L'ACQUISITION 3D DU VISAGE AVEC LA CAMERA BELLUS®.....	64
FIGURE 44 : PHOTOGRAPHIES DU PATIENT REALISANT LES MOUVEMENTS DE LA TETE LORS DE L'ACQUISITION 3D DU VISAGE AVEC LA CAMERA BELLUS®	66
FIGURE 45 : PHOTOGRAPHIE 2D DU PATIENT (A GAUCHE) ET MODELE 3D OBTENU AVEC LA CAMERA BELLUS® (A DROITE)	66
FIGURE 46 : PHOTOGRAPHIE 2D DU PATIENT (A GAUCHE) ET MODELE 3D OBTENU AVEC LA CAMERA BELLUS® (A DROITE)	67
FIGURE 47 : SCANNER IDENTICA HYBRID DE MEDIT®	68
FIGURE 48 : FENETRE PERMETTANT DE VISUALISER OU NON LES OBJETS 3D	72
FIGURE 49 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETABLISSEMENT DU BON DE COMMANDE.....	73
FIGURE 50 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETABLISSEMENT DU BON DE COMMANDE.....	74
FIGURE 51 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA CONFECTION DU MODELE VIRTUEL	74
FIGURE 52 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA CONFECTION DU MODELE VIRTUEL	75
FIGURE 53 : CAPTURE D'ECRAN APRES CONFECTION DU MODELE VIRTUEL	75
FIGURE 54 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'APPLICATION DE LA NOUVELLE FORME DE DENT SUR LE MODELE VIRTUEL	76
FIGURE 55 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'OUVERTURE DE L'ASSISTANT "AJOUTER/SUPPRIMER DES OBJETS" DANS EXOCAD®	77
FIGURE 56 : ASSISTANT "AJOUTER/SUPPRIMER DES OBJETS" DANS EXOCAD®.....	77
FIGURE 57 : PRINCIPE DE LA METHODE DIRECTE POUR L'ALIGNEMENT DES SCANS INTRA- ET EXTRA-ORAL ENTRE EUX	80
FIGURE 58 : CAPTURE D'ECRAN DE L'ASSISTANT « AJOUTER/SUPPRIMER DES OBJETS »	83
FIGURE 59 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETAPE D'ALIGNEMENT DES SCANS INTRA- ET EXTRA-ORAL ENTRE EUX.....	83

FIGURE 60 : CAPTURE D'ECRAN APRES L'ALIGNEMENT DES SCANS INTRA- ET EXTRA-ORAL ENTRE EUX.....	84
FIGURE 61 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETAPE D'ALIGNEMENT DES SCANS EXTRA-ORAL ENTRE EUX.....	85
FIGURE 62 : CAPTURE D'ECRAN DE L'ETAPE DE DECOUPE DE LA ZONE DES DENTS SUR LA NUMERISATION EXTRA-BUCCALE "SOURIRE FORCE".....	85
FIGURE 63 : RESULTAT FINAL APRES ALIGNEMENT DES SCANS.....	86
FIGURE 64 : PRINCIPE DE LA METHODE INDIRECTE POUR L'ALIGNEMENT DES SCANS INTRA- ET EXTRA- ORAL ENTRE EUX.....	87
FIGURE 65 : ALIGNEURS DE LA SOCIETE AFT DENTAL SYSTEM®	89
FIGURE 66 : NUMERISATIONS DU VISAGE, DES EMPREINTES MAXILLAIRES ET MANDIBULAIRES ET DU BOURRELET D'OCCCLUSION AINSI QUE LEURS ALIGNEMENTS (SCHWEIGER ET AL.)	89
FIGURE 67 : ELABORATION DU PROJET PROTHETIQUE EN FONCTION DU VISAGE (SCHWEIGER ET AL.)	90
FIGURE 68 : ALIGNEUR ORAL REALISE PAR LAM ET AL.....	90
FIGURE 69 : ALIGNEUR ORAL	91
FIGURE 70 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETAPE D'ALIGNEMENT DU SCAN DU MAXILLAIRE AVEC CELUI DE L'ALIGNEUR ORAL...	91
FIGURE 71 : RESULTAT APRES ALIGNEMENT DU SCAN MAXILLAIRE AVEC L'ALIGNEUR ORAL.....	92
FIGURE 72 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETAPE D'ALIGNEMENT DU SCAN EXTRA-ORAL AVEC LE SCAN DE L'ALIGNEUR.....	92
FIGURE 73 : RESULTAT APRES ALIGNEMENT DU SCAN DE L'ALIGNEUR ORAL AVEC LE SCAN DU VISAGE.....	93
FIGURE 74 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'ETAPE D'ALIGNEMENT DES SCANS EXTRA-ORAL ENTRE EUX.....	93
FIGURE 76 : PHOTO DE FACE AVEC VISUALISATION DE LA LIGNE SAGITTALE MEDIANE ET DE LA LIGNE BI-PUPILLAIRE.....	96
FIGURE 77 : PHOTO DE FACE AVEC VISUALISATION DES TROIS ETAGE DE LA FACE	96
FIGURE 78 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTS TYPES DE PROFILS.....	96
FIGURE 79 : ILLUSTRATION DE L'ANGLE NASO-LABIAL.....	97
FIGURE 80 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES CATEGORIES DE SOURIRES SELON T'JAN ET AL.....	98
FIGURE 81 : ILLUSTRATION DES DIFFERENTES COURBES DU SOURIRE (T'JAN ET AL.)	99
FIGURE 82 : LES DIFFERENTES FORMES D'ARCADES DENTAIRES ANTERIEURES ET LEURS RELATIONS AVEC LE TEMPERAMENT (PAOLUCCI, CALAMITA, COACHMAN ET AL.)	104
FIGURE 83 : SCHEMA DES DIFFERENTES CATEGORIES DE FORMES DES DENTS (PAOLUCCI, CALAMITA, COACHMAN ET AL.).....	104
FIGURE 84 : LES DIFFERENTES FORMES D'ARCADES (PAOLUCCI, CALAMITA, COACHMAN ET AL.)	104
FIGURE 85 : ILLUSTRATION DE LA HAUTEUR DU ZENITH DE L'INCISIVE LATERALE.....	106
FIGURE 86 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA MISE EN PLACE DU PLAN D'OCCCLUSION (PARALLELE A LA LIGNE BI-PUPILLAIRE) ET DU PLAN SAGITTAL MEDIAN ; VUE DE FACE.....	108
FIGURE 87 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA MISE EN PLACE DU PLAN D'OCCCLUSION (PARALLELE A LA LIGNE BI-PUPILLAIRE) ET DU PLAN SAGITTAL MEDIAN ; VUE DE PROFIL	108
FIGURE 89 : FIN DE LA MISE EN ARTICULATEUR	109
FIGURE 90 : FENETRE DE L'ASSISTANT SMILEDISEIGN.....	110
FIGURE 91 : CAPTURE D'ECRAN DE L'ALIGNEMENT DU SCAN INTRA-ORAL AVEC LA PHOTO 2D.....	110
FIGURE 92 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA MISE EN PLACE DES LIGNES DE REFERENCE	111
FIGURE 93 : CHOIX DU GUIDE DE PROPORTIONS	111
FIGURE 94 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'AJUSTEMENT DE LA GRILLE DE PROPORTIONS SUR L'ARCADE MAXILLAIRE	112
FIGURE 95 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE L'AJUSTEMENT DANS LES TROIS PLANS DE L'ESPACE, DES PATRONS DE FORMES DENTAIRES A L'ARCADE MAXILLAIRE.....	113
FIGURE 96 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA MODELISATION	113
FIGURE 97 : FENETRE D'ASSISTANT MODELAGE	114
FIGURE 98 : PROJET ESTHETIQUE FINAL EN TROIS DIMENSIONS (A GAUCHE) ET VUE OCCLUSALE DU WAX UP NUMERIQUE (A DROITE).....	114
FIGURE 99 : WAX UP NUMERIQUE AVANT IMPRESSION	118
FIGURE 100 : PREPARATION DU MODELE SUR PREFORM®	118
FIGURE 101 : MODELE PHYSIQUE IMPRIME PAR STEREOLITHOGRAPHIE.....	119
FIGURE 102 : CLE EN SILICONE POUR LA REALISATION DU MOCK-UP.....	119
FIGURE 103 : PHOTOGRAPHIE DU PATIENT DE FACE AVANT ET APRES LA MISE EN PLACE DU MOCK-UP.....	120
FIGURE 104 : PHOTOGRAPHIE INTRA-ORALE DU MOCK-UP EN VUE FRONTALE.....	120
FIGURE 105 : CAPTURE D'ECRAN LORS DE LA REALISATION D'UN GUIDE DE CHIRURGIE GINGIVALE	122
FIGURE 106 : PHOTOGRAPHIE D'UNE GINGIVECTOMIE AIDEE D'UN GUIDE CHIRURGICAL.....	122
FIGURE 107 : REALISATION D'UN GUIDE DE CHIRURGIE OSSEUSE ET GINGIVAL (LIU ET AL.)	123

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : COMPARAISON DES REPERES D'ALIGNEMENT ENTRE LES SCANS EN METHODE DIRECTE VS INDIRECTE.....	78
TABLEAU 2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES METHODES DIRECTE ET INDIRECTE PAR SCANNAGE OU PAR PHOTOGRAMMETRIE.....	79
TABLEAU 3 : CLASSIFICATION DE LA VISIBILITE DU SOURIRE SELON LIEBART ET COLLABORATEURS.....	98

A l'ère de la pleine expansion du numérique, nous avançons toujours plus rapidement vers un monde virtuel et l'univers de la dentisterie n'y échappe pas. Conjointement à l'évolution de la dentisterie numérique, apparaît une multitude de nouveaux outils nous ouvrant les portes de ce monde virtuel : une meilleure communication, des outils diagnostiques plus détaillés et efficaces, des travaux plus précis et plus prévisibles en sont les avantages. Ces nouveaux outils se révèlent intéressants dans le cadre des soins esthétiques.

La demande de soins esthétiques étant prépondérante dans les cabinets dentaires, la planification du projet prothétique est alors essentielle dans certains cas de restaurations antérieures complexes. Avant de commencer un traitement prothétique incluant le secteur esthétique antéro-maxillaire, il peut être judicieux de pré visualiser le résultat escompté.

Dans nos cabinets, depuis quelques années, la photographie a permis de développer la planification d'un projet esthétique en deux dimensions. Grâce à des outils numériques apportés par certains logiciels, les traits du visage permettent d'élaborer un projet esthétique idéal et harmonieux (sans oublier que cette notion d'idéal est propre à chacun d'entre nous). Les méthodes de pré visualisation en deux dimensions (« smile design ») sont désormais bien répandues et permettent une meilleure communication avec le prothésiste et le patient. Cette technique en deux dimensions présente toutefois des limites comme les problèmes de parallaxe, mais aussi la contrainte d'interrompre une succession de tâches exclusivement numériques. Grâce aux dernières techniques d'acquisition, la réalisation d'un projet en trois dimensions ouvre une nouvelle perspective pour les praticiens. Elle permet de répondre à bon nombre des problèmes identifiés avec la planification en deux dimensions.

La problématique qui se pose et à laquelle nous tenterons de répondre dans cette thèse est la suivante : *Quels sont les outils permettant la planification numérique tridimensionnelle du projet prothétique et comment les mettre en oeuvre?*

Les scanners tridimensionnels permettent de numériser le monde réel afin de le modifier, l'étudier, le travailler dans le monde virtuel. Ils rendent possible l'acquisition

des arcades dentaires des structures tissulaires comme la peau et les os, et nous permettent de réaliser un scan facial du patient, de l'intégrer aux logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) afin de planifier le projet prothétique en trois dimensions.

Cette acquisition numérique tridimensionnelle de la face peut se faire selon différentes méthodes.

Dans une première partie, nous traiterons des différentes techniques d'acquisition, de leurs avantages et inconvénients, ainsi que de leur mode de reconstruction 3D. Ces techniques permettent d'aboutir à un « objet numérique » (objet de synthèse en trois dimensions) pouvant être exporté sous différents formats (STL, OBJ,...) sur les logiciels dits « ouverts » de CAO à usage dentaire. Nous aborderons exclusivement l'acquisition selon deux méthodes différentes : la photographie (photogrammétrie) et le scanner 3D.

La numérisation 3D effectuée en première partie sera ensuite travaillée dans le logiciel CAO pour la conception du sourire. La seconde partie se consacrera à cette étape de modelage du sourire selon les critères esthétiques. A travers ces logiciels de CAO, les outils numériques de modélisation, de visualisation et les guides de conceptions sont les autres instruments élémentaires de la planification numérique du projet prothétique. Cette étape de modélisation vise à obtenir ce qu'on pourrait appeler un « mock-up numérique ».

La troisième partie présentera enfin les différentes exploitations cliniques possibles de ce mock-up numérique: réalisation d'un mock-up, usinage de prothèse fixée, planification implantaire ou encore guide de chirurgie osseuse et/ou gingivale.

1 Acquisition

Cette première partie traite de l'acquisition du visage et des arcades maxillaire et mandibulaire. Si l'empreinte numérique des arcades dentaires en dentisterie est en pleine expansion, de nombreux scanners intra-oraux sont désormais disponibles sur le marché. L'acquisition du visage, en revanche, n'est pas encore fréquente dans les cabinets dentaires ; il convient donc de présenter l'ensemble des possibilités de scan, leurs avantages et leurs inconvénients quant à la numérisation d'une telle surface. Le visage humain comporte en effet certaines caractéristiques physiques à prendre en compte, comme la vulnérabilité aux rayons, les mouvements entraînant des erreurs d'acquisition, la patience du sujet ou encore la pénibilité du processus. La faisabilité au cabinet dentaire est le deuxième prérequis du scannage facial, car bon nombre de processus, pour des raisons de coût, de temps, de technique ou d'espace disponible, ne seront pas traités dans ce document.

1.1 Différentes méthodes de scannage tridimensionnel

Un scanner tridimensionnel est un appareil permettant d'analyser un objet, sa forme et éventuellement son apparence (couleur et texture). Il permettra ainsi d'avoir une numérisation de l'objet en trois dimensions, pouvant être lue par différents logiciels. Le format du fichier est le plus souvent en STL, OBJ ou encore PLY. Ces fichiers servent dans de nombreux domaines, comme l'industrie du bâtiment et l'ingénierie civile, le divertissement (films et jeux vidéo), la retro-ingénierie, l'assurance qualité, le patrimoine culturel, l'anthropologie et bien entendu la santé.

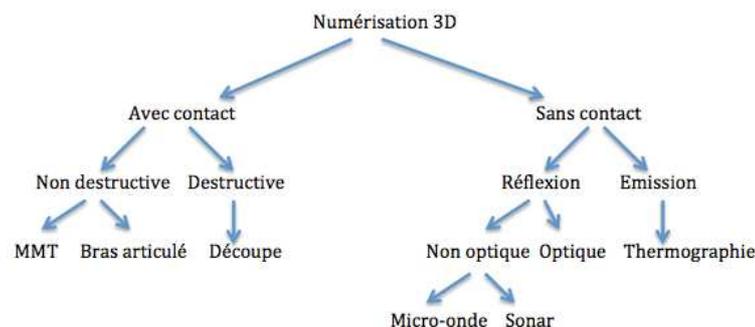


Figure 1 : Arborescence des techniques d'acquisition

1.1.1 Avec contact

La numérisation avec contact est une technique qui récupère des informations en sondant l'objet grâce à un contact physique. Il faut distinguer les méthodes destructives qui découpent l'objet pour obtenir les informations sur sa forme tridimensionnelle de l'objet, des méthodes non-destructives qui sondent l'objet grâce à un bras articulé (palpeur) qui, récupère point par point, les informations de positionnement dans l'espace sur la surface de l'objet. Le capteur situé au bout du bras articulé fournit une information jusqu'à l'ordre du micron sur la position x, y et z dans l'espace, et le rassemblement de tous les points permet d'obtenir une numérisation précise de l'objet. Ce sont des techniques destinées à l'industrie comme outil de métrologie.

La technique de numérisation par contact ne nous intéresse pas car destructive ou beaucoup trop lente pour scanner un visage humain déformable et non immobile.

1.1.2 Sans contact

Dans la famille de la numérisation sans contact il y a les techniques par émission et celles par réflexion. La thermographie est une méthode qui interprète les ondes thermiques infrarouges émises pour obtenir un thermogramme. Cette technique est utilisée le plus fréquemment pour localiser les déperditions de chaleur d'un bâtiment. Cette technique ne permet pas d'obtenir un modèle de travail texturé, elle ne nous intéresse donc pas.

Les techniques d'acquisition par réflexion utilisent la réflexion des ondes optiques ou non-optiques (micro-onde ou sonar) sur la surface des objets eux-mêmes. Il faut alors distinguer deux classes : les scanners sans contact actif et passif. Les méthodes passives permettent de récupérer les informations sur la forme de l'objet sans assistance d'une source lumineuse. Les méthodes actives nécessitent quant à elles la projection d'une source lumineuse sur la surface de l'objet afin de le numériser.

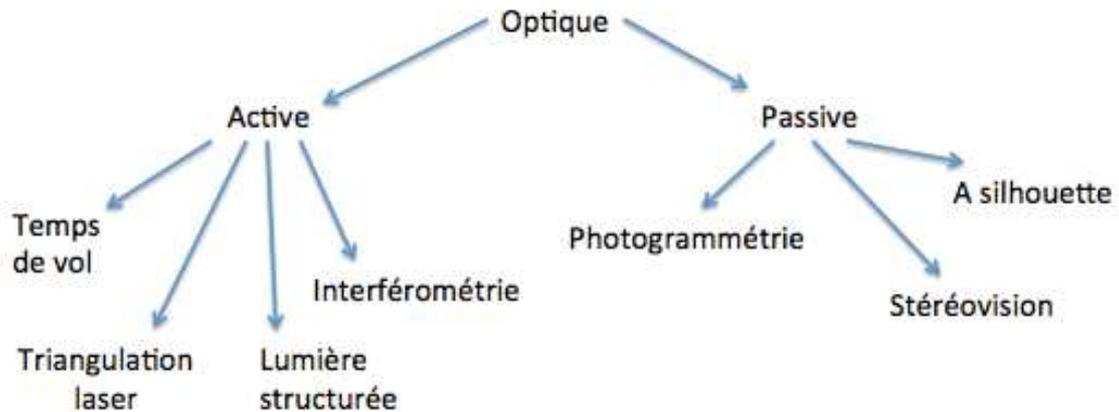


Figure 2 : Arborescence des techniques de numérisation sans contact par réflexion optique

1.1.2.1 Scanner sans contact actif

Ces techniques de scannage nécessitent l'émission d'un rayonnement (lumière, laser, Rayon x ou encore ultrason) qui sera réfléchi par l'objet. Des capteurs permettent de recueillir les ondes réfléchies.

1.1.2.1.1 Par temps de vol

La technique de scannage par temps de vol utilise un rayon laser émis et réfléchi par l'objet. En connaissant la vitesse de la lumière, le temps mis entre l'émission et la réception du rayon émis, il peut être facile de calculer la distance séparant l'appareil de l'objet pour un point donné. La précision de ce type de technique dépend de la précision de la mesure du temps d'aller-retour du faisceau laser.

1.1.2.1.2 Par triangulation laser

Les scanners fonctionnant par triangulation s'appuient sur un calcul de trigonométrie. Un faisceau laser rectiligne émis se verra déformé au contact de l'objet. Grâce à une caméra qui réceptionne le rayon réfléchi et déformé, le scanner détermine la position de l'objet dans l'espace. Par calcul du temps de vol du faisceau, il détermine la distance entre la source laser, l'objet et la caméra. Avec cette distance, l'angle formé entre la

caméra et le faisceau laser, le scanner détermine, par des calculs de trigonométrie, les coordonnées spatiales de la surface de l'objet. Cette technique se caractérise par une haute précision, mais nécessite une longue durée d'acquisition (le temps du balayage) de la surface à numériser. La durée d'acquisition et la nocivité des lasers pour les yeux empêchent l'utilisation de cette technique pour un scan du visage.

1.1.2.1.3 À lumière structurée

Tout comme les scanners 3D par triangulation laser, les méthodes d'acquisition à lumière structurée s'appuient sur un calcul de trigonométrie. En revanche le scanner projette ici une grille de lumière ou un motif lumineux (blanche ou bleu en générale) et non pas un rayonnement laser. Grâce à un vidéo projecteur ou une source de lumière LED, l'appareil projette un certain motif (grille, vagues, points régulièrement espacés) sur la surface à scanner. Un capteur décalé par rapport à la source de lumière perçoit la déformation de motif sur l'objet. En calculant la déformation du motif, le scanner 3D peut en déduire les propriétés de surfaces. L'avantage de cette technique est sa rapidité d'exécution, car le balayage n'est pas nécessaire. L'acquisition se fait sur toute une surface. Cette rapidité d'exécution est un atout majeur pour la numérisation d'individus, car elle élimine le problème de la non immobilité du sujet lors de l'acquisition. Cette technique offre également une bonne résolution. Les scanner à lumière structurée sont cependant des outils de numérisation relativement chers (ex : scanner ARTEC® 12000-25000 €).

1.1.2.1.4 Interférométrie et Moiré

Le principe de l'interférométrie exploite la différence de chemin optique entre deux ondes lumineuses pour caractériser la profondeur 3D. Une source lumineuse (en général un laser) projette une onde qui traverse un séparateur de faisceau (miroir semi argentique) qui permet comme son nom l'indique de diviser la lumière en deux faisceaux identiques gardant la même longueur d'onde. Chaque faisceau se déplace sur un chemin d'onde différent avant de se recombier et d'arriver sur le détecteur.

En fonction du chemin d'onde parcouru, les faisceaux une fois recombienés seront soit constructifs s'ils arrivent en phase, soit destructifs s'ils sont déphasés (différence de

chemin d'onde de $n\lambda/2$). Grâce à cette différence de phase, un diagramme d'intensité est obtenu, et il permet au scanner d'en déduire les informations géométriques.

La technique de Moiré consiste à projeter une lumière à travers deux grilles superposées légèrement décalées. Cela génère des franges de Moiré qui permettent de mesurer les informations 3D.

Cette technique est largement utilisée dans l'industrie pour les contrôles de production car elle offre une excellente précision.

1.1.2.2 Scanner sans contact passif

Les scanners sans contact passif n'émettent aucun type de rayonnement et se basent sur la détection de rayonnement ambiant réfléchi. C'est la lumière visible qui sera détectée par ces scanners dans la plupart des cas, car cette lumière est directement disponible.

1.1.2.2.1 Photogrammétrie

La photogrammétrie utilise des photographies afin de restituer la géométrie d'un objet ou d'un espace. C'est une technique flexible et peu coûteuse par rapport aux autres méthodes d'acquisition décrites précédemment. En plus des informations de surface de l'objet scanné (géométrie), la photogrammétrie fournit également des informations colorimétriques (texture).

Le polytechnicien Aimé Laussedat a mis au point et utilisé pour la première fois cette technique en 1849 sur la façade des Invalides. Depuis, elle a été révolutionnée par les récents progrès de l'informatique (évolution, amélioration de la qualité des équipements, réduction des coûts) et permet à quiconque disposant d'un ordinateur et d'un appareil photo de numériser un objet.

C'est une technique très flexible car elle permet de numériser aussi bien de petits objets que des surfaces plus volumineuses, ce qui lui donne un champ d'application très vaste : topographie, cartographie, archéologie, sauvegarde du patrimoine (programme national de numérisation du ministère de la culture), l'industrie, les relevés des mouvements et des transformations, l'art et l'industrie du cinéma et des jeux vidéo, la météorologie, la médecine, et dans notre cas, la dentisterie.

1.2 Application clinique par photogrammétrie

1.2.1 Concept et principe (Définition)

- ✓ *Définition Larousse : Ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions, la position dans l'espace d'un objet à partir de photographies.*

- ✓ *Définition Encyclopædia Universalis : On groupe sous le nom de photogrammétrie l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet (au sens le plus large du terme) à partir de perspectives de cet objet enregistrées photographiquement.*

L'étymologie de la photogrammétrie vient du latin *photo* (lumière), *gramma* (enregistrement), et *metreo* (mesure). Cela signifie l'enregistrement et la mesure avec l'utilisation de la lumière. Cette technique a pour but d'obtenir un objet numérique en trois dimensions à partir de photos ou vidéos d'un objet physique. Lorsque la photogrammétrie est utilisée comme système de mesure, elle porte le nom de stéréophotogrammétrie.

Le principe de la photogrammétrie est de prendre, simultanément ou non, plusieurs photographies distinctes d'un même objet, de localiser manuellement ou automatiquement des points communs sur chaque photographie prise d'un angle différent. Le logiciel prend chaque pixel en commun entre les images et leur donner une position dans l'espace les uns par rapport aux autres. En analysant les positions relatives de ces pixels sur l'ensemble des photos de la scène, l'algorithme du logiciel permet d'en déduire les positions dans l'espace sous forme de coordonnées x,y et z.

Quatre phases composent le processus de photogrammétrie :

1. enregistrement photographique des perspectives et reconstitution des faisceaux perspectifs
2. définition de la position des deux faisceaux dans un système de référence donné (orientation relative ou absolue)
3. identification des couples de rayons homologues et recherche de la surface
4. lieu géométrique des points d'intersection de tous les couples de rayons homologues, suivi de mesures sur cette surface

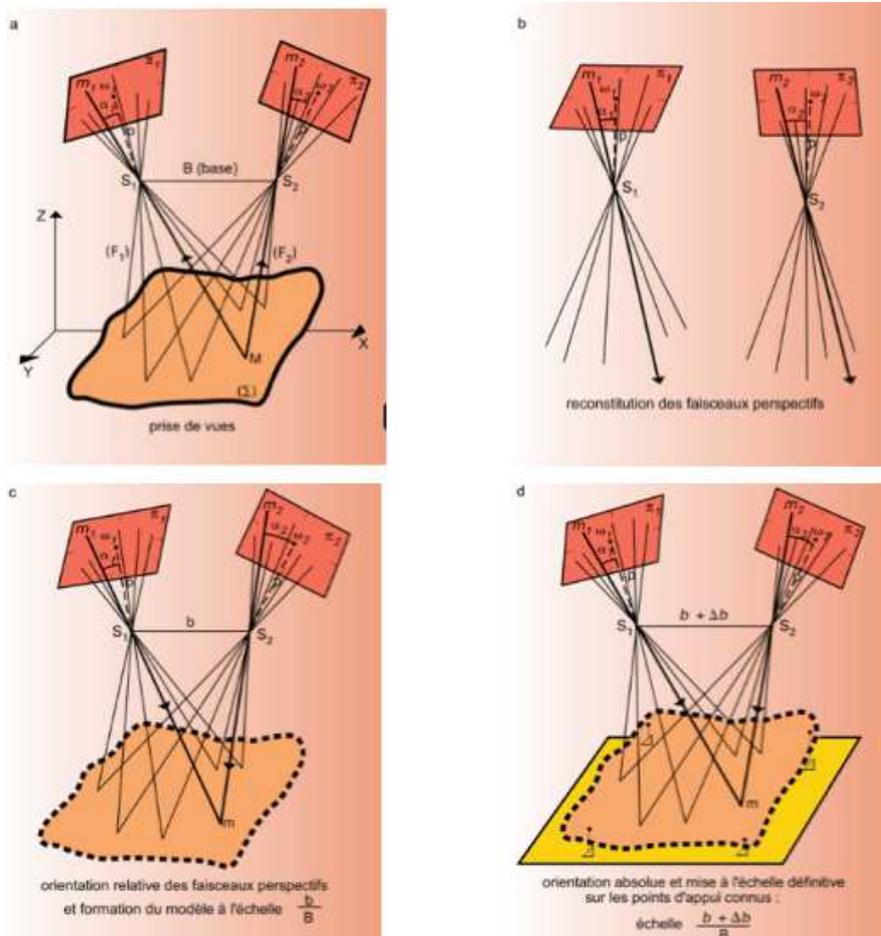


Figure 3 : Schémas représentatifs des différentes étapes du principe d'acquisition par photogrammétrie

L'orientation des points dans l'espace est une étape clé aussi appelée orientation externe, en symétrie de l'orientation interne qui consiste à déterminer les paramètres de calibration de la caméra (focale, centre principal d'autocollimation, polynôme de distorsion, centre principal de symétrie,..). De simples équations de colinéarité, permettent de déterminer l'orientation externe. Les données comme les coordonnées images des points ou la calibration de la caméra sont connues (données EXIF) ou

déterminées et, avec un minimum de 5 points, permettent d'en déterminer l'orientation externe.

En connaissant la calibration et la position de la caméra, il est possible de déterminer la droite sur laquelle se trouve le point. Le croisement de cette droite avec les autres droites du même point sur les autres photos permet de définir la profondeur de ce point. Un coefficient de corrélation est calculé pour déterminer l'endroit dans l'espace où il est le plus probable que le point se trouve.

De nombreux calculs complexes sont mis en jeu dans la photogrammétrie (détection et appariement des points homologues, triangulation, autocalibration, calcul épipolaire) et il en résulte un nuage de points dont la densité sera fonction des paramètres, de la qualité et des conditions dans lesquelles les photographies sont réalisées.

Des algorithmes de traitement d'images sont employés dans les logiciels de photogrammétrie, et la méthode la plus fiable et la plus connue à l'heure actuelle est la méthode SIFT de Lowe, 2004 (*Scale Invariant Feature Transform*). Cette méthode permet d'obtenir énormément de points d'intérêts et est peu sensible aux variations locales, à l'orientation ou au changement d'échelle.

Le travail se fait soit dans un référentiel connu grâce à des points d'appuis que l'on fournit au programme, ce qui nous permet de réaliser l'orientation absolue, soit dans un espace euclidien (orientation relative) permettant de mettre par la suite l'objet à la bonne échelle.

➤ Avantages

Les avantages de la photogrammétrie sont multiples :

- Coût faible comparé à un scanner du commerce prévu à cet effet pour une même qualité de rendu.
- Flexibilité : La photogrammétrie permet de numériser des objets de tailles très variables, allant de petits objets à de grandes surfaces (carte IGN)
- Non ionisant
- Numérisation permettant également de générer une texture de très bonne qualité.
- Portabilité (appareil photo facilement transportable)
- Données facilement transférées, compressées ou encodées.
- Numérisation sans contact

➤ Inconvénients

- Numérisation difficile des surfaces brillantes. Il est possible de poudrer les dents avant de réaliser une numérisation (1).
- Gestion de l'éclairage et de l'environnement
- La surface à scanner doit avoir une texture
- Temps de traitement des données pour générer un modèle 3D très chronophage. Il faut une bonne gestion du temps de travail.
- Certains logiciels notamment les plus complets requièrent une connaissance et une bonne maîtrise.
- Qualité du rendu 3D conditionnée par le sujet (capacité à rester immobile, région pilleuse)
- Mise à l'échelle nécessaire

1.2.2 Logiciel de photogrammétrie

La photogrammétrie connaît une expansion en parallèle des logiciels qui utilisent cette méthode.

Il existe une dizaine de logiciels de photogrammétrie qui nous permettent d'obtenir l'objet en trois dimensions : Photoscan®, Reality Capture®, Recap photo®, Micmac®, vsfm®. Certains sont gratuits, en open source, mais les logiciels les plus complets s'avèrent être payants.

Dans cet ouvrage c'est le logiciel Photoscan professionnel de Agisoft® qui est utilisé. Comme tous les logiciels professionnels, ils nécessitent un temps de prise en main pouvant parfois être long sans formation préalable. D'autres logiciels comme Recap photo de Autodesk® nous permettent également d'obtenir des objets numériques par photogrammétrie mais de manière beaucoup plus simple. Pour Recap photo, il suffit en effet d'importer les photos sur le logiciel qui n'est en fait qu'une surface permettant d'envoyer les photographies sur un serveur. A partir de là, les photos sont traitées sur des ordinateurs propres d'Autodesk. L'objet obtenu par photogrammétrie est ensuite transféré sur le logiciel Recap Photo® qui permet à l'utilisateur de récupérer l'objet sous format numérique. L'avantage de ce logiciel réside dans la facilité d'utilisation mais il comporte également des inconvénients : aucun paramétrage n'est possible, une

connexion internet est nécessaire et la question de la protection des données médicales se pose.

Le coût est également à prendre en compte, souvent très onéreux pour les logiciels les plus complets.

1.2.2.1 Précision des logiciels

Probst et al. ont réalisé une comparaison des logiciels de photogrammétrie les plus connus(2). Ils ont pris comme modèle un arbre qui est considéré comme l'un des objets des plus compliqués à reconstruire en trois dimensions. Sur des critères complexes mais représentatifs, ils constatent que le rendu de Photoscan en qualité « haute » et « moyenne » est plus intéressant que ceux des logiciels concurrents, mais l'est moins en qualité « ultra-haute » et « la plus basse ».

1.2.3 Précision d'acquisition et validation clinique de la photogrammétrie

1.2.3.1 Photogrammétrie multi-caméra (système commercialisé : Di3D, 3Dmd, ...)

La précision et la fiabilité de la mesure 3D des tissus mous du visage par photogrammétrie ont été évaluées sur des groupes de patients par Swennen et al (3). En comparant la photogrammétrie aux données acquises grâce à l'imagerie volumétrique par faisceau conique (Cone-Beam ou CBCT) les auteurs ont montré une grande précision et fiabilité de numérisations des tissus mous.

Ghoddousi et al. (4) ont conclu à une fiabilité et précision suffisantes pour une exploitation clinique des mesures obtenues par photogrammétrie.

Deli et al. (5) et Galantucci (6) et al ont également démontré et validé la précision des acquisitions effectuées par des systèmes de photogrammétrie.

Les dispositifs étudiés présentent une précision inférieure à 0,5 mm, et leur reproductibilité est infra-millimétrique.

1.2.3.2 Photogrammétrie mono-caméra

La précision et la fiabilité des systèmes de photogrammétrie multi-caméra par rapport aux autres méthodes d'obtention de modèle 3D (IRM, CBCT, laser) ont été démontrées. Cependant cette technologie nécessite des investissements importants dans l'infrastructure, le matériel et des logiciels pour la pratique clinique (7)

Certains auteurs ont donc utilisé des procédés peu coûteux pour la réalisation de modèles 3D par photogrammétrie avec des techniques mono-caméras. Koban et al. ont montré qu'il n'y avait pas de différence significative avec un minimum de neuf photographies en photogrammétrie mono-caméra comparé au système multi-caméra de Vectra® (8,9).

Salazar-Gamarra et al. (10) ont développé un protocole pour l'acquisition mono-caméra photogrammétrique du visage afin de réaliser une prothèse maxillo-faciale.

1.2.4 Application dans d'autres domaines

Les applications de la photogrammétrie sont aussi diverses que variées.

1.2.4.1 Médical

Les enregistrements sont importants non seulement pour le diagnostic, mais aussi pour la planification du traitement, l'évaluation du progrès de celui-ci, et ses résultats (notamment pour comparer différentes interventions chirurgicales pour une même pathologie). L'acquisition faite par impression manuelle grâce à des silicones induit une déformation importante par compression des tissus mous surtout au niveau du tiers inférieur de la tête (11,12).

Il a donc fallu trouver une méthode précise d'acquisition. L'utilisation d'un balayage scanner apporte une bonne précision de scannage (13,14) mais elle nécessite que le patient ferme les yeux, ce qui peut interférer sur l'expression naturelle du visage.

L'une des méthodes d'acquisition des données de surface et la modélisation 3D est la photogrammétrie qui a été utilisée en science médicale depuis 1951 (15,16).

En médecine, la photogrammétrie a gagné en popularité en tant que méthode répétable de reproduction des structures du corps humain, pour la planification, le suivi et le résultat d'un traitement thérapeutique (17).

De nos jours, c'est en chirurgie orthopédique que cette méthode est la plus souvent utilisée (18,19), mais également en ophtalmologie (20,21) ou encore en dermatologie (22,23) où le suivi photogrammétrique est particulièrement adapté aux pathologies cutanées.

Applications	Exemples
<i>Sémiologie (élément objectif du dossier médical)</i>	Cartographie de brûlures
<i>Pédagogie</i>	Techniques chirurgicales
<i>Information du patient</i>	Rhinoplastie
<i>Analyse</i>	
Suivi de pathologie	Lésions cutanées (carcinologie, plaies, cicatrices pathologiques)
Évaluation de l'efficacité d'un traitement	Greffe adipocytaire, anomalies vasculaires, pathologie crânienne, rhinoplastie, réanimation faciale, chirurgie orthognathique, médecine esthétique
<i>Guide chirurgical</i>	Otopoièse par <i>mirroring</i>

Figure 4 : Récapitulatif du champs d'application de la photogrammétrie en chirurgie de la face sous forme de tableau. Sigaux et al (24): Photographie 3D en chirurgie de la face : principes, intérêts et perspectives (2017).

C'est enfin en dentisterie que l'on retrouve également cette méthode. Motta et al. (25) étudient la relation entre posture de la tête et bruxisme infantile.

La photogrammétrie trouve de nombreuses applications en orthodontie, en chirurgie maxillo-faciale et orthognathique (26–28).

1.2.4.2 Archéologie

Les sites archéologiques peuvent présenter une complexité structurelle considérable. Les documenter avec précision en trois dimensions est un défi technologique qui doit être traité non seulement pour produire des ensembles de données scientifiques plus riches, mais également parce que l'archéologie, à l'ère des médias, doit fournir des présentations de son travail au grand public (29–31).

1.2.4.3 Patrimoine

La 3D est un outil pratique lorsqu'il s'agit de visualiser, présenter, communiquer des données. Mais elle l'est également pour sauvegarder l'image d'objets susceptibles de disparaître. C'est particulièrement le cas du patrimoine ; Afin de conserver une trace de notre beau patrimoine subissant les effets du temps, le ministère de la culture en France a mis en place une cellule de photogrammétrie (32).

1.2.4.4 Divertissement (Fifa, cinéma)

De nos jours la photogrammétrie est largement utilisée dans les jeux-vidéo (33), que ce soit pour numériser un joueur de football comme dans le célèbre jeu FIFA®, ou pour numériser en bonne qualité des décors de grande envergure comme dans le jeu « Star Wars : Battlefront » (34), ceci permet de donner une sensation très immersive aux joueurs. Cela offre un gain de temps et d'argent considérable aux développeurs de jeux-vidéo (le temps passé à numériser est notablement moindre que celui passé à modéliser un objet ou décor de qualité équivalente).

Enfin, il en est de même pour les films de science fiction (« Matrix » par exemple) ou d'animation qui utilisent de plus en plus de décors tirés de la photogrammétrie.

1.2.4.5 Topographie cartographie

C'est le domaine historique de la photogrammétrie. Après avoir effectué le premier relevé photogrammétrique sur la façade de l'Hôtel des Invalides, le « père fondateur de la photogrammétrie » Aimé Laussedat, s'est servi de cette nouvelle science pour faire ses relevés sur des espaces de plus en plus grands. Il commence ainsi à utiliser la photogrammétrie pour cartographier le plan exact d'un village à partir de quatre photos terrestres. Il utilisera ensuite des ballons pour prendre des clichés aériens et cartographier de plus grands espaces. De nos jours, les cartes IGN sont élaborées selon ce même procédé. (35)

1.2.4.6 Criminologie

La photogrammétrie trouve également son application en médecine légale. Buck et al. (36) présentent comment la numérisation et en particulier la photogrammétrie permettent d'élucider certains cas. La précision et la qualité de texture qu'apporte cette technique permettent de révéler certains indices (37) (tâches de sang, hématomes ou morsures par exemple) et les sauvegarder pour les étudier ultérieurement.

1.2.4.7 Milieu industriel

L'utilisation de la photogrammétrie s'est sensiblement développée dans le milieu industriel. Grâce à un investissement financier moindre que pour les autres techniques de numérisation, ainsi qu'à sa précision de mesure, cette technique s'est faite une place très importante dans le milieu industriel.

Thomas Luhmann (38) résume dans son article les développements récents et les applications de la photogrammétrie numérique pour la mesure industrielle.

Dans tous les domaines, la photogrammétrie offre donc une possibilité de numériser des objets de tailles variables, à faible coût (en comparaison aux autres méthodes) sans émission de rayonnements ionisants, de manière non destructive, et ce, à de multiples fins.

1.2.5 Méthode et protocole

Cette partie traite du protocole à mettre en œuvre afin de réaliser l'acquisition du visage par photogrammétrie. En fonction de la méthode d'alignement des scans (Cf partie 2.2.4.2), des aligneurs en place lors de la prise des photographies sont utilisés ou non. C'est la méthode directe qui est décrite dans cette partie, la méthode indirecte étant traitée et mise en application dans la partie de l'acquisition grâce à la caméra Bellus (Cf partie 1.3).

1.2.5.1 Matériel

L'un des avantages essentiels de la photogrammétrie réside dans sa facilité d'accès. Un bon appareil photo ainsi qu'un bon ordinateur suffisent à réaliser un scan du visage qui soit exploitable.

1.2.5.1.1 Choix de l'appareil

L'appareil photo occupe depuis plusieurs années une place importante dans nos cabinets dentaires. Cet outil de diagnostic et de communication nous offre sans cesse de nouvelles applications, notamment pour la photogrammétrie.

1.2.5.1.1.1 Boîtier

Le principe de photogrammétrie fonctionne avec n'importe quel appareil photo numérique (du smartphone jusqu'au Reflex). Au regard des principes de la photogrammétrie, il va de soi que plus la qualité de l'appareil photo est bonne, meilleur en sera le rendu de la numérisation. Une résolution minimum de 14 Mpixels est donc nécessaire pour réaliser le processus décrit dans cet ouvrage (notamment si l'alignement entre le scan du visage et de celui des dents se fait directement sans transfert).

Certains réglages sont également nécessaires pour obtenir une numérisation de bonne qualité (Cf partie 1.2.5.1.1.5). De ce fait, le choix du boîtier permettant ces réglages s'oriente vers des catégories type reflex, hybride ou encore compact expert.

Les essais de cet ouvrages sont réalisés avec le boîtier suivant : Nikon D5500.

1.2.5.1.1.2 Capteur

La qualité d'image est primordiale pour la photogrammétrie. Il existe différentes technologies de capteurs (CMOS, APS-C, APS-H, foveon,...) qui ont chacune leurs lots d'avantages et d'inconvénients. Les capteurs « Full Frame » présentent des performances très intéressantes pour la photogrammétrie car la qualité d'image s'en trouve augmentée mais ils obligent à un temps de traitement plus long ainsi qu'une surcharge de données. Les petits capteurs (smartphones, tablettes et compacts grand public) sont déconseillés par soucis de qualité d'image et en raison de la non-paramétrabilité des prises de vues (mode manuel et réglages d'enregistrement non systématiquement disponibles).

Les essais de cet ouvrage sont réalisés avec le capteur suivant: CMOS 24.2 Mpx, APS-C (x1,5) , 6.5 Mpx/cm

1.2.5.1.1.3 Objectif

Le choix de l'objectif en photogrammétrie est fonction de l'objet à scanner. Si cela est possible, il faut cependant s'orienter systématiquement vers un objectif à focale fixe. Pour l'acquisition du visage, un objectif permettant de faire de la macrophotographie et des photos portrait est préférable. En cas d'utilisation du zoom, il est conseillé d'utiliser la butée (minimale ou maximale) de l'objectif pour garder la même focale tout au long de la numérisation.

Il est recommandé d'utiliser un pare-soleil sur l'objectif notamment lors des clichés en extérieur car il fournit un bonus de contrastes non négligeable.

Les essais de cet ouvrage sont réalisés avec l'objectif suivant : AF-S Micro Nikkor 60mm f/2.8G ED

1.2.5.1.1.4 Entretien du capteur et de l'objectif

Il est primordial de n'avoir aucune poussière ou saleté sur le capteur ou l'objectif car celles-ci peuvent nuire aux étapes d'alignement des photos et de construction d'un nuage dense. Pour vérifier l'absence de nuisibles, il suffit de faire la mise au point à l'infini et de photographier une surface blanche à 10 cm. En cas de présence de poussières, il faut se référer au mode d'emploi du boîtier pour le nettoyer.

1.2.5.1.1.5 Réglage de l'appareil

Différents réglages ont été mis à l'épreuve. Le caractère non immobile du sujet scanné, et la pénibilité pour le patient impliquent que la prise de cliché se fasse rapidement avec le meilleur rendu possible en fonction de la rapidité d'acquisition.

➤ Mode « manuel »

Les réglages qui sont mis en place en manuel s'appliquent de manière générale pour tous les appareils lors de la réalisation de photographies pour la photogrammétrie. Mais dans certaines conditions d'éclairage ou conditions propres au sujet photographié, il est nécessaire de faire varier ces réglages.

1. Balance des blancs : sélectionnez le mode qui correspond à l'ambiance lumineuse. Attention à ne pas faire varier ce mode entre deux prises de vues, notamment en position balance des blancs automatique.
2. Sensibilité ISO : L'ISO est l'unité de mesure qui permet de quantifier la sensibilité à la lumière du capteur. Il convient de toujours choisir l'ISO le plus bas en fonction de

la luminosité. Les bonnes conditions d'éclairage permettent la prise de photographies entre 100 et 400 ISO. Il faut veiller à ne jamais dépasser 800 ISO. Pour choisir la valeur ISO il faut faire un test avant la prise des photos en commençant sur ISO100. Si la prise de vue est surexposée, il s'agit d'augmenter progressivement cette valeur jusqu'à atteindre un rendu correct.

3. Ouverture diaphragme : Elle détermine la quantité de lumière qui va entrer dans l'objectif mais fera également varier la profondeur de champ. Cette dernière variable est très importante. En effet, il faut régler l'ouverture de manière à ce que ne soit nette que la tête du patient et ainsi l'isoler de l'environnement (qui sera flou et ne pourra pas être reconstruit dans le logiciel de photogrammétrie). Les temps de traitement s'en verront ainsi réduits.
4. Vitesse d'ouverture : Les clichés se réalisant à main levée sur un visage qui n'est pas parfaitement immobile; ils doivent être réalisés avec une vitesse d'ouverture suffisamment rapide pour palier aux mouvements de l'opérateur lorsqu'il tient l'appareil photographique sous les différents angles de prise de vue. La vitesse ne doit pas être plus lente que $1/f$ seconde (avec f la focale utilisée). Avec l'objectif utilisé dans cette thèse, la vitesse ne doit pas excéder $1/60$ secondes.
5. Enregistrement des fichiers : L'enregistrement peut se faire en RAW ou JPG à sa qualité maximale. Il faut désactiver la rotation automatique des images, et ne modifier aucune valeur colorimétrique ou d'exposition après la prise de l'image. Il est vivement déconseillé de retoucher les photos après coup. Les paramètres d'exposition et de colorimétrie doivent être réglés avant la prise de vue afin de gagner du temps et de maintenir une chaîne de traitement identique tout au long de la prise des différentes photographies.
6. Retouche : Si des retouches sont nécessaires, elles doivent s'appliquer de la même manière à toutes les images pour garder les paramètres identiques sur tous les clichés de la série. La modification de contraste ou de luminosité par exemple, différente d'une image à l'autre, entrave fortement le bon déroulement de la suite du processus photogrammétrique.

Les paramètres suivants ne doivent pas être modifiés : netteté, grain, vignettage,

correction des déformations de l'objectif. Il est impératif de ne jamais recadrer une image.

➤ Mode « rafale »

Le mode rafale peut être très intéressant afin de réaliser un grand nombre de clichés en très peu de temps. Il faut néanmoins que les images soient exploitables par la suite. En fonction de certaines conditions d'éclairage, le mode rafale ne permet pas de réaliser les prises de vue dans les critères requis.

Certains appareils permettent d'utiliser le mode rafale tout en gardant les paramètres énoncés précédemment (partie 1.2.5.1.1.5).

Si le mode rafale est exploitable, le préférer au mode manuel car il permet une acquisition plus rapide et donc un risque de mobilité du visage apportant des erreurs à la numérisation moins important.

1.2.5.1.2 Ordinateur (configuration requise)

La photogrammétrie nécessite un grand nombre de calculs complexes. Les temps de traitement sont d'autant plus longs que les capacités de l'ordinateur sont limitées.

En fonction du logiciel utilisé, les performances requises de l'ordinateur varient. Les logiciels comme Recap photos[®], qui ne nécessitent que de transférer les photos sur un serveur (le traitement des images par photogrammétrie ne se fait pas directement sur l'ordinateur personnel de l'opérateur), ne requièrent pas de grandes performances. La majorité des autres logiciels nécessitent beaucoup de mémoire vive et les processeurs obsolètes augmentent exponentiellement les durées de calcul et de traitement.

Le développement de l'informatique et du numérique dans les dernières décennies a permis d'ouvrir considérablement l'accès de la photogrammétrie au grand public. Grâce à cette technique, chacun peut numériser un objet avec un budget qui n'est pas exorbitant.

Nous énumérerons ci-dessous les configurations recommandées pour le logiciel utilisé Photoscan Pro[®] qui sont valables pour la grande majorité des logiciels de photogrammétrie ainsi que pour les logiciels de conception assistée par ordinateur.

- Processeur : Intel Core i7
- Mémoire vive : 16Go de RAM
- Carte graphique : Nvidia GTX series ou ATI Radeon HD série 5xxx et suivantes
- Stockage : Il est préférable d'utiliser une cellule de stockage flash (SSD) car les données exploitées le sont plus rapidement que sur un disque dur classique.
- Système d'exploitation : Windows XP ou version ultérieure (64 bits), Mac OS X Snow Leopard ou ultérieur, Debian / Ubuntu (64 bits)

Les informations ci-dessus ne sont pas les configurations minimales, car il est possible d'utiliser les logiciels avec un processeur moins puissant ou avec moins de mémoire vive. Les temps de calculs en seront toutefois considérablement augmentés.

1.2.5.1.3 Outils complémentaires

- Écarteur (si méthode directe d'alignement): il convient d'utiliser des écarteurs bilatéraux autonomes ou des écarteurs souples autonomes type Optragate®. Le caractère autonome des écarteurs permet d'éviter les mouvements indésirables entre deux clichés et par ce fait les erreurs d'acquisition. La transparence des écarteurs pouvant également induire des artefacts, il faut si possible privilégier des couleurs mates. Dans cette thèse nous avons peint un écarteur transparent de base en une couleur vive mate (vert en l'occurrence) et nous y avons dessiné de petites croix. En mesurant la distance entre certaines croix lors de l'acquisition et en la reportant sur notre objet virtuel il sera facile de faire la mise à l'échelle (Cf partie 1.2.5.6.1.11)
- Aligneur buccal et frontal (si méthode indirecte d'alignement): Cf. partie 2.2.4.2.2.
- Réglette : d'une taille d'environ 20 centimètres, elle permet lors du traitement du fichier en trois dimensions sur l'ordinateur de faire la mise à l'échelle (Cf partie 1.2.5.6.1.11)

- Pied à coulisse : il permet de réaliser des mesures qui servent pour la mise à l'échelle du modèle en trois dimensions. L'utilisation de la réglette lors de la numérisation n'est alors pas nécessaire.
- Cible de vue : cette cible se matérialise par un objet quelconque de couleur vive situé à distance et à hauteur des yeux de manière à ce que la ligne entre les yeux et la cible de vue soit parallèle au sol. Cette cible de vue joue un double rôle. Premièrement elle permet d'éviter les erreurs d'acquisition provoquées par les mouvements oculaires du patient lors de la prise des clichés. Des petits mouvements involontaires sont induits par le déplacement de l'opérateur en face du patient lors de la prise des photographies. Il convient de demander au patient de ne pas tenir compte de l'opérateur et de ne fixer que la cible de vue. Si la position de la tête et de la cible de vue ne change pas entre les acquisitions avec et sans écarteur, la position des yeux ne change pas non plus entre les deux acquisitions. Cela permet de se servir du centre des pupilles comme point de repère lors de l'alignement des deux numérisations (partie 2.2.4.2.1.1)

1.2.5.2 Environnement de prise de vue

Afin d'assurer une bonne numérisation, il est nécessaire d'avoir une bonne gestion du protocole. L'espace nécessaire est très important (abordé dans la partie 1.2.5.2.1) et l'éclairage l'est d'autant plus (partie 1.2.5.2.2.). La maîtrise d'un éclairage diffus et homogène est une clé essentielle et indispensable à la réussite de la photogrammétrie. Si les photographies ne sont pas réalisées avec les impératifs décrits en terme d'éclairage, c'est toute la suite du processus photogrammétrique qui sera mise à mal. Si deux photos se recouvrant n'ont pas les mêmes conditions d'éclairage, l'assemblage se fera en effet moins facilement, et le nuage de points sera moins dense, ce qui diminuera la précision et la qualité de la numérisation.

Il ne doit pas y avoir d'éléments pouvant perturber l'immobilité du patient lors de l'acquisition. Seul l'opérateur et le patient doivent se trouver dans la salle où l'on réalise la prise des clichés. Le patient doit se tenir dans une posture confortable lui permettant

de rester immobile (en moyenne, une minute de temps est nécessaire à la réalisation de la totalité des clichés).

1.2.5.2.1 Espace nécessaire

Les prises de vue sont réalisées tout autour de la tête du patient. Cela nécessite donc un espace suffisamment grand permettant de faire le tour du patient sans obstacle dans le schéma de capture.

Cet espace varie selon l'objectif utilisé. Pour un objectif grand angle avec une distance focale inférieure à 50 mm, l'opérateur peut se situer plus près du patient lors de la prise des photos. L'espace nécessaire est donc plus petit. Avec l'objectif utilisé (60 mm) l'opérateur se situe environ à un mètre du sujet, l'espace nécessaire s'élève donc à un cercle d'1,5 m de diamètre, ce qui équivaut à une surface d'environ 9 m².

Les objets avec de fortes surfaces réfléchissantes ou brillantes doivent être retirés de la pièce ou au moins ne pas entrer dans le champ de vision des prises de vues.

1.2.5.2.2 Eclairage

L'éclairage artificiel courant, tel des tubes fluorescents au plafond, permettent d'obtenir de bons résultats si la lumière est diffuse et homogène. L'éclairage de la scène doit offrir une luminosité suffisante, constante et diffuse. Certaines salles de soin satisfont à ces exigences mais si ce n'est pas le cas, il est nécessaire d'y ajouter des sources ponctuelles supplémentaires, en utilisant le matériel et les techniques d'un studio photo. Si les sources lumineuses ne produisent pas de lumière diffuse ou si les ombres sont trop marquées, il est facile de les adoucir grâce à un voile blanc ou du papier calque placé devant.

Cette nécessité d'éclairage homogène empêche de réaliser la méthode en faisant tourner le sujet sur lui-même (chaise de bureau pivotante) car l'éclairage ne tourne pas avec le patient et ne sera plus homogène à la surface de la peau, ce qui entraîne donc des erreurs d'acquisition.

1.2.5.2.3 Flash

Les flashes intégrés pop-up sont à proscrire lors de la prise des clichés. L'utilisation d'un flash intégré crée des reflets. Ces reflets sont à l'origine d'erreurs lors la conception du modèle en trois dimensions. Lors de la prise des clichés, les reflets du flash ont une disposition différente en fonction de l'angle de la prise du cliché vis-à-vis de l'objet à numériser, et seront une nouvelle fois à l'origine d'erreur de conception du modèle virtuel. Il est donc judicieux d'utiliser des spots lumineux fixes avec un filtre permettant de diffuser la lumière autour du patient. Avec un éclairage standard de bureau par exemple (tube néon) offrant une pièce uniformément éclairée, il ne devrait pas être nécessaire d'utiliser des spots et éclairages supplémentaires.

1.2.5.3 Préparation du patient

1.2.5.3.1 Positionnement sujet opérateur

Le patient doit s'asseoir sur un tabouret ou une chaise fixe, de 50 cm de haut environ, avec un espace dégagé d'un mètre autour de lui (180° où 90 ° est le principal domaine d'intérêt, face au patient).

L'opérateur doit pouvoir se déplacer librement dans cette zone. Le mieux pour lui est de s'asseoir également sur un fauteuil mobile cette fois (à roulette), permettant de se déplacer autour du patient. Le fauteuil de l'opérateur doit pouvoir se régler en hauteur afin de permettre la prise de clichés sur plusieurs niveaux.

1.2.5.3.2 Orientation naturelle de la tête

La tête du patient doit être dans une position orthostatique, avec plan de Francfort parallèle au sol. Si c'est possible, un support de tête peut se montrer d'une grande aide pour les personnes ayant des difficultés à rester immobile, ou comme simple support pour éviter les éventuels mouvements indésirables.

1.2.5.3.3 Accessoires

Le sujet doit ôter d'éventuels accessoires comme les boucles d'oreilles volumineuses, couvre-chef, lunettes de vue ou de soleil, ou autre accessoires au niveau de la tête.

1.2.5.3.4 Cheveux et pilosité

Les régions pileuses (cheveux, sourcils, moustache, barbe) produisent des artefacts lors des étapes de construction du nuage dense de points. Il est donc nécessaire autant que possible d'écarter ce facteur de la zone à étudier (face). Les cheveux longs sont attachés en « queue de cheval », et, si le patient l'accepte, la barbe doit être rasée avant la prise de clichés. Une barbe trop fournie et épaisse est une contre-indication à la réalisation de ce protocole.

1.2.5.3.5 Regard

Le regard du patient doit rester le plus stable possible pour éviter des erreurs d'acquisition, et ce critère est d'autant plus valable pour la méthode directe d'alignement des scans car les centres des pupilles seront des points de repère d'alignement (Cf partie 2.2.4.2.1.1.). Avoir un regard fixe permet également une amélioration de l'état d'immobilité du patient.



Pour faciliter cette tâche il convient de fixer une « cible de vue » qui se matérialise par n'importe quel petit objet fixe de couleur vive. Il est préférable que le plan entre les yeux et la cible de vue soit le plus possible à l'horizontale.

Figure 5 : Position de la cible de vue

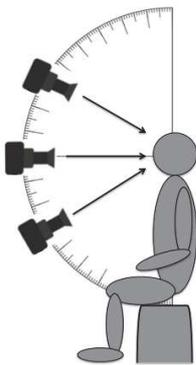
Il est nécessaire de demander au patient de cligner des yeux entre deux clichés successifs pour éviter de prendre des photographies avec les yeux fermés.

1.2.5.4 Capture

1.2.5.4.1 Schéma de capture

Une fois le patient bien installé et immobile, démarre la réalisation des photographies. Certains critères et conditions sont à prendre en compte lors de la réalisation des clichés :

- Recouvrement de 75% entre deux photos successives

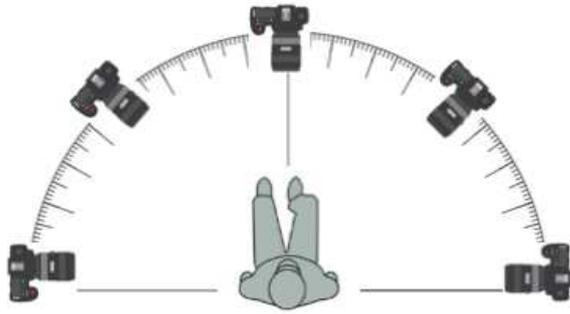


- Sur trois étages, l'opérateur commence debout par prendre des photos de haut, puis assis sur un fauteuil à roulette en position la plus haute, puis assis sur ce même fauteuil en position la plus basse. S'asseoir sur une chaise à roulette augmente le confort pour la prise des photos et diminue le risque d'avoir des photos floues.

Figure 6 : Prise de clichés sur 3 étages

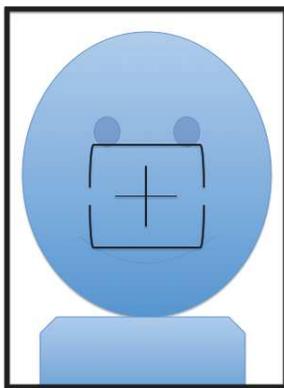


Figure 7 : Position de l'opérateur lors de la prise des photographies



- Minimum de 180° autour du patient (où 90° est le principal domaine d'intérêt, face au patient)

Figure 8 : Photographies à 180° autour du visage du patient



- En mode portrait et au plus proche, de manière à ce que uniquement la tête et le début du buste du patient soient dans le champ de vision de la caméra. En maximisant l'emprise de l'objet sur la surface de l'image, le nombre de pixels effectifs utiles à la reconstruction augmente et les risques d'avoir un élément parasite sont réduits.

Figure 9 : Cadrage du sujet photographié

- Le nombre de photos pour une reconstruction correcte est au minimum de 50 et ne doit pas dépasser 150. Au delà, les temps de calcul du logiciel sont trop longs si les performances de l'ordinateur ne suivent pas.
- Pour une mise à l'échelle à l'aide d'une règle graduée intégrée au scan, il convient de demander au patient de tenir cette règle sur le côté de son visage.
- Tout au long des différentes séries de clichés, les maxillaires doivent être en occlusion d'intercuspidie maximale.
- Les dents sont séchées avec une compresse de gaze stérile ou peuvent être poudrées (Optispray de Sirona® par exemple) pour limiter les reflets.

- Si une méthode indirecte d'alignement des scans est choisie (Cf partie 2.2.4.2.2.) l'aligneur frontal ne doit pas être déplacé entre les différentes séries de photos.
- Il est judicieux de réaliser en fin de série, des photos en contre-plongée au niveau des lèvres. Ceci permet l'acquisition du bord inférieure de la lèvre supérieure et du bord supérieur de la lèvre inférieure.

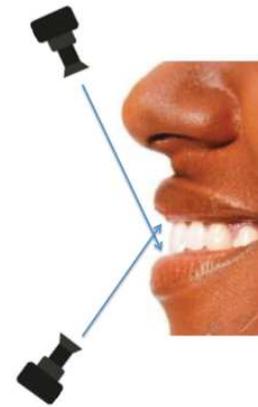


Figure 10 : Photographies en contre-plongées au niveau des lèvres

1.2.5.4.2 Sourire forcé : un sourire plein



Dans la première série de photos, le patient doit tenir une expression de sourire forcé. Un sourire plein avec les prémolaires apparentes et montrant les rides d'expression sur le coté du visage. C'est lors de cette série que les photographies en contre-plongée au niveau des lèvres sont importantes, car c'est le scan du sourire qui est déterminant lors de la conception du sourire.

Figure 11 : Photographie du patient en "sourire forcé"

1.2.5.4.3 Avec écarteur

1.2.5.4.3.1 Du visage



Figure 12 : Photographie du patient avec écarteur

Il est nécessaire de réaliser deux ensembles de photos : d'abord une série normale comme vu précédemment puis une série proche de la zone buccale directement dans la foulée de la première série. Dans le premier ensemble de photographie il convient donc de garder les mêmes recommandations que pour la série « sourire forcé ».

1.2.5.4.3.2 De la « zone buccale »



Figure 13 : Photographie de la zone buccale

C'est donc dans la foulée qu'il faut réaliser la 2^{ème} série. La photo doit englober l'écarteur et les dents en occlusion. Le schéma de capture ne change pas à la seule différence qu'il sera possible d'utiliser un filtre polarisant avec un flash annulaire afin de réaliser des clichés en absence de reflets au niveau des dents, reflets qui peuvent induire des erreurs lors de la reconstruction du nuage de points numériques.

1.2.5.4.4 Prérequis pour la mise à l'échelle réelle de l'objet virtuel

Différentes options permettent de mettre l'objet virtuel à échelle réelle. Il est possible d'utiliser une règle placée contre le visage du patient lors de la prise des clichés

photographiques, elle est alors numérisée avec le visage et permet ultérieurement la mise à l'échelle réelle de l'objet numérique (Cf partie 1.2.5.6.1.11).

L'autre possibilité consiste à prendre des mesures directement sur le visage du patient à l'aide d'un pied à coulisse. Après avoir pris les séries de photos, il suffit de mesurer les distances entre les repères d'alignement choisis (Cf partie 2.2.4.2.1.1) comme par exemple la distance entre les deux canthus internes. Si l'écarteur dispose de repères, ceux-ci peuvent également être utiles. Il faut dans ce cas réaliser la mesure des distances directement lors de l'acquisition, et ce sans que l'écarteur ne bouge entre les prises photographiques et les mesures effectuées.

Enfin, si le choix s'est porté sur la méthode indirecte d'alignement (Cf partie 2.2.4.2.2), il n'est pas nécessaire de réaliser ces mesures, la mise à l'échelle se fait grâce aux dimensions de l'aligneur.

1.2.5.5 Transfert et sélection des photos

Lors du transfert des photos vers l'ordinateur il est important de porter une attention particulière aux métadonnées des clichés photographiques (focale, boîtier utilisé, objectif, ISO, paramètre de calibration de la caméra, etc.). Elles sont parfois stockées sur un fichier associé à la photographie (qui porte normalement le même nom). Le plus souvent, elles sont enregistrées sous forme EXIF (Exchangeable Image File Format). Ces données sont essentielles au logiciel de photogrammétrie.

Il convient ensuite de sélectionner les photos qui seront utilisées pour la construction du modèle 3D par photogrammétrie, et écarter les doublons, ou bien les photos floues ou celles qui ne cadrent pas bien la tête.

1.2.5.6 Logiciel de reconstruction 3D

1.2.5.6.1 Photoscan Agisoft

1.2.5.6.1.1 Aperçu de la présentation du logiciel

Photoscan est un logiciel professionnel très complet, et de ce fait complexe à utiliser malgré la volonté des développeurs de le rendre le plus simple et le plus intuitif possible. Il se décompose en plusieurs fenêtres :

- L'espace de travail où se situent les différents « morceaux ». En cliquant sur la petite flèche à gauche une arborescence se déroule, dans laquelle figurent les éléments suivants (s'ils ont été créés) : *Caméras*, *Repères*, *Barres d'échelles*, *Points de liaison* (correspondant au nuage de points clairsemés après l'alignement des photos), *Nuage dense et Modèle 3D*.
Plus bas sont affichés les attributs et valeurs du modèle (faces, sommets, couleur des sommets, textures), les paramètres de reconstruction et de texturation si ceux-ci ont été réalisés.
- Fenêtre du modèle où l'opérateur peut visualiser le nuage de points ou le modèle en trois dimensions (en fonction de l'étape effectuée). En double cliquant sur une photographie de la fenêtre « *Photos* » celle-ci s'ouvre dans un nouvel onglet de la fenêtre « *modèle* ».
- Fenêtre « *Photos* » : Cette fenêtre affiche les clichés importés. L'opérateur peut visualiser les photos, voir lesquelles sont alignées, appliquer des masques, voir les points de liaison, pivoter, désactiver ou supprimer des photographies.
- Références : Cette fenêtre permet d'entrer les distances mesurées entre deux repères pour la mise à l'échelle. L'opérateur peut également entrer manuellement les coordonnées spatiales des caméras. Cette fenêtre expose également les coordonnées des repères et *les barres d'échelles*
- Barre d'outils : située en haut

1.2.5.6.1.2 Créer un « chunk » ou « morceau »

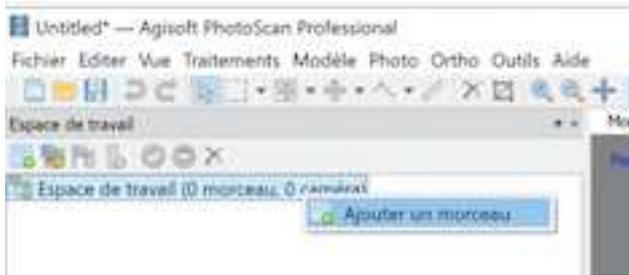


Figure 14 : capture d'écran lors de la création d'un morceau sur Photoscan®

Dans l'onglet espace de travail, il faut commencer par créer un morceau en faisant clic droit : « ajouter un morceau ». Par ce biais il est possible de créer plusieurs morceaux et de travailler distinctement sur chacun d'eux.

Les deux ensembles de photos dans la série « avec écarteur » sont traités dans deux « morceaux » distincts, une série de photos de loin avec écarteur et une série de près avec écarteur (laquelle permet d'avoir une qualité bien meilleure au niveau des dents pour trouver des points de repère permettant d'aligner correctement le scan intra- et extra-oral). Les deux morceaux doivent être par la suite alignés et fusionnés entre eux (Cf partie 1.2.5.6.1.9). Un modèle 3D avec une bonne qualité de numérisation au niveau des dents est obtenu par ce biais.

1.2.5.6.1.3 Importer les photos

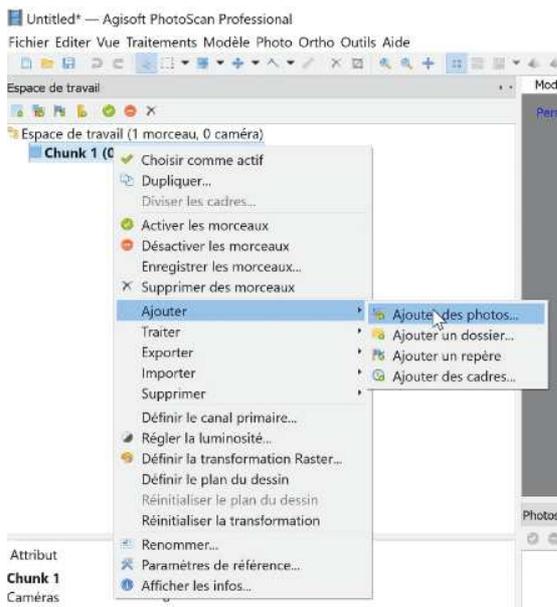
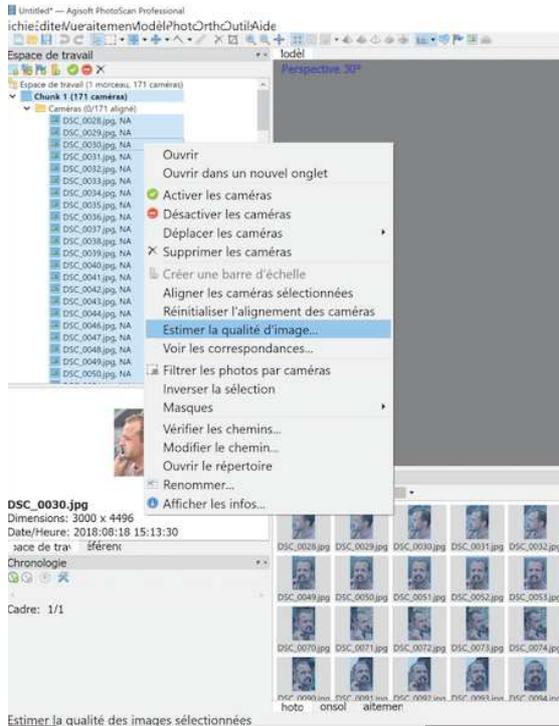


Figure 15 : Capture d'écran lors de l'ajout de photographies dans le morceau sur Photoscan®

Pour importer les photos, sélectionnez le chunk venant d'être créé, cliquez ensuite sur « ajouter » puis sur « ajouter des photos ». Il suffit ensuite de sélectionner les photos dans le dossier où sont enregistrées les photographies. Ces dernières s'affichent dans l'onglet « photos ».

1.2.5.6.1.4 Estimation de la qualité



Cet outil du logiciel permet d'estimer la qualité des clichés afin de ne garder que ceux ayant un bon indice de qualité. Plus l'image est nette, plus la qualité estimée par le logiciel se rapproche du nombre 1. Les images ayant un indice inférieur à 0,4 ne doivent pas être prises en compte dans la suite du procédé. Il faut donc sélectionner toutes les images ayant un indice inférieur à 0,4, clic droit : « *désactiver les caméras* ».

Figure 16 : Capture d'écran lors de l'estimation de la qualité des photographies

1.2.5.6.1.5 Aligner les photos

Après avoir importé les photos dans le logiciel, elles doivent être alignées.

Cette étape permet au logiciel de guider la construction du nuage de points. Le logiciel compare deux photos sur de petites parcelles par base de « patches ». Il trouve alors la concordance entre les différents patches.

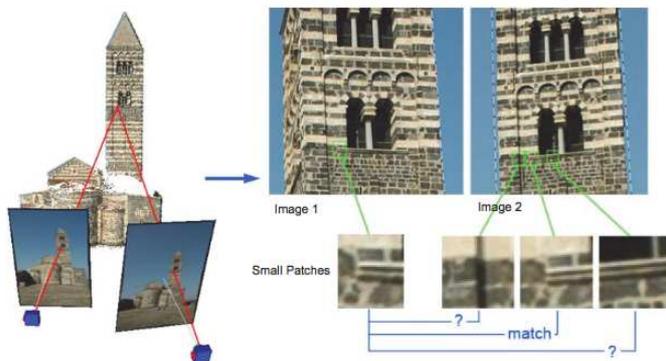


Figure 17 : schéma illustrant la méthode d'alignement des images par le logiciel

S'il trouve une concordance, le logiciel cherche des points de liaison entre les différentes images et ainsi créer un nuage de points dit « clairsemés ».

Pour ce faire : clic droit sur le morceau, puis « traiter » et enfin choisir « aligner les photos ».

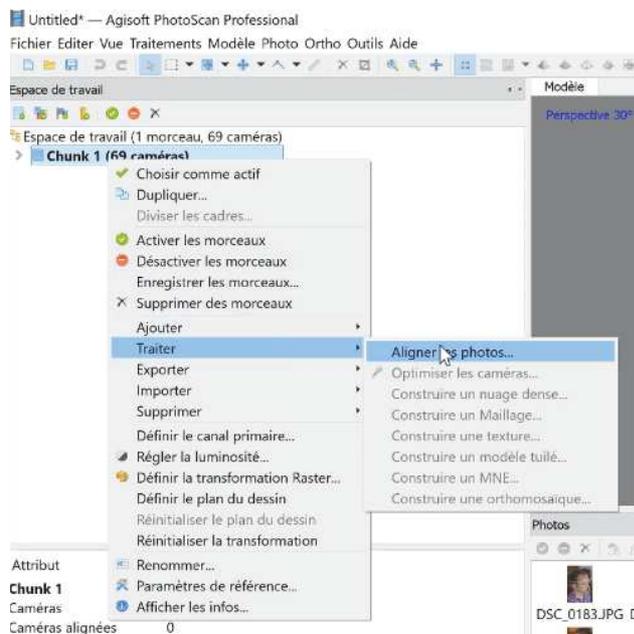


Figure 19 : Capture d'écran avant l'alignement des photographies

Une petite fenêtre s'ouvre alors, elle permet de paramétrer le niveau de précision de l'alignement.

Figure 18 : Capture d'écran des paramètres d'alignement des photographies

Le niveau de précision choisi est proportionnel au temps de traitement de cette étape d'alignement. Dans le cas présent il faut choisir le niveau de précision « haute ». L'onglet « avancé » de cette fenêtre propose de choisir la limite du nombre de points du nuage « clairsemé » et la limite du nombre de points de liaison sur chaque image. Les points de liaison désignent les points identiques sur deux photos qui se chevauchent. Par exemple si l'opérateur donne une limite de 1000 points de liaison, le logiciel essaye de trouver 1000 points sur chaque image retrouvés également sur d'autres images et ce afin d'aligner les photos. Ici également, plus la limite de points fixés est haute, plus le temps de traitement est long.

Un nuage clairsemé est ainsi obtenu, celui-ci donne déjà un bon aperçu du futur modèle en trois dimensions. Autour du nuage clairsemé sont dispersés de petits rectangles bleus représentant la position de la caméra lors de la prise du cliché en question.

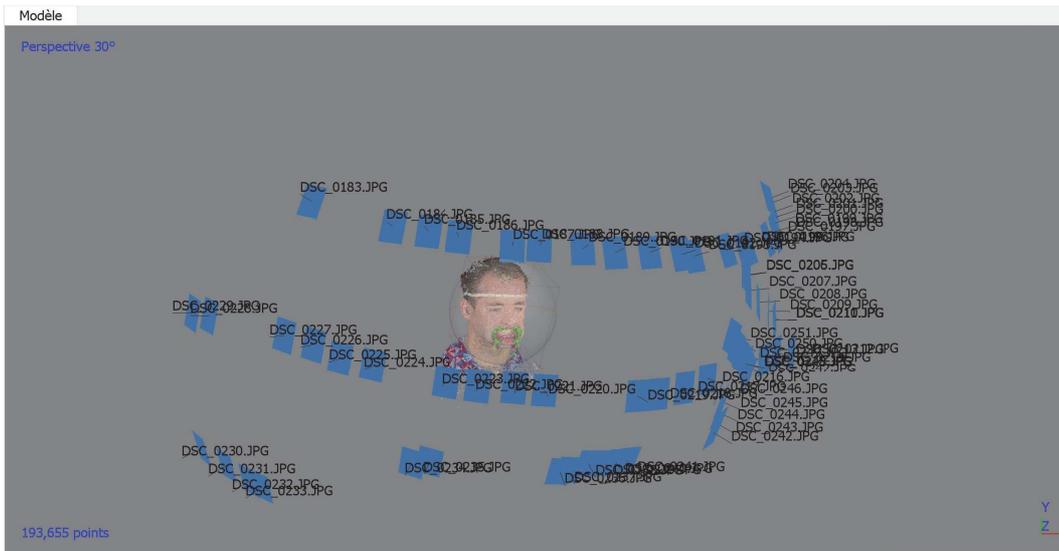


Figure 20 : Visualisation du nuage clairsemé

1.2.5.6.1.6 Délimiter le volume de reconstruction

Délimiter le volume de reconstruction permet au logiciel de ne se concentrer que sur la zone d'intérêt choisie.

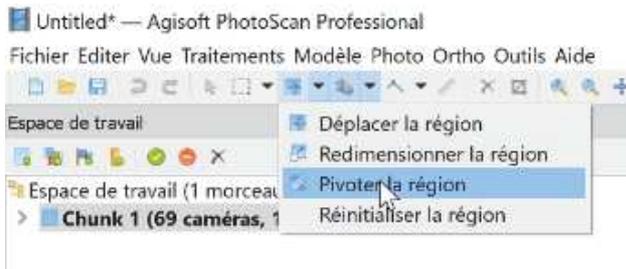


Figure 21 : Capture d'écran des différents outils permettant de déplacer, redimensionner et pivoter le volume de reconstruction

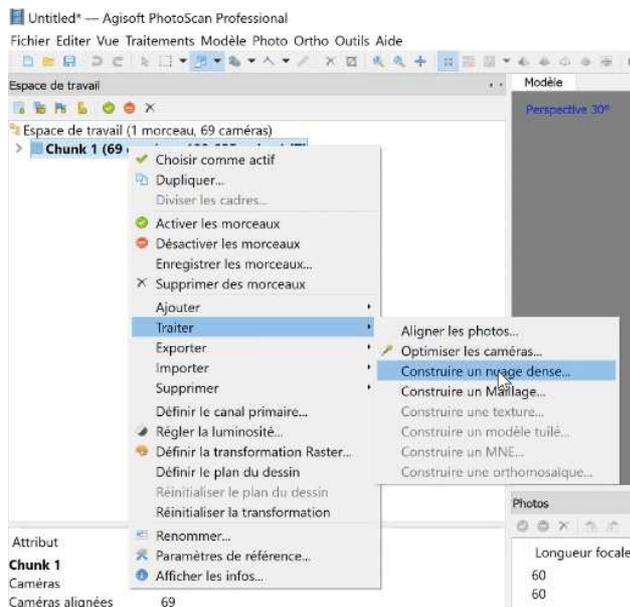
Il se visualise sous la forme d'un parallélépipède. L'opérateur peut déplacer, redimensionner et pivoter la région.

Il s'agit d'utiliser ces outils pour bien positionner et ainsi délimiter le volume de reconstruction pour ne garder que la zone concernée, c'est-à-dire le visage.

1.2.5.6.1.7 Construction d'un nuage dense

C'est l'étape clé du processus, car elle permet de créer un nuage de points denses. En reliant ces différents points lors de la construction du maillage (Cf partie 1.2.5.6.1.8) elle permet alors de générer le modèle en trois dimensions. C'est de loin l'étape la plus gourmande en terme de temps de calcul.

Après l'alignement qui calcule la position des caméras, le logiciel identifie ensuite les informations de profondeur pour chaque caméra afin de les combiner en un seul nuage de points denses.



Pour ce faire : clic droit sur le morceau (chunk) en question->Traiter->puis clic gauche sur « construire un nuage dense... »

S'ouvre alors une petite fenêtre pour définir les paramètres de reconstruction.

Figure 22 : Capture d'écran de la construction d'un nuage dense

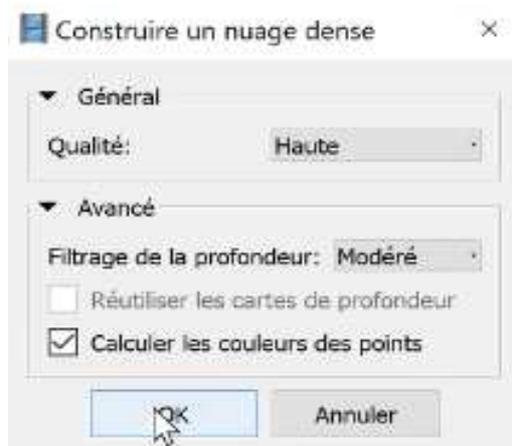


Figure 23 : Capture d'écran des paramètres de construction du nuage dense

- Qualité : Ici l'opérateur a le choix entre une qualité « ultra-haute » « haute » « moyenne » « basse » et « la plus basse ». les deux derniers choix ne servent pas, ils ne servent que en quelque sorte à réaliser des prévisualisations des modèles. Si les composantes de l'ordinateur permettent des calculs n'étant pas trop chronophages, il est pertinent de choisir la qualité haute. Autrement, la qualité moyenne permet de

généraliser un nuage de points d'une qualité largement acceptable et les temps de calcul sont significativement diminués. Dans une comparaison des différents logiciels de photogrammétrie Probst et al. (2) indiquent que les qualités « ultra-haute » et « la plus basse » sont à éviter.

- Filtrage de la profondeur : plusieurs algorithmes de filtrage permettent au logiciel d'éliminer les points dont le placement semble aberrant. Il est déconseillé de désactiver le filtrage de profondeur. Dans le cas d'une géométrie complexe l'opérateur choisit le mode de filtrage léger. Ici, il opte pour ce mode lors de la reconstruction du nuage dense pour la série de photos « proches » avec écarteur (« zone bouche »). En revanche lorsque la géométrie n'est pas trop complexe, comme par exemple pour les séries de photos « visage avec écarteur de loin » et « visage sourire », il choisit plutôt le filtrage « agressif ». Le mode de filtrage *modéré* est un bon compromis, il peut être utilisé pour les trois séries de photos du protocole.



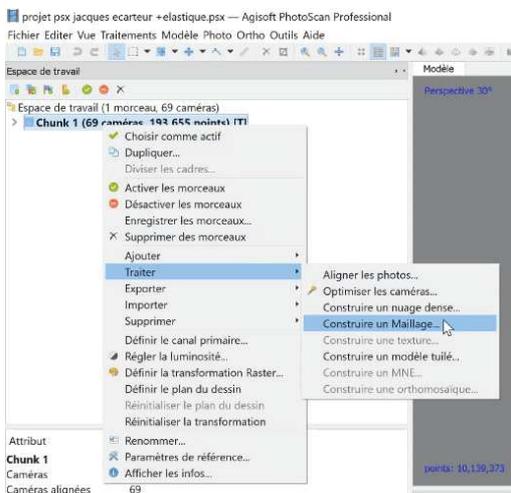
Après les calculs un nuage de points « denses » est donc obtenu.

Figure 24 : Visualisation du nuage dense

1.2.5.6.1.8 Construction du maillage

L'étape précédente a donc permis d'obtenir un nuage de points « denses ». Le logiciel relie ensuite les points entre eux afin de former un maillage. Le maillage est une structure de données géométriques permettant de représenter des subdivisions de surfaces à l'aide d'un ensemble de polygones.

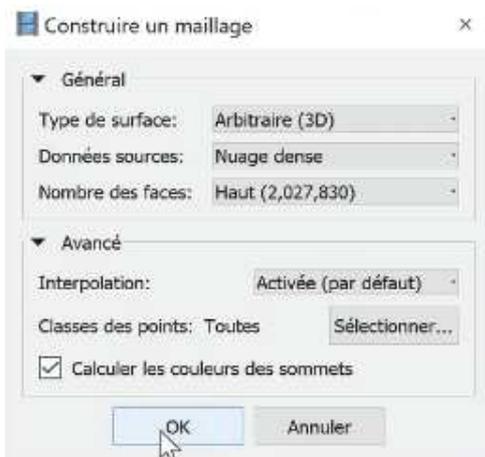
Les points forment ainsi les sommets des polygones, reliés entre eux par des arêtes et formant une face.



Pour construire le maillage du modèle : Clic droit sur le morceau -> *Traiter* -> *Construire un Maillage*.

Une petite fenêtre s'ouvre alors pour définir les paramètres de reconstruction du maillage.

Figure 25 : Capture d'écran de la construction d'un maillage



Type de surface : Il faut choisir « *Arbitraire 3D* » utilisé pour tout type d'objet fermé. Le logiciel ne fait pas d'hypothèse sur le type d'objet modélisé contrairement au choix « *champ de hauteur* » qui est optimisé pour la modélisation des surfaces planes, telles que des terrains ou des bas-reliefs.

Figure 26 : Capture d'écran des paramètres de construction du maillage

Données sources : c'est comme son nom l'indique la source de données que prend le logiciel pour réaliser le maillage. Il est possible par exemple pour la source d'opter pour le nuage clairsemé afin d'avoir un résultat rapide pré visualisant l'objet. Mais ici cas cela ne présente aucun intérêt, et il convient donc de choisir le nuage dense comme source.

Nombre de faces : par son choix « *haut, moyen* ou *bas* » il indique le nombre maximal de faces dans le maillage calculé. Plus ce nombre est élevé plus le rendu est de qualité. Le logiciel propose un ratio du nombre de faces par point du nuage dense - respectivement 1/5, 1/15 et 1/45. L'utilisateur peut également indiquer lui même le nombre de polygones visés, mais un nombre trop élevé de polygones peut entraîner des difficultés de lecture par un logiciel tierce.

Interpolation : le logiciel propose trois modes d'interpolations.

- ✓ *Désactivé*, les résultats reconstruits sont précis mais peuvent comporter des trous (seules les zones correspondant aux points du nuage de points denses sont reconstruites).
- ✓ *Activé (par défaut)* : le logiciel interpole des surfaces dans un cercle d'un certain rayon autour de chaque nuage de points denses. Par conséquent, des trous seront couverts automatiquement. Ce réglage est conseillé.
- ✓ *Extrapolé* : Ici le logiciel réalise un modèle sans trous. De vastes zones de géométrie supplémentaires peuvent être générées avec cette méthode. Elle n'est pas recommandée.

Cocher la case « *calculer la couleur des sommets* » pour générer un modèle maillé en couleur (la couleur est calculée grâce au différents points du nuage dense).

Après construction le maillage peut paraître rugueux du fait du nombre trop important de polygones. Une option du programme permet de lisser le maillage.



Dans *Outils* -> *Maillage* -> *Lisser le maillage* ...

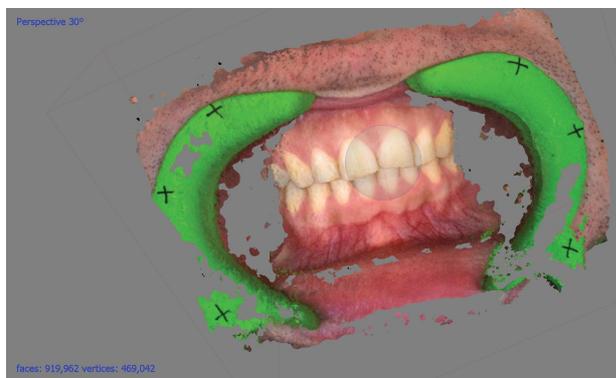
Une fenêtre de paramétrage s'ouvre alors permettant d'indiquer la force du lissage. Une valeur comprise entre 12 et 14 semble un bon compromis pour ne pas altérer la précision du modèle.

Figure 27 : Capture d'écran pour le lissage du maillage

1.2.5.6.1.9 Aligner et fusionner les morceaux

Si la qualité de numérisation ne semble pas assez bonne au niveau des dents, il peut être judicieux de réaliser deux séries de photographies lors de l'étape d'acquisition. Une première « de loin » encadrant tout le visage, et une seconde « proche de la zone buccale » encadrant la bouche et l'écarteur. Les deux séries doivent se faire l'une dans la foulée de l'autre.

Il s'agit alors de réaliser deux morceaux (ou « *Chunks* », dont la construction du nuage clairsemé, dense et la construction du maillage se feront séparément) qu'il conviendra d'assembler ensuite.



La photographie ci contre montre la réalisation du modèle par photogrammétrie de la zone buccale. Les clichés ont été réalisés grâce à un filtre polarisant qui supprime tous les reflets dentaires pouvant altérer le processus de photogrammétrie et produire du « bruit ».

Figure 28 : Visualisation du modèle numérique de la zone buccale acquis par photogrammétrie

Afin d'aligner les modèles, l'opérateur commence par importer les masques des deux modèles.

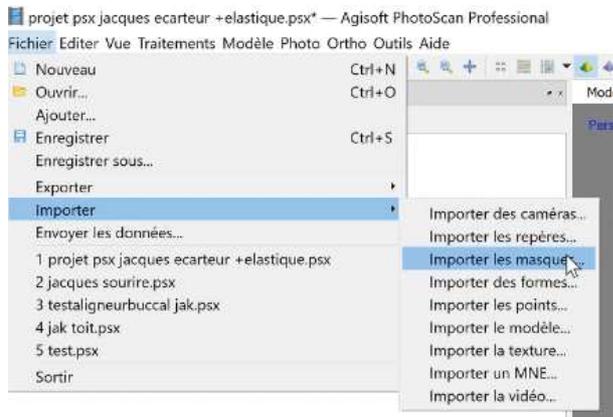


Figure 30 : Capture d'écran pour l'import des masques

Fichier -> Importer -> Importer les masques

Une fenêtre s'ouvre : les paramètres par défaut conviendront.

Figure 29 : Capture d'écran des paramètres d'import de masques



Figure 31 : Visualisation du modèle 3D non texturé après découpe de la zone à remplacer

Il faut découper les zones imprécises qui sont ensuite remplacées par le nouveau morceau plus précis (tout en gardant l'écarteur qui sert alors de point de repère au logiciel pour l'alignement)

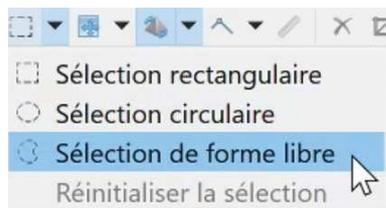


Figure 32 : Capture des différents outils de sélection

L'opérateur sélectionne la zone grâce à l'outil de sélection, puis la supprime en cliquant sur l'icône en forme de croix

L'alignement des morceaux se fait ensuite en cliquant sur *Traitement -> Aligner les morceaux*

Une fois les morceaux alignés, l'opérateur termine la manœuvre en fusionnant les deux morceaux. *Traitement -> Fusionner les morceaux*



Figure 33 : Visualisation du modèle après alignement des morceaux

Un nouveau morceau intitulé « *merged Chunk* », qui est un nuage de points dense des deux morceaux alignés, est ainsi généré. Il suffit alors de construire le maillage pour obtenir le modèle numérique.

La différence de couleur s'explique par l'utilisation d'un filtre polarisant pour la série proche de la zone buccale.

Ce scan ne sert pas dans la conception du nouveau sourire, il sert uniquement à aligner correctement entre eux les scans intra-oraux et le scan du visage en sourire.

1.2.5.6.1.10 Texture

Une texture est une image en deux dimensions appliquée sur l'objet en trois dimensions. C'est le « *mapping* ». Cette texture permet d'habiller l'objet virtuel afin de lui donner un aspect reproduisant au mieux l'objet numérisé.

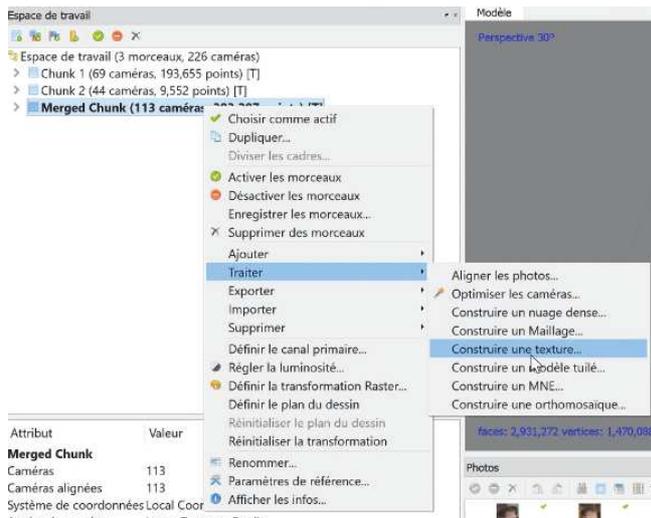


Figure 34 : Capture d'écran de la construction d'une texture

Pour ce faire : clic droit sur le morceau concerné, *Traiter* -> *Construire une texture*

Une fenêtre de paramétrage va s'ouvrir.

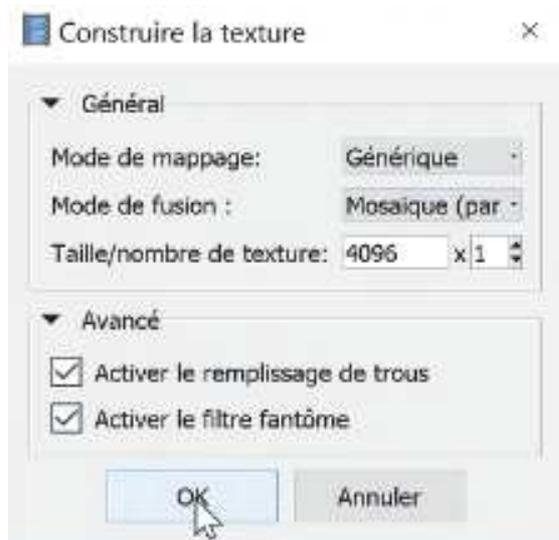


Figure 35 : Capture d'écran des paramètres de construction d'une texture

Mode de mappage : Il faut choisir le mode « *générique* », il permet de paramétrer l'atlas de texture pour des géométries arbitraires.

Mode de fusion : ici l'opérateur choisit la manière dont les valeurs de pixels de différentes photos sont combinées dans la texture finale. Choisir « *Mosaïque* ».

La valeur de la taille de l'atlas de texture est à garder par défaut.

La génération de la texture permet d'obtenir un modèle texturé dont le rendu est très agréable. Il faut veiller lors du transfert de données à accompagner le fichier 3D (PLY ou OBJ) au fichier de texture.

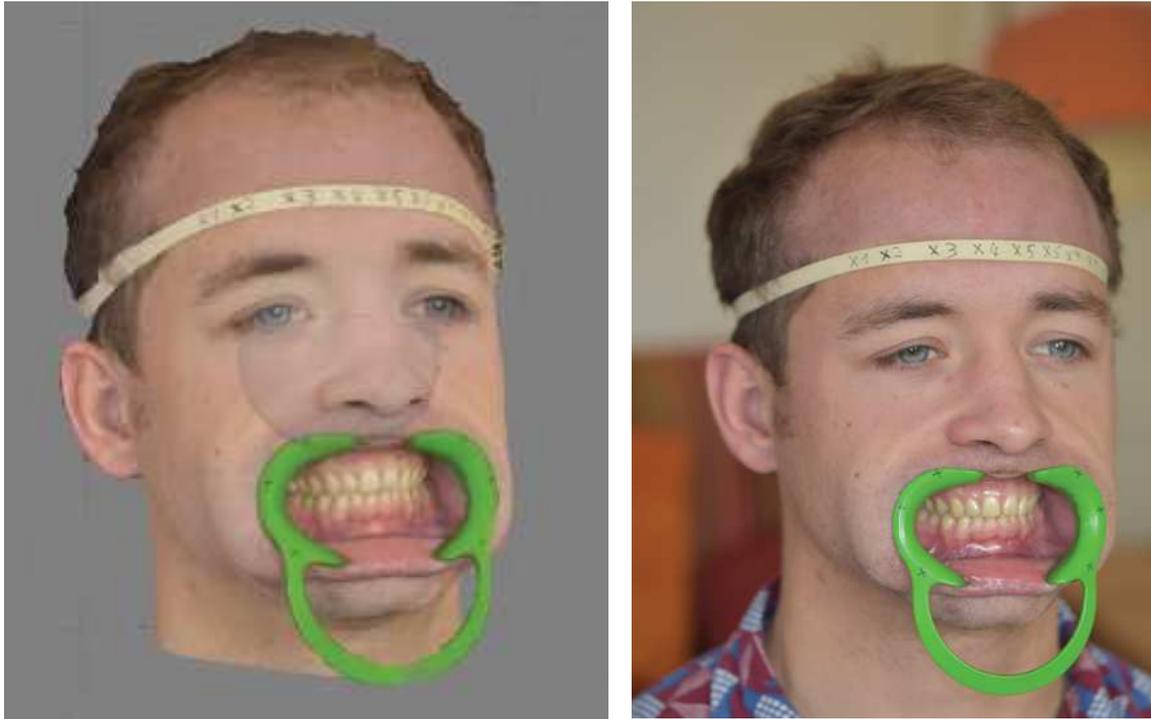


Figure 36 : Visualisation de la numérisation 3D du visage du patient obtenue par photogrammétrie via le logiciel Photoscan Pro de Agisoft® en comparaison d'une photographie 2D

1.2.5.6.1.11 Mise à l'échelle réelle

Le logiciel permet de construire un modèle numérique en trois dimensions tout en le réalisant dans un espace euclidien. Il faut alors lui donner une bonne échelle. Pour ce faire, il est nécessaire de fixer plusieurs repères sur le modèle, dont les distances entre eux sont connues. Ces distances sont connues grâce à des relevés effectués lors de l'acquisition sur des repères qui sont visibles sur le modèle numérique (relevés lors de la séance de prise de photos avec un pied à coulisses) ou encore connues car l'acquisition s'est faite en présence d'une règle graduée. Le logiciel réalise alors une transformation homothétique de l'objet.

Pour cela il faut commencer par faire un clic droit sur le repère visuel présent sur l'objet numérique et sélectionner « *ajouter un repère* ».

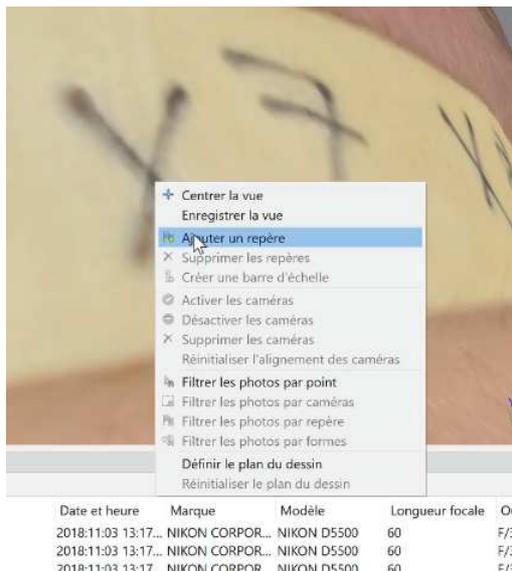


Figure 37 : Capture d'écran lors de l'ajout d'un repère sur le modèle 3D

Ici en l'occurrence est utilisé un élastique parcouru de petites croix dont la distance entre plusieurs repères a été mesurée lors de la séance d'acquisition. Ce même principe vaut pour d'autres repères comme les canthus internes par exemple.

L'opérateur fait la même chose pour tous les repères dont il a préalablement mesuré l'écart les uns avec les autres.

Les repères s'affichent ensuite dans l'espace de travail, dans le morceau en question plus précisément, après avoir déroulé le dossier « repères ».

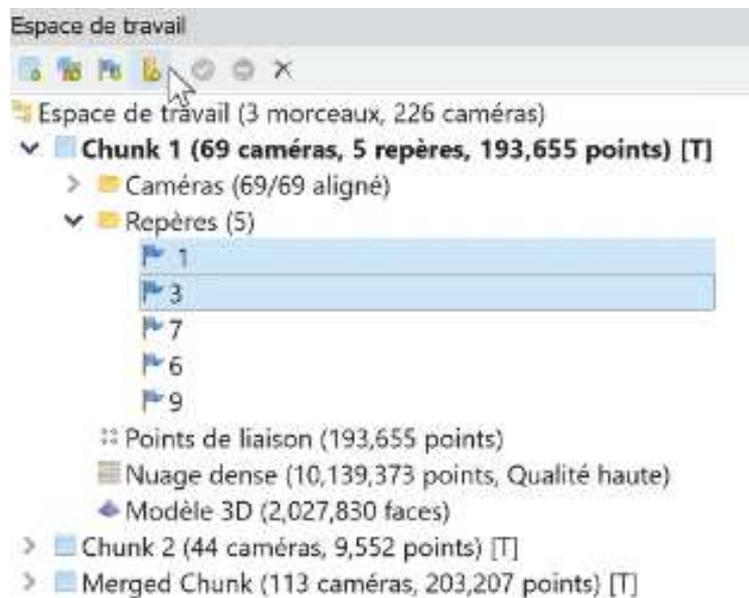
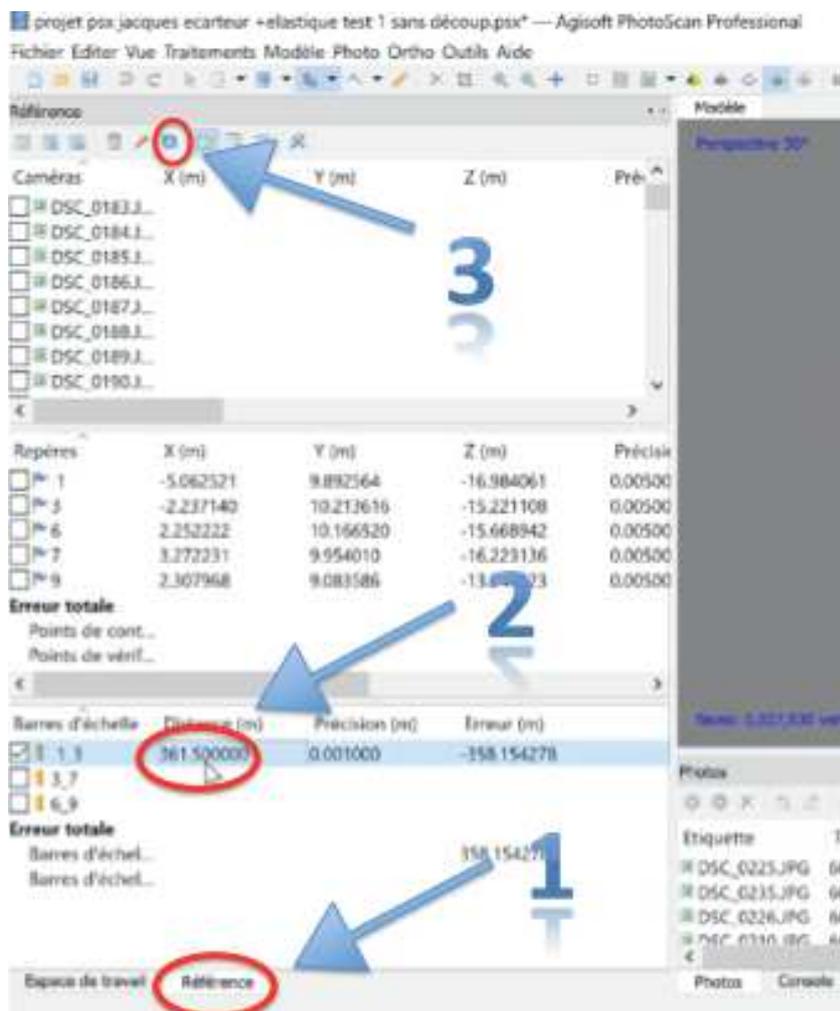


Figure 38 : Capture d'écran lors de la sélection des repères et de la création d'une barre d'échelle

La touche ctrl permet de sélectionner les repères dont la distance les séparant est connue.

L'icône permet ensuite de créer une « barre d'échelle ».



Après avoir sélectionné l'onglet « référence » (1) situé en bas à gauche de l'écran, il faut inscrire les longueurs des différentes barres d'échelles créées (2) en millimètres et non pas en mètres comme indiqué sur le programme. Ici en l'occurrence il y a 361,5 millimètres entre le point de repère 1 et 3. Il suffit enfin d'appuyer sur l'outil rafraichir pour que la transformation homothétique se fasse (3).

Figure 39 : Schéma des différentes étapes permettant la transformation du modèle 3D à la bonne échelle

1.2.5.6.1.12 Enregistrement des données

L'enregistrement des données doit se faire à chaque échelon du traitement photogrammétrique par mesure de précaution. Cette sauvegarde est d'autant plus importante que la fonction « annuler » n'est pas toujours disponible sur le logiciel d'Agisoft. Pour ce faire : *Fichier* -> *Enregistrer sous...* -> donner un titre au projet et l'enregistrer à l'endroit voulu. Les données s'enregistrent sous un format .psx (format projet Photoscan).

1.2.5.6.1.13 Exporter les données (STL, PLY,...)

En fonction du logiciel utilisé pour la lecture des données numérisées, il est possible d'exporter le projet sous différents formats. Ici les travaux CFAO sont réalisés sur *Exocad®*, et l'opérateur a le choix d'exporter le scan sous format *.ply (Polygon File Format)* ou *.obj (Wavefront OBJ)*.

Exporter les données : Clic droit sur le morceau que vous souhaitez exporter -> *Exporter* -> *Exporter le modèle*, inscrivez le nom que vous souhaitez attribuer au scan et choisissez le format voulu. Une fenêtre de paramétrage pour l'export s'ouvre alors et il n'est pas nécessaire de modifier les paramètres par défaut.

1.3 Application clinique par scannage Bellus

Dans cette méthode l'objectif est le même. Réaliser un scan du visage, aligner ce scan avec le scan intra-oral afin de réaliser le projet prothétique en trois dimensions en fonction des traits du visage. Mais ici le scan du visage n'est pas assez précis au niveau des dents pour trouver des points de repères. Il faut donc se servir d'un « aligneur » buccal et frontal pour positionner correctement les deux scans entres eux dans l'espace. Cette méthode et son protocole sont plus simples et demandent moins de connaissances pour la construction d'un modèle en trois dimensions.

1.3.1 Fonctionnement de la caméra

La caméra Bellus3D se fixe sur une tablette ou Smartphone possédant une caméra frontale ; elle est donc complémentaire à un appareil mobile pour réaliser une numérisation du visage en trois dimensions. La caméra utilise deux projecteurs laser infrarouges pour projeter de nombreux points sur un visage, ainsi que quatre capteurs (trois capteurs sur le scanner dont deux capteurs infrarouges et un capteur colorimétrique et un de l'hôte du périphérique mobile) pour capturer simultanément des centaines d'images infrarouges et en couleurs, de haute résolution du visage, sous des

angles différents. Les images sont ensuite fusionnées afin de créer un modèle de visage 3D en couleur.

1.3.2 Matériel nécessaire

1.3.2.1 Caméra Bellus



Figure 40 : Caméra Bellus fixée sur une tablette (à gauche) et sur un Smartphone (à droite)

Dans cette méthode l'opérateur ne sert donc pas de l'appareil photo pour réaliser le modèle du visage en trois dimensions mais d'un scanner prévu à cet effet. Le dispositif se fixe sur le haut d'une tablette ou d'un Smartphone. Il suffit d'installer une application permettant le fonctionnement du scanner avec la tablette.

1.3.2.2 Tablette ou Smartphone

Le scanner Bellus® fonctionne en complémentarité avec une tablette ou un smartphone doté d'une caméra frontale d'une résolution d'au moins 8 Mpixels, un processeur multicoeur rapide avec un minimum de 3 Go de Ram et un port USB 2.0 ou 3.0 (peu de tablettes ou de Smartphones possèdent un port USB mais il est facile de trouver dans le commerce des adaptateurs pour micro-USB par exemple).

1.3.2.3 Aligneurs frontal



L'aligneur frontal permet de bien positionner les deux scans de visage entre eux (le scan avec et le scan sans aligneur buccal en place). C'est un dispositif qui se fixe comme un bandeau frontal. Il doit être immobile par rapport au visage du patient entre les deux scans de visage successifs à réaliser dans ce protocole.

Figure 41 : Photographie du patient avec l'aligneur frontal en place

1.3.2.4 Aligneurs buccal

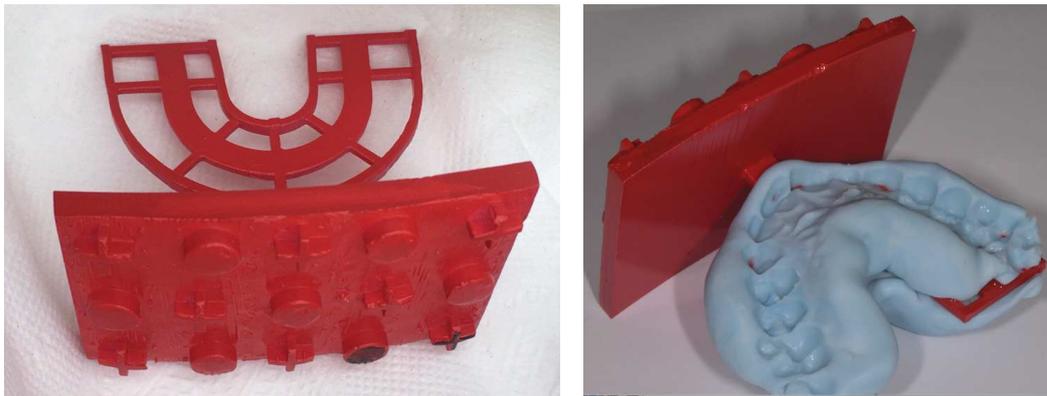


Figure 42 : Photographies de l'aligneur buccal

Un aligneur buccal est un dispositif doté d'une partie intra-orale et d'une partie extra-orale. L'aligneur fait en quelque sorte le lien entre le scan intra-oral et le scan extra-oral afin de les aligner et de leur donner la position exacte dans l'espace l'un par rapport à l'autre. L'opérateur aligne la partie intra-orale (grâce à l'empreinte des faces occlusales des dents maxillaires sur le silicone) de l'aligneur avec le scan intra-oral et la partie extra-orale de l'aligneur avec le scan extra-oral du visage (via l'aligneur frontal).

1.3.3 Méthode et protocole

Numériser à l'aide d'un scanner du commerce est beaucoup moins contraignant que par photogrammétrie. L'inconvénient de l'investissement est largement compensé par la facilité du processus : pas de gestion contraignante d'une lumière diffuse et homogène (il faut juste veiller à ne pas être à contre-jour, c'est-à-dire ne pas avoir de forte lumière par l'arrière de la tête du patient), un protocole simplifié et plus rapide, plus confortable pour le patient et le praticien.

1.3.3.1 Préparation du patient

1.3.3.1.1 Positionnement sujet/opérateur

Le patient doit se tenir assis face à la tablette numérique à environ 30-40 cm de celle-ci. L'application de scannage Bellus est très intuitive, elle guide le patient tout au long de la numérisation (celle-ci se réalise en une vingtaine de seconde). Afin d'éviter toute perte de temps, l'opérateur est encouragé à expliquer la démarche à suivre au patient. Si c'est possible, il est judicieux de fixer la tablette sur un support fixe afin que celle-ci ne bouge pas pendant l'application. Dans le cas contraire, le patient tient la tablette face à lui lors de la numérisation. L'opérateur lui, se tient à l'écart le temps de l'acquisition.



Pour aider le sujet à bien se positionner face au scanner, l'application utilise la caméra frontale pour filmer et l'écran apparaît alors comme un miroir où le sujet peut se voir avec un ovale dans lequel le patient doit placer son visage.

Figure 43 : Photographie du patient lors de l'acquisition 3D du visage avec la caméra Bellus®

Cet ovale est rouge lorsque le sujet est mal placé et devient vert quand le positionnement est correct et que l'acquisition peut commencer.

1.3.3.1.2 Cheveux et accessoires

Comme pour la numérisation par photogrammétrie, le patient doit se libérer de tout accessoire pouvant gêner l'acquisition (lunettes, chapeau, boucles d'oreilles volumineuses, etc.) et les cheveux ne doivent pas encombrer le visage.

1.3.3.2 Numérisation

1.3.3.2.1 Schéma de capture

Une fois bien positionné face au scanner Bellus, le sujet appuie sur le bouton tactile principal pour commencer l'enregistrement des données. L'application Bellus présente des aides visuelles (tête de mannequin virtuelle qui montre dans quel sens tourner la tête) et auditives (voix qui donne les instructions et signaux sonores indiquant les étapes accomplies) permettant de faciliter l'étape d'acquisition. Il faut garder le regard droit et non pas sur l'écran pendant les mouvements de rotation de la tête. Le mouvement doit être lent et constant (environ 20° par seconde) en concevant la même expression du visage et en évitant les mouvements brusques.

Dans l'ordre, l'application demande de : tourner la tête à gauche, revenir au centre, tourner à droite, revenir au centre, lever la tête au ciel et enfin baisser la tête.

Une fois cette étape terminée, il convient de taper le nom sous lequel enregistrer le scan et un petit temps de traitement et de reconstruction (inférieur à une minute) est nécessaire pour visualiser la numérisation.



Figure 44 : Photographies du patient réalisant les mouvements de la tête lors de l'acquisition 3D du visage avec la caméra Bellus®

Il est nécessaire de réaliser deux scans : un premier avec aligneur buccal et frontal en place, et un second, « grand sourire » et aligneur frontal en place. Entre les deux scans l'aligneur frontal ne doit pas bouger.

1.3.3.2.2 De face avec aligneur buccal et frontal en place

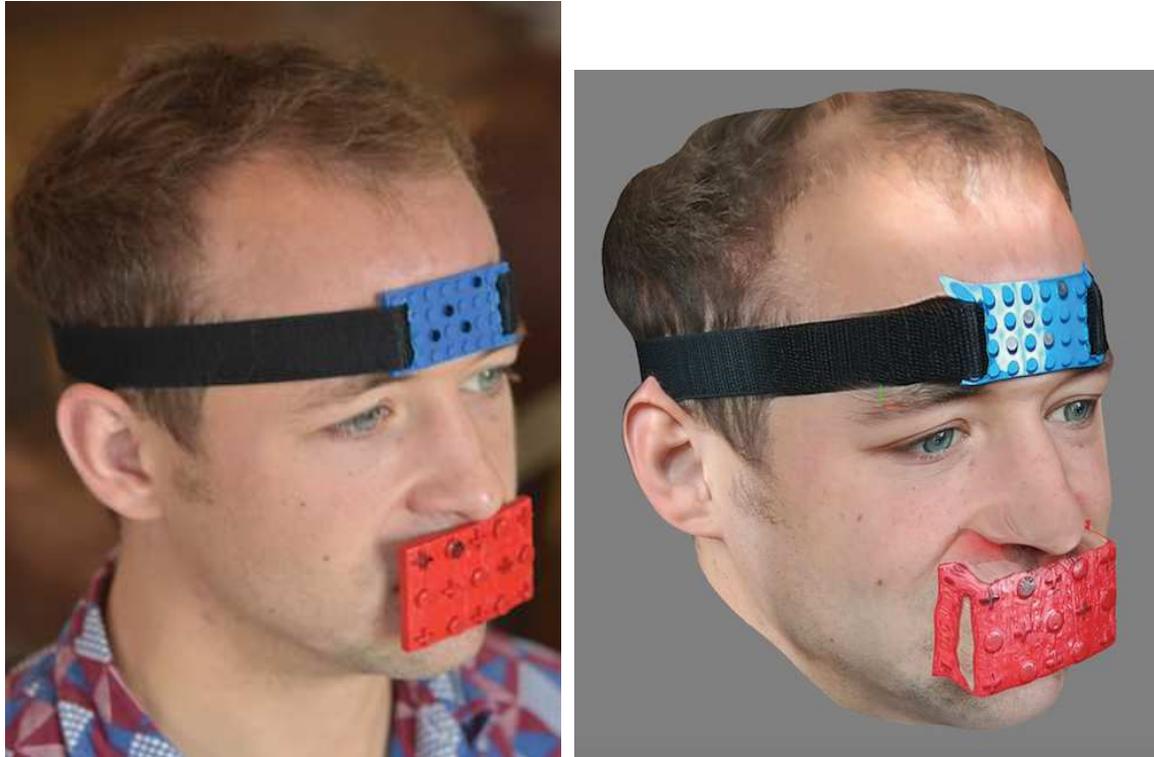


Figure 45 : Photographie 2D du patient (à gauche) et modèle 3D obtenu avec la caméra Bellus® (à droite)

1.3.3.2.3 De face avec aligneur frontal en place et grand sourire

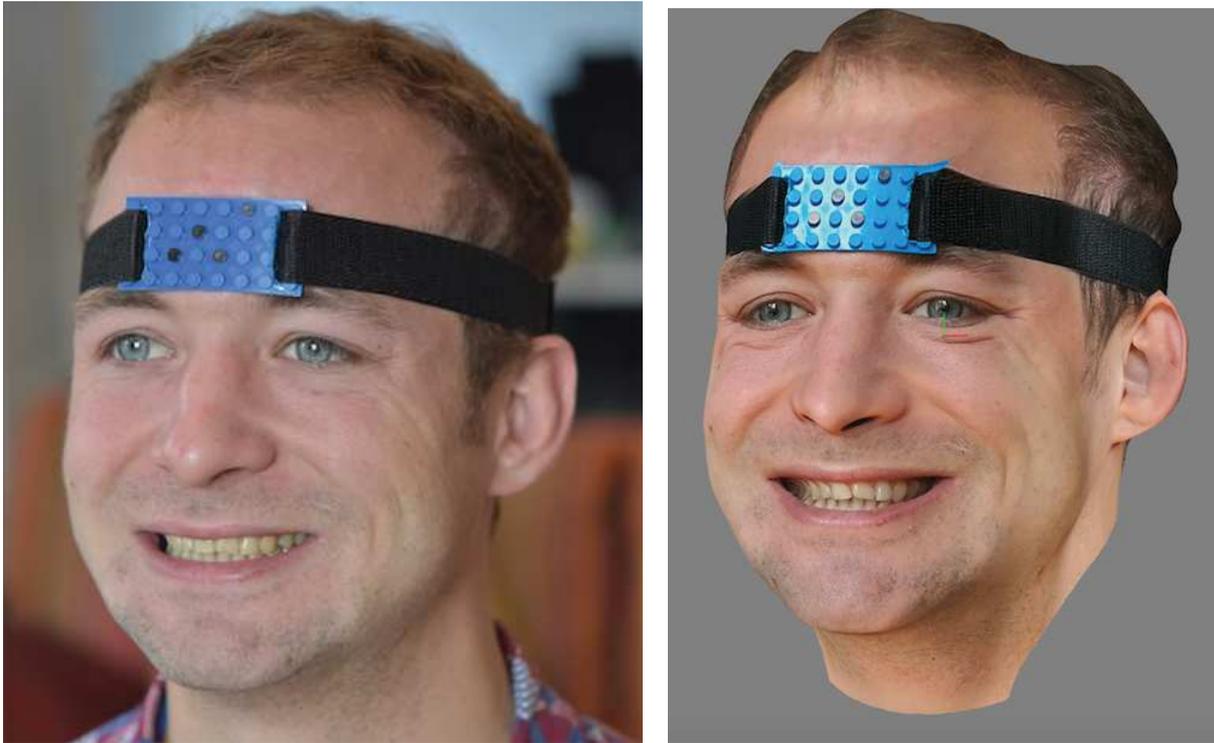


Figure 46 : Photographie 2D du patient (à gauche) et modèle 3D obtenu avec la caméra Bellus® (à droite)

1.3.3.3 Export des données

Les données numérisées sont enregistrées dans un dossier préalablement désigné pour sauvegarder les données (la destination de sauvegarde peut être changée si besoin dans les paramètres de l'application Bellus®). En fin de numérisation, l'enregistrement s'effectue tout seul. Il suffit alors d'exporter les fichiers en question vers l'ordinateur sur lequel l'opérateur réalise les travaux de CAO.

1.3.3.4 Scan de l'aligneur buccal

Pour que l'aligneur puisse servir de clé de repositionnement entre les scans du visage et des dents, il faut aussi le numériser. C'est possible avec un simple scanner de bureau qui équipe la majorité des laboratoires travaillant par CFAO.



Ici, l'aligneur est numérisé avec un scanner *Identica Hybrid* de la marque Medit®.

Figure 47 : Scanner Identica hybrid de Medit®

2 Conception du sourire

L'esthétique du sourire est une demande exprimée de plus en plus fréquemment par les patients, et de nombreux outils sont à notre disposition pour une analyse systématique et complète avant un traitement esthétique. Elle est importante pour le praticien et pour le patient qui par ce biais pourra percevoir le bénéfice du traitement envisagé. La communication avec le prothésiste, garante du bon déroulement de la thérapeutique, s'en voit de même considérablement améliorée. Il existe depuis quelques années bon nombre de logiciels permettant cette analyse en deux dimensions avec lesquels sont déterminés les différents paramètres de l'analyse dento-faciale, dento-labiale et dento-gingivale (la ligne horizontale et verticale de référence, la ligne du sourire, la proportion et la morphologie des dents, la position du zénith, la ligne et le contour gingival ou encore l'état de la papille inter-dentaire et la formation des triangles noirs). L'utilisation d'outils numériques offre donc de nouvelles perspectives aux activités cliniques quotidiennes. Les informations numériques sont alors considérées comme un outil de communication objectif et efficace entre dentiste, patient et prothésiste. Les nouvelles technologies permettent aujourd'hui d'accomplir cette analyse en trois dimensions. Il est alors possible de jouer sur d'autres paramètres absents lors de l'analyse en deux dimensions comme le plan de Camper, la courbe de Spee et Wilson, ou encore faire la planification implantaire en fonction de données d'un CBCT, mais l'atout majeur reste celui de ne pas sortir du flux numérique de travail, le « workflow » et ainsi concevoir un projet qui sera au plus proche, voire à l'identique, du résultat final. Le prothésiste réalise son wax up directement sur le visage numérique du patient.

2.1 Wax-up numérique, différents logiciels

On dénombre à ce jour une bonne dizaine de logiciels permettant de faire cette analyse en deux dimensions comme Photoshop, Keynote, ADSD, Smile Designer Pro, Visagi-Smile,... Mais pour autant aucun logiciel « prêt-à-l'emploi » n'existe pour réaliser cette analyse en trois dimensions. La difficulté d'un tel programme ne réside pas dans le fait de réaliser un scan du visage mais d'aligner correctement et avec précision le scan intra-oral avec le scan extra-oral du visage.

2.1.1 En deux dimensions

Plusieurs logiciels ont été développés ces dernières années pour la conception du sourire numérique, pour aider les praticiens dans l'analyse et la conception d'un nouveau sourire guidés par certains critères. Il existe beaucoup de logiciels prêt-à-l'emploi, et prévus à cet effet. Mais pour autant ce ne sont pas les plus complets. D'après Omar et Duarte (39) Photoshop et Keynote fournissent une analyse du sourire plus complète que la plupart des logiciels spécialisés dans l'analyse du sourire.

L'analyse en deux dimensions comporte deux problèmes majeurs, le premier étant celui de la parallaxe. Si les photos ne sont pas parfaitement prises de façon orthogonale au visage du patient, entre les différents clichés (avec écarteur et sans écarteur), il peut y avoir des erreurs d'analyse et de diagnostic. L'autre inconvénient majeur de la méthode en deux dimensions, est de devoir interrompre le processus numérique et de devoir sortir du flux de travail numérique: l'analyse une fois terminée, le prothésiste doit de sa main copier le projet à partir d'une photographie en deux dimensions, pour soit réaliser son wax-up de manière traditionnelle sur un modèle en plâtre, soit en CFAO sur un modèle virtuel dans un logiciel de modélisation.

2.1.2 En trois dimensions (pas de logiciel « prêt-à-l'emploi »)

Il n'existe à ce jour aucun logiciel prêt-à-l'emploi, prévu pour la réalisation d'un smile design en trois dimensions. Certains logiciels comme Cerec SW 4.2 ou Planmeca Romexis Smile Design permettent d'importer une analyse en deux dimensions et l'appliquer en quelque sorte au modèle virtuel. Mais là encore il faut ajuster et modifier le mock up numérique sur le modèle virtuel. Depuis peu Exocad propose également une solution similaire en utilisant une photographie du patient.

L'idéal serait de réaliser cette analyse virtuellement sur un visage numérique intégré dans le logiciel de modélisation. C'est ce dont traite cette partie, en important un scan du visage du patient dans Exocad, l'opérateur peut réaliser son projet en trois dimensions. Une fois le visage intégré et correctement aligné avec le scan intra-oral, il est possible de réaliser l'analyse du sourire en trois dimensions directement sur le

visage numérique du patient. Par ce biais, il n'y a plus de problème de parallaxe car l'opérateur travaille sur un objet en trois dimensions, et cela permet également de réaliser un projet sans sortir du flux numérique de travail. Le mock up numérique devrait être à l'identique du mock-up réel.

Par ailleurs, d'autres systèmes professionnels, comme le Face Hunter (Zirkonzahn®), ou dérivés de l'instrumentation radiologique, comme chez PlanMeca®, offrent des solutions plus simples d'utilisation mais aussi beaucoup plus coûteuses.

2.2 Avec Exocad

Après la phase d'acquisition vient la phase de modélisation du sourire. Pour cela il faut utiliser un logiciel de modélisation CAO (en l'occurrence ici : Exocad®, un des logiciels le plus complet et le plus utilisé par les prothésistes).

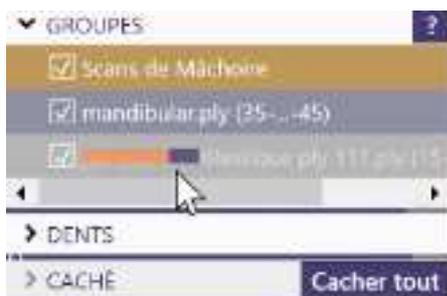
2.2.1 Les outils de visualisation utiles dans Exocad

Il est nécessaire de connaître certains outils de visualisation utiles dans le logiciel.



Le premier est celui qui permet de choisir certaines vues prédéfinies ou d'en enregistrer une nouvelle. Ainsi, en cliquant sur la flèche en bas à droite s'affiche la vue de face au patient.

Pour enregistrer une nouvelle vue, Il faut se placer dans la vue souhaitée et cliquer sur « vue personnalisée ».



L'autre outil essentiel est la fenêtre située en haut à gauche du logiciel. Celle-ci permet de visualiser ou non, et de jouer sur la transparence des objets 3D présents.

Figure 48 : Fenêtre permettant de visualiser ou non les objets 3D

2.2.2 Nouveau bon de commande

A l'ouverture du logiciel, il est nécessaire de commencer par créer un nouveau projet en renseignant le nom du demandeur, celui de l'opérateur et le nom du projet. Ensuite l'opérateur définit le type de travail. Pour réaliser un mock-up numérique, la meilleure des solutions et la plus simple à mettre en œuvre n'est pas de passer par le type de travail « wax-up » ou « wax-up pontique », mais par le type de travail « pontique anatomique ».



Figure 49 : Capture d'écran lors de l'établissement du bon de commande

L'opérateur commence par sélectionner une des dents concernées pour la destiner à un type de restauration. Une fois ce dernier défini sur une dent, il sélectionne toutes les autres dents concernées avec la touche Ctrl du clavier pour leur assigner le même type de travail.

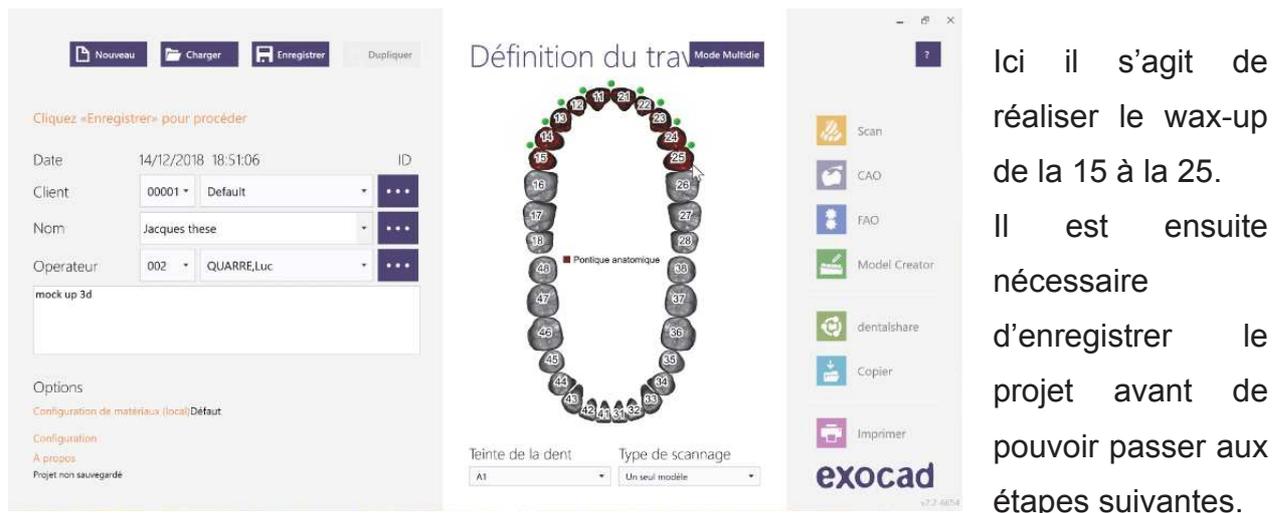


Figure 50 : Capture d'écran lors de l'établissement du bon de commande

Ici il s'agit de réaliser le wax-up de la 15 à la 25. Il est ensuite nécessaire d'enregistrer le projet avant de pouvoir passer aux étapes suivantes.

2.2.3 Module « Model creator »

« Model creator » est un module du logiciel d'Exocad qui permet de créer le modèle et ce passage facilite l'export du projet et son impression.

A partir du bon de commande il faut donc cliquer sur le module qui se situe à droite de l'écran. Lorsque celui-ci s'ouvre, il demande d'importer le scan intra-oral du maxillaire.

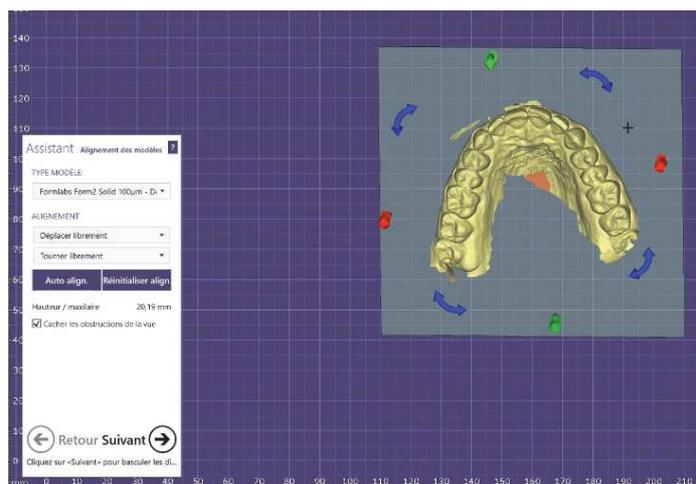
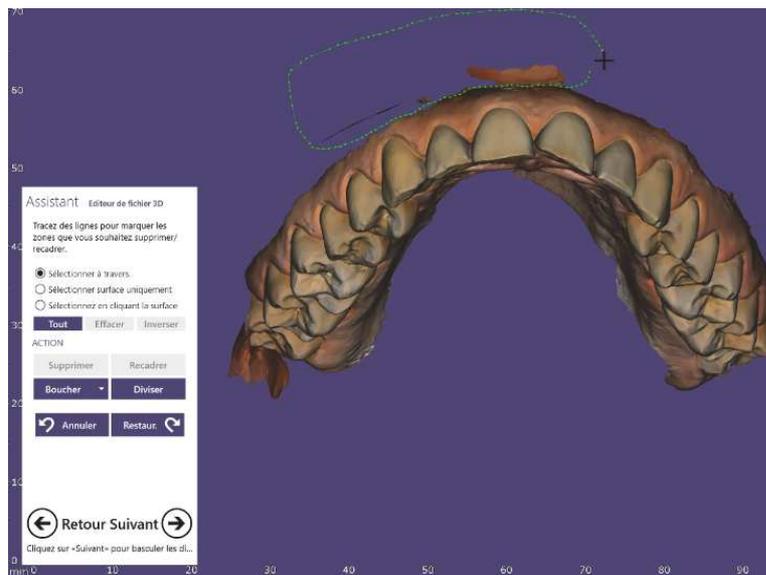


Figure 51 : Capture d'écran lors de la confection du modèle virtuel

Il faut commencer par sélectionner le type de modèle pour l'impression par stéréolithographie. En l'occurrence dans notre cas un type « *formlabs* ». Ensuite grâce à la touche Ctrl du clavier il faut orienter correctement le modèle.

Ensuite le logiciel propose d'éditer l'objet pour corriger le modèle 3D du maxillaire.

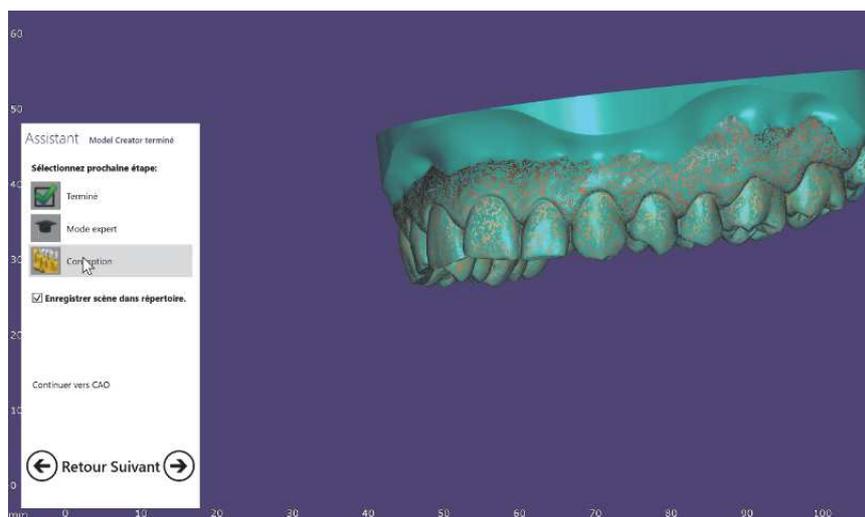


L'opérateur sélectionne et supprime les artefacts du scannage intra-oral. Ensuite il se laisse guider par l'assistant ; en cliquant successivement sur « suivant », il peut vérifier les paramètres du modèle.

Figure 52 : Capture d'écran lors de la confection du modèle virtuel

La sélection de la case pour la confection d'un modèle creux permet de réaliser des économies d'impression.

Il faut enfin cliquer sur suivant et sur exécuter pour achever la conception du modèle numérique.

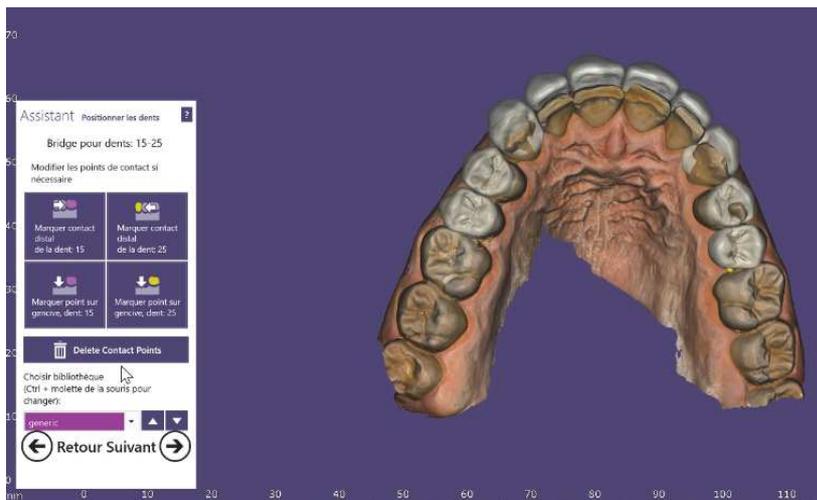


Une fois le modèle créé il convient de lancer le module de conception CAO.

Figure 53 : Capture d'écran après confection du modèle virtuel

2.2.4 Module « CAO »

L'assistant du logiciel demande alors de choisir la bibliothèque de dents à utiliser (Cf partie 2.2.5.1.3.). En fonction du sexe, de l'âge, de la forme du visage et des dents du patient, l'opérateur peut choisir la bibliothèque de dents compatible. Avec la touche *Ctrl* du clavier et la molette de la souris il lui est possible de défiler les différentes formes de dents proposées par le logiciel.



Indiquez la face distale de la 15 et de la 25 pour appliquer les dents de la bibliothèque sur l'arcade.

Figure 54 : Capture d'écran lors de l'application de la nouvelle forme de dent sur le modèle virtuel

Pour continuer, il faut sortir du mode « assistant » pour entrer dans le mode « expert » en cliquant sur l'icône expert à droite de la fenêtre.

2.2.4.1 Importer les fichiers

L'opérateur va désormais importer les autres scans : intra-oral (antagoniste), extra-oral (scan du visage) et scan de l'aligneur (si la méthode d'alignement choisie avant la séance d'acquisition est via un aligneur en méthode indirecte d'alignement Cf partie 2.2.4.2.2.).

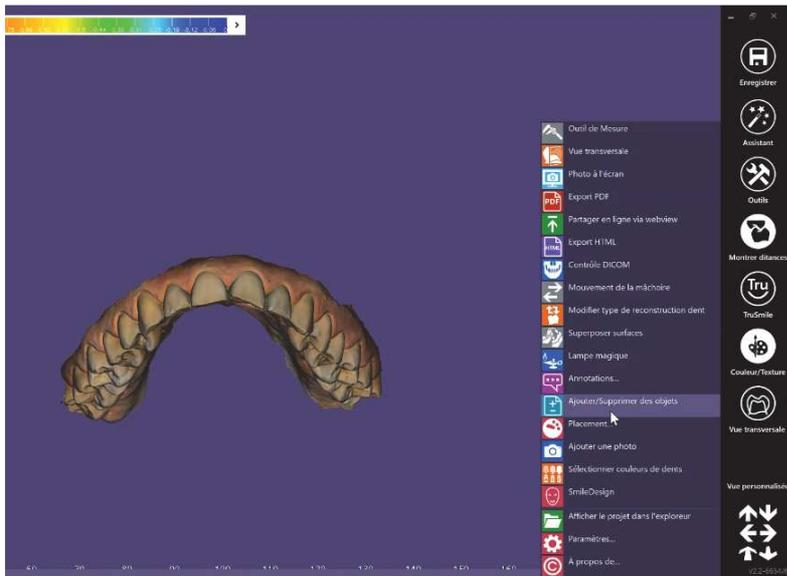


Figure 55 : Capture d'écran lors de l'ouverture de l'assistant "Ajouter/Supprimer des objets" dans Exocad®

Pour ce faire en mode « expert » cliquez sur « outils » puis sur « Ajouter/Supprimer des objets ».



Figure 56 : Assistant "Ajouter/Supprimer des objets" dans Exocad®

S'ouvre ensuite une petite fenêtre, permettant de choisir et d'importer un type de surface (« antagoniste » pour l'antagoniste, « scan de visage » pour le scan de visage, et « objet générique » pour le scan de l'aligneur buccal). Cette fenêtre permet également par la suite d'importer un plan pour guider notre mock-up numérique.

2.2.4.2 Alignement des scans

Une fois l'import du scan réalisé il faut l'aligner avec l'arcade déjà importée.

Cette étape est essentielle car garante de la bonne position dans l'espace des scans entre eux. Sera présenté dans cet écrit deux méthodes pour aligner les scans entre eux. Une méthode directe (dépendante de la qualité de la numérisation) utilisant des points de repère d'alignement et une méthode indirecte par le biais d'un aligneur (ce dernier apportera les points de repère permettant l'alignement). Dans les deux cas, le principe reste le même : trouver des points de repère présents sur différentes numérisations permettant ainsi de les aligner entre elles. Cependant la méthode indirecte demande une étape de scan et d'alignement supplémentaire.

Scan arcade dentaire		Scan visage « écarteur »	Scan visage « sourire »	Méthode directe
-Repères anatomiques et propres exclusivement au niveau des dents		-Repères anatomiques -Repères propres		
Scan arcade dentaire	Scan aligneur	Scan visage « aligneur »	Scan visage « sourire »	Méthode indirecte
-Aligneur oral exclusivement (partie intra-orale de l'aligneur)	-Aligneur oral exclusivement (partie extra-orale de l'aligneur)	-Aligneur frontal -Repères anatomiques et propres		

Tableau 1 : Comparaison des repères d'alignement entre les scans en méthode directe vs indirecte

Les deux méthodes peuvent se réaliser, soit grâce à un scanner, soit par photogrammétrie avec un appareil photo. Dans cette thèse est décrite la méthode indirecte avec un scanner du commerce (dont le prix n'est pas exorbitant mais dont la qualité ne permet pas de faire une méthode directe), et la méthode directe par photogrammétrie.

Ci-dessous un tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des deux méthodes, par scanner ou par photogrammétrie.

		Avantages	Inconvénients
Méthode directe	Scanner	<ul style="list-style-type: none"> • Précision et qualité du rendu • Facilité de réalisation du scan • Rapide et confortable pour le patient 	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement très important (>20K€)
	Photogrammétrie	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement faible : beaucoup de cabinet disposent déjà d'un bon appareil photo, et tous les prothésistes travaillant par CFAO disposent d'un ordinateur suffisamment puissant) • Précision et qualité du rendu • Pas d'aligneur nécessaire (étape en moins) 	<ul style="list-style-type: none"> • Protocole et méthode plus compliqués • Connaissance en photogrammétrie • Temps de calcul longs (optimisation du temps de travail nécessaire pour le prothésiste)
Méthode indirecte	Scanner	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de réalisation du scan • Rapide = confort pour le patient 	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement plus important mais pas excessif (entre 500€ et 1K€) • Précision et qualité du rendu moindre • Déformation aux extrémités du scan • Utilisation d'un aligneur (étape en plus)
	Photogrammétrie	<ul style="list-style-type: none"> • Investissement faible • Ne nécessite pas une qualité aussi grande au niveau des dents car utilisation d'un aligneur (moins de photos, temps de calcul plus rapide, confort pour le patient) 	<ul style="list-style-type: none"> • Protocole et méthode • Connaissance en photogrammétrie

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des méthodes directe et indirecte par scannage ou par photogrammétrie

2.2.4.2.1 Méthode directe

L'alignement direct se fait sans aligneur ou transfert, mais le principe reste le même qu'avec un aligneur ; trouver des points de repère fixes, invariables, présents sur les différents scans (en l'occurrence dans la méthode directe il s'agit de points de repère au niveau des dents et dans la méthode indirecte de repères sur l'aligneur) afin d'aligner les différents scans entre eux. L'opérateur doit donc fixer les points de repère manuellement sur les différentes numérisations pour aider le logiciel à positionner de la manière la plus précise possible les différents objets numériques entre eux. Il faut que les points de repère soient précis et visibles sur les deux scans à aligner. C'est pour

cette raison que dans la méthode directe il faut réaliser un scan du visage « intermédiaire » avec un écarteur. Il permet d'obtenir un scan plus précis au niveau des dents et offre une multitude de points de repère, permettant ainsi l'alignement le plus précis possible ; dans un premier temps du scan de la mâchoire avec le scan du visage « écarteur » et dans un second temps les deux scans de visage entre eux. Une fois l'alignement réalisé, le scan du visage avec écarteur n'est plus utile et peut donc être supprimé, le scan du visage en sourire et l'empreinte optique intra-orale restent alignés.

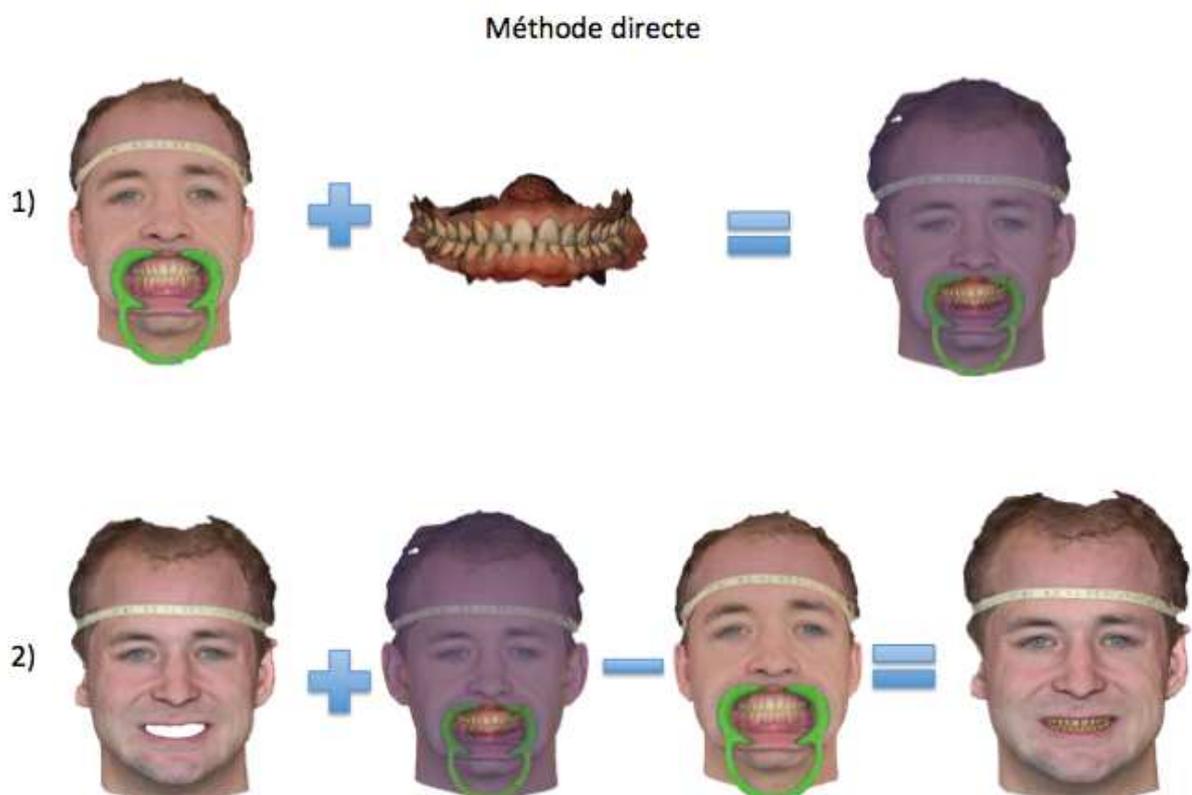


Figure 57 : Principe de la méthode directe pour l'alignement des scans intra- et extra-oral entre eux

C'est en 2008 que Rangel et al (40) décrivent pour la première fois cette méthode dans la littérature. Rosati et Riccardo (41) utilisent cette méthode. Ils placent trois repères faciaux et trois repères dentaires, et vont ensuite mesurer les distances qui séparent les repères faciaux des repères dentaires ; *in vivo* et numériquement afin de comparer les résultats. Ils n'ont trouvé aucune différences significatives entre les distances réelles et les distances numériques et témoignent ainsi de la précision de l'alignement réalisé.

2.2.4.2.1.1 Les points de repères d'alignement

Il existe deux types de points de repères utiles pour la méthode directe : les repères anatomiques et les repères propres. Dans la méthode indirecte les points de repère se matérialisent grâce à l'aligneur oral et frontal. Mais il sera également possible d'utiliser les points de repère anatomiques et propres lors de l'alignement des scans avec et sans aligneur oral.

2.2.4.2.1.1.1 Les repères anatomiques

Les repères communs sont, à l'inverse des repères propres, ceux présents et communs à toute la population pouvant être utilisés pour le protocole décrit. Ces repères doivent être immobiles (vis-à-vis des éléments fixes de la tête comme les dents, les os du cranes ...) entre les deux numérisations différentes du visage.

Massoud et al. (42) utilisent le centre des pupilles, le canthus interne, la limite des sourcils et le zénith des sourcils.

2.2.4.2.1.1.2 Les repères propres

D'autres repères comme les petits détails du visage peuvent être utiles. Pour tous les repères « propres », l'opérateur doit impérativement veiller à l'immobilité du repère entre les deux expressions du visage avant la prise de clichés. Il faut demander au sujet de passer successivement et de manière répétée entre les deux expressions du visage (repos et sourire forcé) afin de voir si le repère supposé est fixe ou non. A titre d'exemple les grains de beauté, un bouton d'acné, la limite d'une ride ou encore une cicatrice pourront se révéler être des repères utiles.

Il est également possible de fixer un repère manuellement avec un marqueur ou un eyeliner (facilement retiré en fin de séance avec un produit démaquillant).

2.2.4.2.1.1.3 Les dents

La position sourire forcé laisse apparaître les dents ; celles-ci peuvent donc être utilisées comme repère pour aligner les scans du visage. Mais c'est surtout lors de l'alignement du scan intra-oral avec le scan du visage « écarteur » dans la méthode directe que ces points de repère trouvent leur plus grand intérêt.

Le point de contact entre deux dents, le sommet d'une papille, les embrasures incisales et gingivales, le zénith d'une dent (en cas de sourire gingival) sont autant de repères possibles. Il est également possible de marquer un repère sur une dent à l'aide d'un crayon gras, en veillant à ce que le repère ne s'estompe pas entre les deux séquences.

2.2.4.2.1.1.4 Zone des yeux

Le centre des pupilles ne peut être utilisé comme repère que si le patient fixe une « cible de vue » et que la position de sa tête ne change pas tout au long des deux séries de photographies. Les centres des pupilles et les canthus internes sont les repères communs primordiaux de cette zone.

2.2.4.2.1.1.5 Zone du nez

Au niveau de cette zone entre la racine et l'arête du nez (passant par la voute du nez) l'opérateur dispose de repères possibles car immobiles chez la plupart des sujets. Il faut néanmoins s'assurer de leur l'immobilité et marquer un point manuellement si aucune caractéristique propre n'est présente et visible dans cette zone.

2.2.4.2.1.1.6 Tiers supérieur de la face

Aucun repère commun n'est présent dans cette zone, uniquement des repères propres.

2.2.4.2.1.2 Aligner le scan du visage « écarteur » avec empreinte intra-oral des arcades dentaires

Pour l'alignement direct du scan « écarteur » avec les empreintes des arcades dentaires il faut trouver des points de concordance visibles sur les deux scans, donc sur les arcades dentaires. Le minimum étant de trouver trois repères.



Une fois que l'opérateur a importé le scan du visage, la boîte de dialogue « Ajouter/Supprimer des objets » lui propose de superposer les surfaces.

Figure 58 : Capture d'écran de l'assistant « Ajouter/Supprimer des objets »



Il faut ensuite sélectionner les points de repères entre les scans puis valider pour effectuer le couplage.

Figure 59 : Capture d'écran lors de l'étape d'alignement des scans intra- et extra-oral entre eux

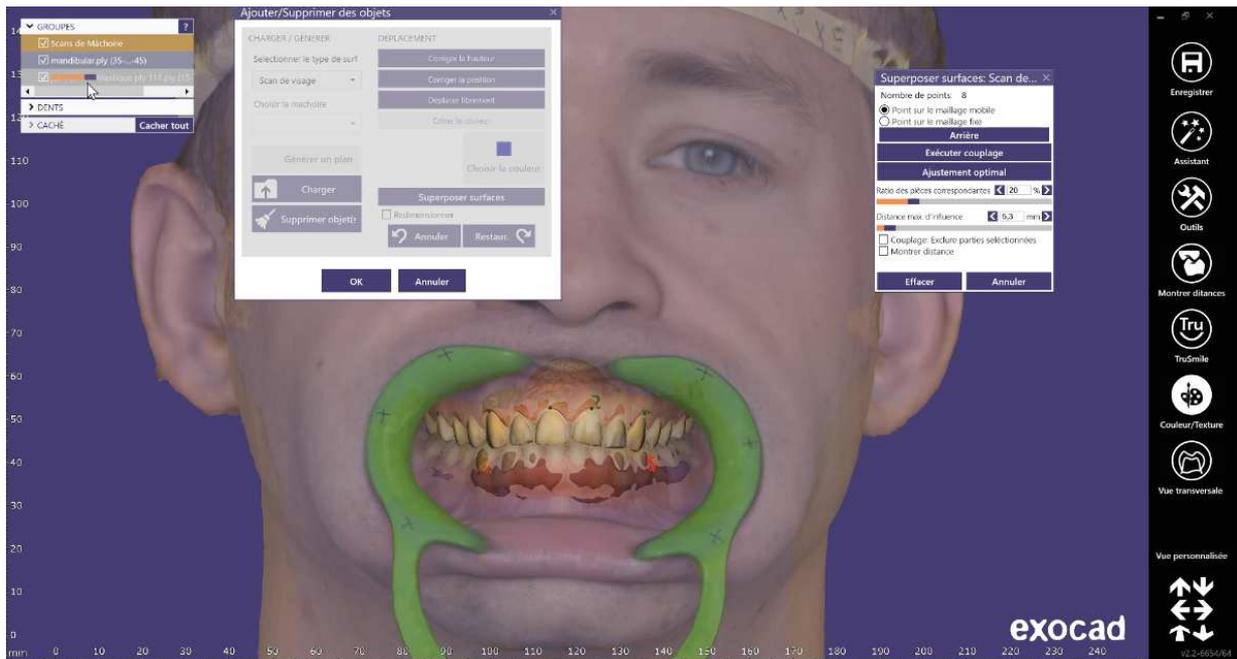


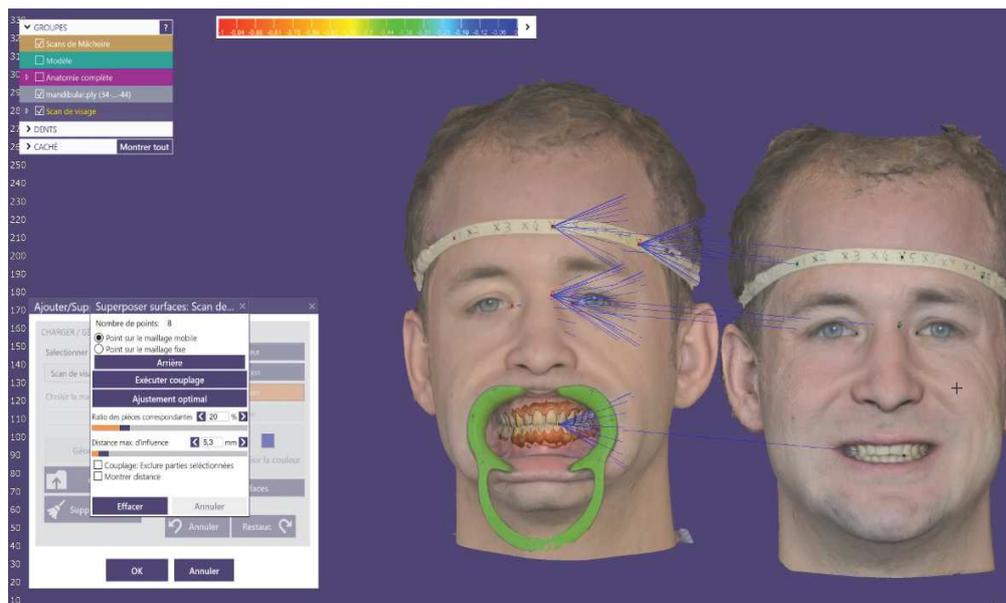
Figure 60 : Capture d'écran après l'alignement des scans intra- et extra-oral entre eux

L'opérateur obtient ainsi l'alignement du scan « écarteur » avec le scan intra-orale des arcades.

L'assistant « Ajouter/Supprimer des objets » propose un « ajustement optimal » qui, grâce à un algorithme, réalise le couplage en fonction des surfaces des maillages. Mais pour que l'alignement soit bon, il est nécessaire que la numérisation offre un maillage exact et précis, sans quoi l'alignement peut être erroné. Cette option n'est donc pas utilisée ; l'alignement se fait manuellement et visuellement en fixant des points de repère sur la texture de l'objet 3D.

2.2.4.2.1.3 Aligner le scan du visage « sourire » avec scan du visage « écarteur »

Il s'agit ici de trouver des points de repère invariables entre les deux positions du visage, au repos avec l'écarteur, et le sourire forcé, sur lesquels il est possible de se baser pour aligner les deux scans de visage.

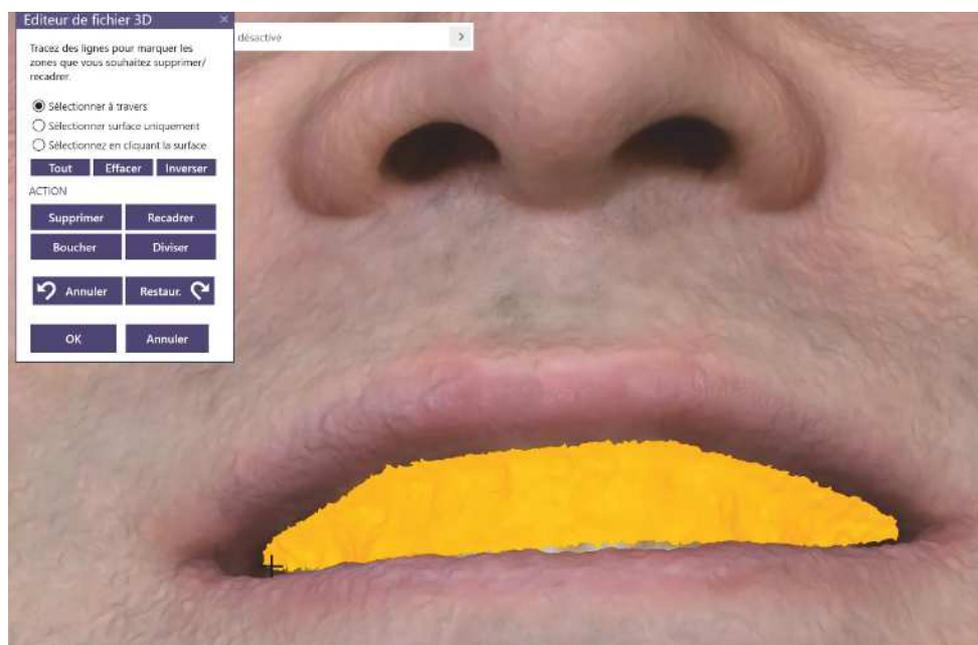


Ici des points de repères dessinés sur un élastique placé sur le front du patient et dont la position n'a pas bougé entre les deux scans est utilisé.

Figure 61 : Capture d'écran lors de l'étape d'alignement des scans extra-oral entre eux

Une fois le tout aligné, il faut découper la zone des dents du scan « sourire » afin de laisser apparaître le scan des arcades dentaires.

Pour ce faire : clique droit sur l'objet -> « éditer les surfaces »



L'opérateur sélectionne alors la zone à découper en prenant soin de ne pas découper les lèvres et leur bombé. Ensuite il clique sur « supprimer » puis « OK » pour valider.

Figure 62 : Capture d'écran de l'étape de découpe de la zone des dents sur la numérisation extra-buccale "sourire forcé"

Note : plus la densité du maillage est grande, moins la découpe de la lèvre a un aspect en « dent-de-scie ».

Une taille des polygones du maillage inférieure à 1/10ème de millimètres permet d'éviter une découpe apparaissant en dent de scie.

Il obtient ainsi le scan intra-oral des arcades dentaires aligné avec le scan extra-oral du visage.



Figure 63 : Résultat final après alignement des scans

2.2.4.2.2 Méthode indirecte (par le biais d'un aligneur)

Un « aligneur » est un dispositif intra- et extra-oral permettant de réaliser l'alignement précis entre le scan intra-oral des dents et le scan extra-oral du visage. Il faut, dans cette méthode, réaliser un scan du visage avec et sans l'aligneur, un scan intra-oral et un scan de l'aligneur.

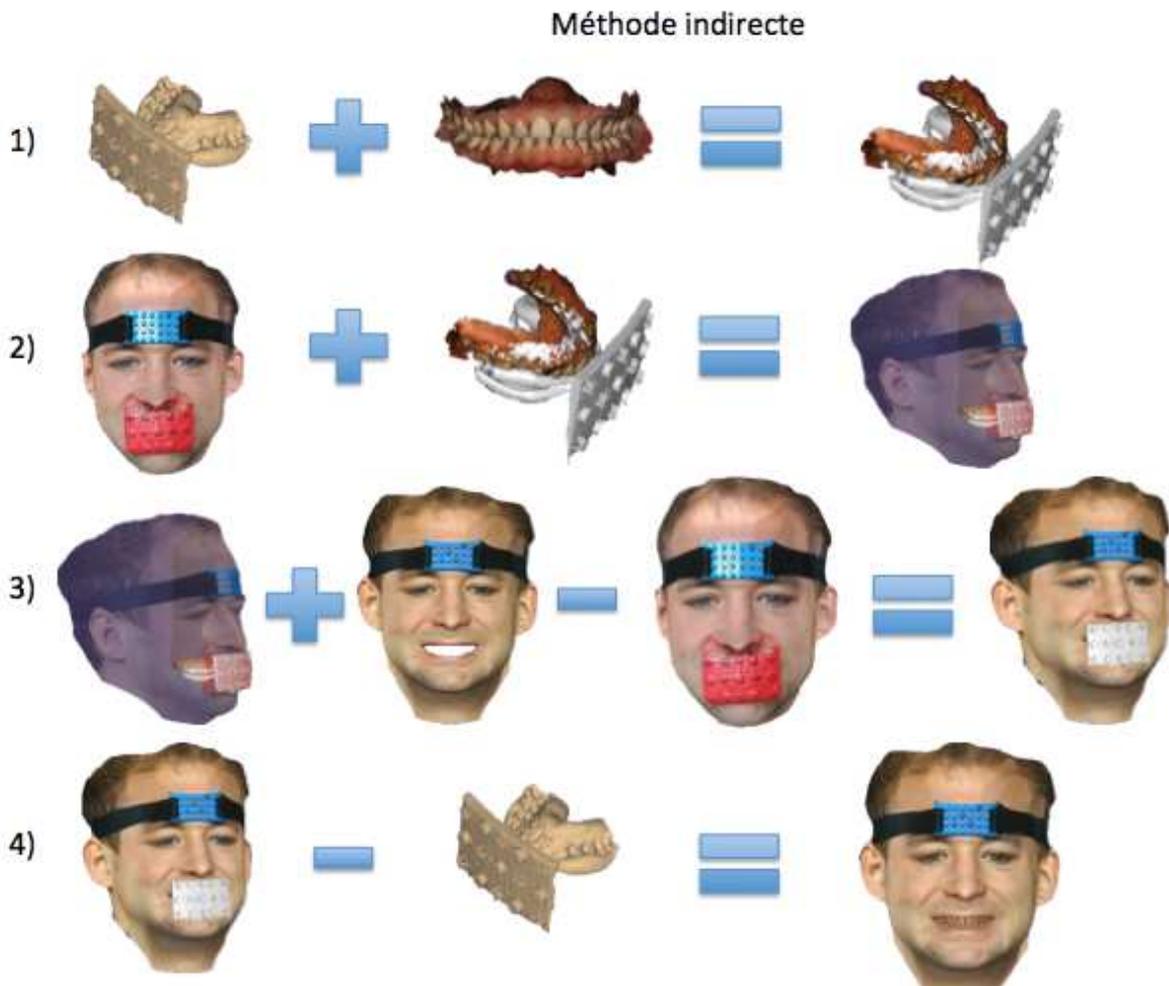


Figure 64 : Principe de la méthode indirecte pour l'alignement des scans intra- et extra- oral entre eux

La partie intra-orale de l'aligneur est un mordue occlusal. Cette partie permet d'aligner numériquement le scan de l'aligneur avec le scan intra-oral des dents (1). La partie extra-orale de l'aligneur permet-elle d'aligner le scan de l'aligneur avec le scan extra-oral du visage (2). Cela permet d'obtenir un scan intra-oral des dents, alignées avec l'aligneur, lui-même aligné avec le scan extra-oral du visage, et ainsi obtenir un scan intra-oral aligné avec le scan extra-oral. Il faut ensuite aligner le tout avec le scan du

visage en sourire et soustraire le scan du visage aligneur buccal en place. Ainsi est obtenu l'alignement entre le scan du sourire et le scan de l'aligneur (3). En y soustrayant cette fois le scan de l'aligneur, l'opérateur obtient donc le scan du visage « sourire », aligné avec le scan des arcades dentaires (4).

Cette méthode a pour avantage de ne pas nécessiter une grande précision ou qualité de scan extra-oral du visage car l'aligneur permet de mettre dans la bonne position spatiale entre eux les scans intra- et extra-oral.

2.2.4.2.2.1 Différents types d'aligneurs

Sur le principe, différents dispositifs peuvent servir d'aligneur. L'essentiel étant que le dispositif possède, sur les différentes numérisations, des points de repère ou de fixation permettant de réaliser l'alignement. Depuis peu, une société a commencé la production d'un aligneur permettant d'appliquer facilement cette méthode. Mais il n'est pas très compliqué de confectionner un tel dispositif. Dans le cas d'édenté complet par exemple, le bourrelet d'occlusion peut également faire office d'aligneur s'il possède assez de points de repère.

2.2.4.2.2.1.1 Du commerce

Il existe désormais des systèmes d'aligneur vendus dans le commerce comme celui de AFT dental system® qui vend un aligneur frontal et des aligneurs buccaux (appelés *Scanbody Face* et *Scanbody Teeth*) accompagnés d'une tablette et du système Bellus®. Néanmoins ces systèmes restent encore très coûteux au regard de la simplicité du produit.



À droite le *Scanbody Teeth* et à gauche le *Scanbody Face* se fixant sur le front.

Figure 65 : Aligneurs de la société AFT dental system®

2.2.4.2.2.1.2 Bourrelets d'occlusion pour édenté complet

Schweiger et al. (43) ont réalisé l'intégration des arcades édentées d'un patient dans le scan du visage par le biais des bourrelets d'occlusion. Après avoir réalisé les empreintes secondaires, lors de la séance suivante et après avoir ajusté la RIMM, ils réalisent un scan « sourire » et un scan « avec écarteurs » avec les bourrelets d'occlusion en place.

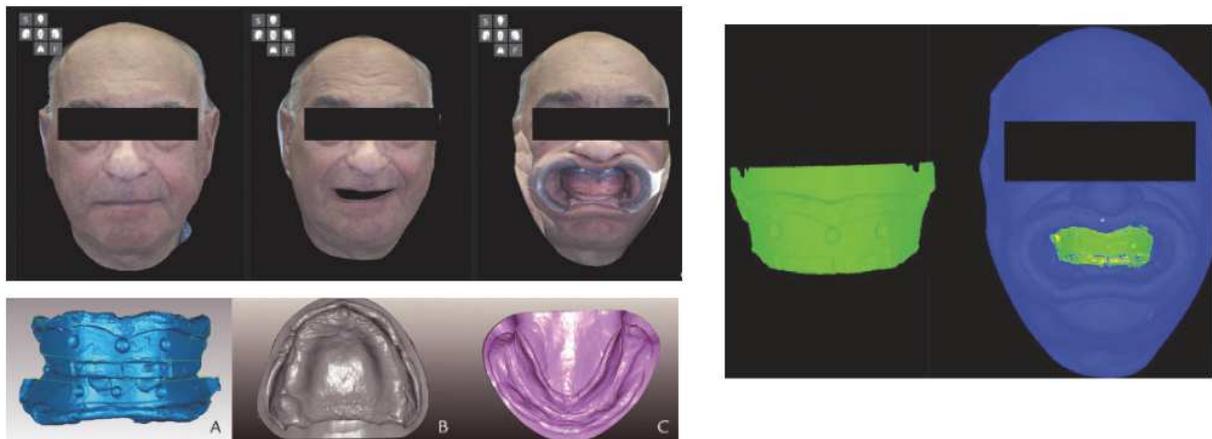


Figure 66 : Numérisations du visage, des empreintes maxillaires et mandibulaires et du bourrelet d'occlusion ainsi que leurs alignements (Schweiger et al.)

En scannant ensuite lesdits bourrelets en occlusion ils peuvent alors intégrer les arcades édentées (avec la DVO correctement ajustée) dans le visage numérisé du patient (grâce à des points de repère sur les bourrelets d'occlusion) et ainsi réaliser le montage de dents virtuellement, en fonction du plan pupillaire, du plan médian sagittal et du plan de Camper.

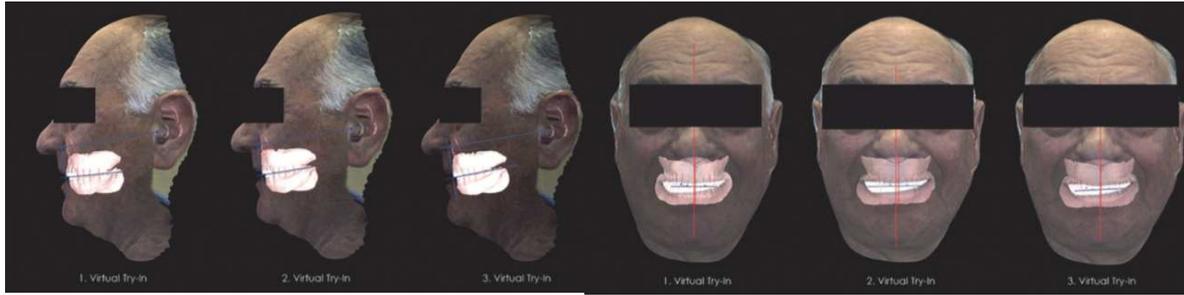


Figure 67 : Elaboration du projet prothétique en fonction du visage (Schweiger et al.)

Dans ce cas, ils ne font pas d'essayage des maquettes, si ce n'est que virtuellement. Cela pourrait se supposer possible dans un future proche à condition d'avoir enregistré au préalable les mouvements mandibulaires d'articulation dynamique du patient (certains systèmes novateurs comme Modjaw® permettent aujourd'hui d'enregistrer virtuellement les mouvements d'occlusion statiques et dynamiques). À noter qu'il n'existe à ce jour aucun moyen de faire une simulation phonétique, ni d'enregistrer l'impact des tissus mous ou des muscles péribuccaux sur la prothèse lors des mouvements de mastication ou lors de la parole.

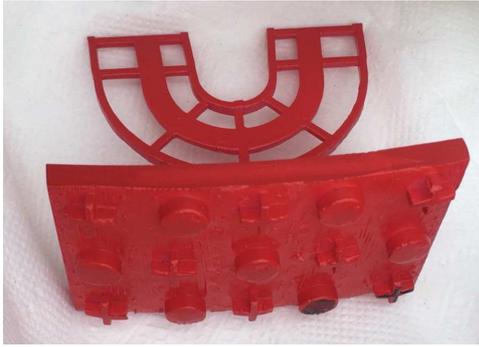
2.2.4.2.2.1.3 Aligneur « fait-maison »

Il n'est pas difficile de réaliser son propre aligneur buccal ; cet objet est constitué d'une partie extra-buccale (permettant d'aligner le scan du visage avec le scan de l'aligneur) et d'une partie intra-buccal où se trouve l'empreinte du mordu permettant d'aligner le scan de l'arcade supérieure avec le scan de l'aligneur. (44)



Lam et al. ont fabriqué leur propre aligneur grâce à deux porte-empreintes du commerce avec de la résine et une petite plaque de Lego® pour assembler les porte-empreintes entre eux.

Figure 68 : Aligneur oral réalisé par Lam et al.



Pour l'application par scannage Bellus® en méthode indirecte, un aligneur a été modélisé pour les besoins du présent écrit. Il ne coûte qu'une vingtaine d'euros d'impression.

Figure 69 : Aligneur oral

2.2.4.2.2.2 Aligner le scan intra-oral avec le scan de l'aligneur

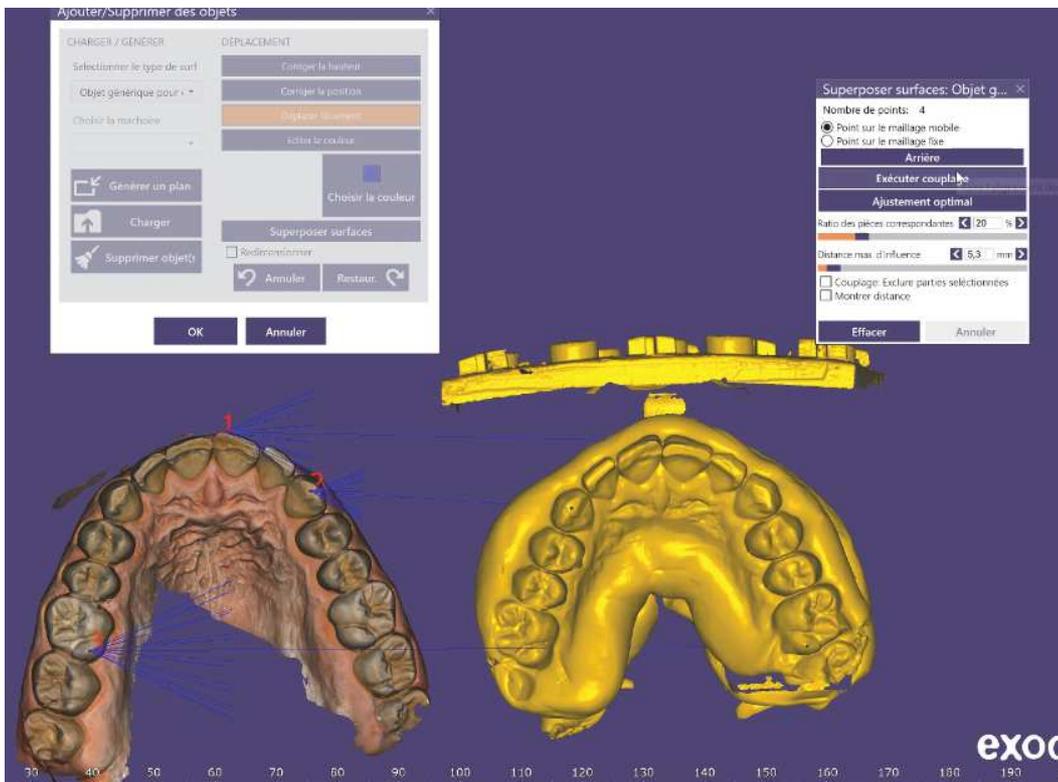


Figure 70 : Capture d'écran lors de l'étape d'alignement du scan du maxillaire avec celui de l'aligneur oral

Après avoir importé le scan de l'aligneur dans Exocad®, l'opérateur doit superposer les surfaces. Il fixe plusieurs points de repère, clique sur « exécuter couplage » puis sur « ajustement optimal » et il valide.

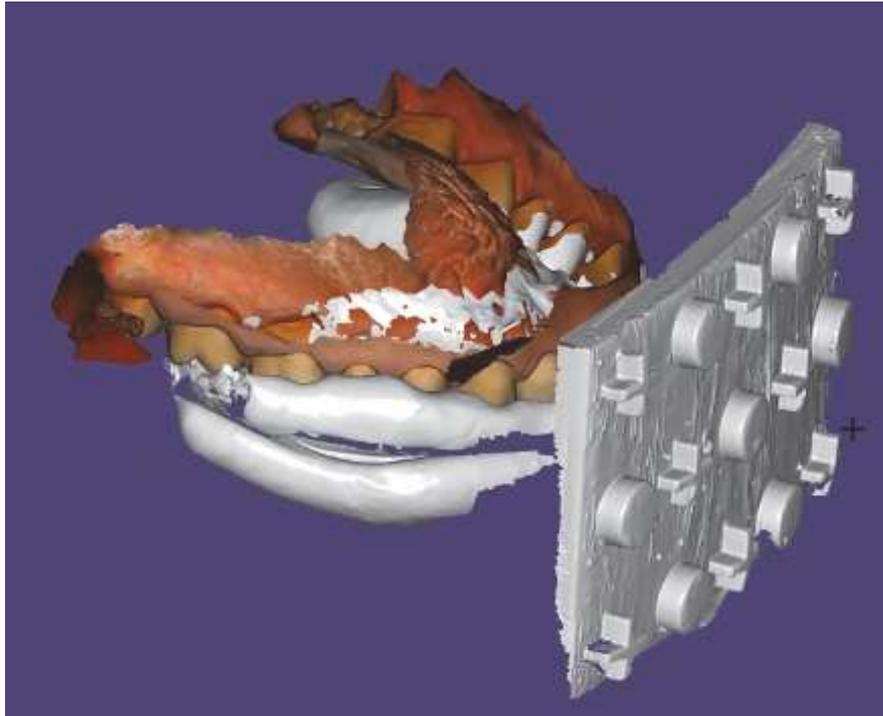


Figure 71 : Résultat après alignement du scan maxillaire avec l'aligneur oral

Il obtient ainsi un alignement entre le scan intra-oral des arcades et le scan de l'aligneur.

Note : L'aligneur a été scanné avec un simple scanner de bureau dont disposent quasi tous les prothésistes travaillant par CFAO.

2.2.4.2.2.3 Aligner le scan du visage « aligneur buccal et frontal en place » avec le scan de l'aligneur

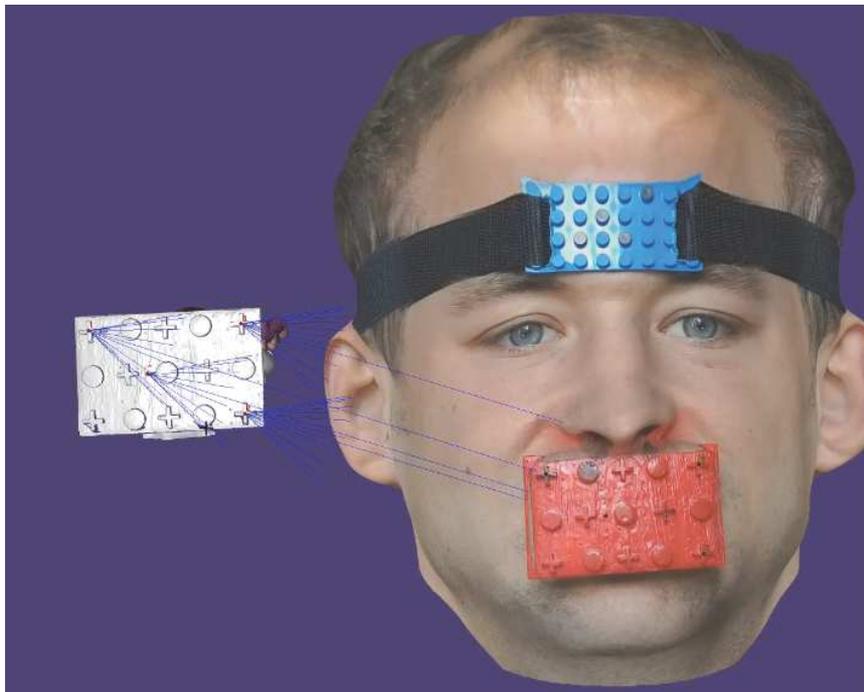


Figure 72 : Capture d'écran lors de l'étape d'alignement du scan extra-oral avec le scan de l'aligneur

Il faut répéter la même procédure. Indiquer au logiciel les points de repère sur les deux scans et exécuter le couplage.

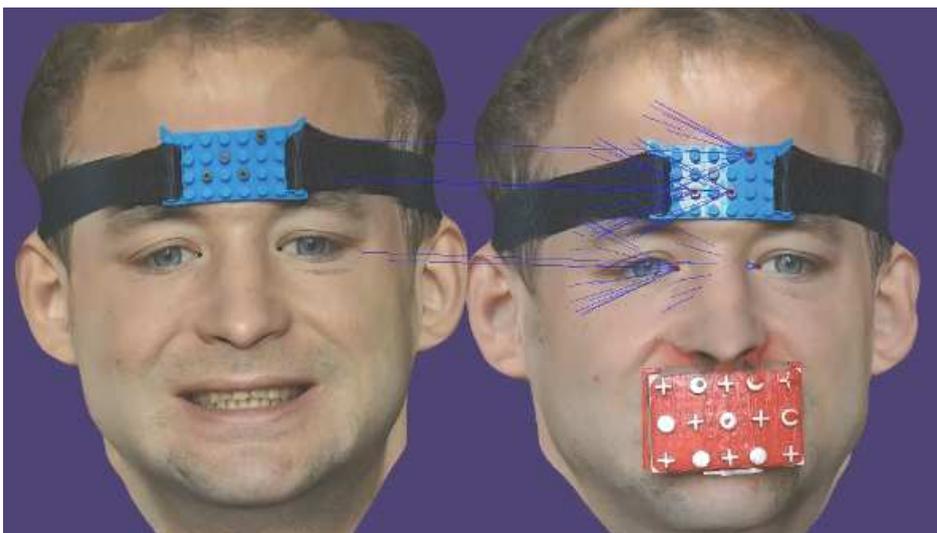
Les reliefs de l'aligneur servent pour trouver des points de repère précis.



Les trois scans que sont le scan intra-buccal, le scan de l'aligneur et le scan du visage « aligneur buccal et frontal en place » sont désormais alignés.

Figure 73 : Résultat après alignement du scan de l'aligneur oral avec le scan du visage

2.2.4.2.2.4 Aligner le scan du visage « aligneur buccal et frontal en place » avec le scan du visage « sourire aligneur frontal en place »



Ici, des points de repère sur l'aligneur frontal et des points de repère anatomiques (canthus interne) permettent d'aligner les scans.

Figure 74 : Capture d'écran lors de l'étape d'alignement des scans extra-oral entre eux

Une fois le couplage réalisé, Il faut découper la zone des dents du scan « sourire et aligneur frontal en place » pour laisser apparaître les dents de l’empreinte optique. Cliquez droit sur le scan -> « *Editer les surfaces* » -> sélectionnez la zone à découper puis cliquez sur « *supprimer* ».

Ensuite grâce à la petite fenêtre d’aide à la visualisation des objets située en haut à droite de l’écran, il est possible de cacher les objets désormais inutiles que sont les scans de l’aligneur et du visage « aligneur frontal et buccal en place », ou même de les supprimer à partir de la fonction « *Ajouter/Supprimer des objets* ».



L’opérateur obtient ainsi un scan extra-oral du visage « sourire » aligné avec le scan intra-oral des arcades dentaires.

Figure 75 : Résultat final après alignement des scans

2.2.5 Wax-up (mock-up virtuel)

Une fois l'alignement correctement effectué, peut désormais commencer le projet prothétique esthétique en fonction des traits du visage. C'est en quelque sorte la réalisation un mock-up numérique. L'analyse esthétique permet dans un premier temps de diagnostiquer les défauts d'harmonie et ainsi de déterminer les points sur lesquels travailler dans un second temps. Certains points, lignes et plans de référence guident l'opérateur dans l'élaboration du projet prothétique.

2.2.5.1 Règles et critères esthétiques

2.2.5.1.1 Analyse de face et de profil

Il faut commencer par établir un certain nombre de références sur le visage (ligne et plan) pour guider la suite de notre analyse.

2.2.5.1.1.1 De face

- Ligne horizontale de référence

La première ligne horizontale de référence est la ligne bi-pupillaire. Comme son nom l'indique, elle se matérialise par une droite passant par le centre des deux pupilles.

Cette ligne représente dans 88,4% des cas la référence horizontale de référence. Et dans seulement 11,6% des cas présentant une asymétrie verticale et mixte, il est nécessaire alors de ne pas se servir de cette ligne de référence mais d'utiliser la ligne bi-commissurale (45–47).

La ligne bi-commissurale passe par les deux commissures labiales, celle-ci est en général parallèle à la ligne bi-pupillaire.

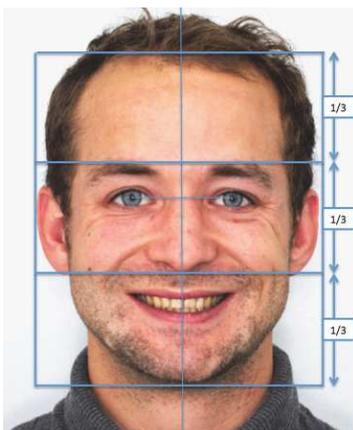
- Ligne verticale de référence



La ligne sagittale médiane du visage est la ligne de référence verticale dominante. Elle se matérialise par une droite qui passe par la glabella, le bout du nez, le philtrum et la pointe du menton. Cette ligne devrait être perpendiculaire à la ligne bi-pupillaire (un des nombreux critères mais pas des moins importants, d'un visage harmonieux).

Figure 76 : Photo de face avec visualisation de la ligne sagittale médiane et de la ligne bi-pupillaire

- Etages de la face

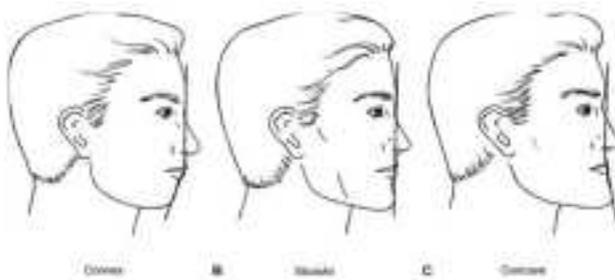


Le visage se décompose en trois étages qui devraient être de même proportion. Le tiers supérieur (du trichion au nasion), moyen (du nasion au point sous-nasal) et inférieur (du point sous-nasal à la limite inférieure du menton) de la face.

Figure 77 : Photo de face avec visualisation des trois étages de la face

2.2.5.1.1.2 De profil

- Profil



Le profil peut-être concave, droit ou convexe.

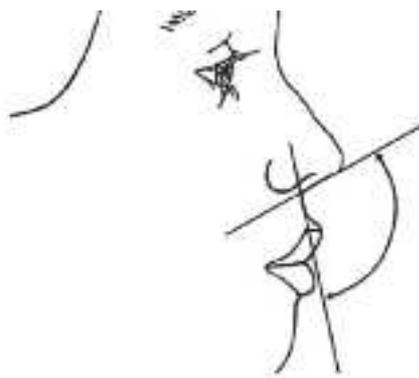
Figure 78 : Illustration des différents types de profils

- Plan de Camper et de Francfort

Le plan de Camper passe par le point sous-nasal et les tragus, le plan de Francfort lui passe par le plancher de l'orbite et au-dessus du méat acoustique externe.

Selon les résultats de Lee (48), en vue de profil, le plan esthétique se situe entre les plans de Frankfort et de Camper à environ 9° de chacun d'eux. Le respect de ce plan assure une bonne gestion de la courbure incisive. Si l'opérateur s'aligne sur le plan de Camper il aura tendance à rallonger les incisives centrales et inversement si il s'aligne sur le plan de Francfort.

- Angle naso-labial et plan de Ricketts



L'angle naso-labial est l'angle formé par l'intersection de la tangente de la base du nez et de la tangente au bord externe de la lèvre supérieure

Figure 79 : Illustration de l'angle naso-labial

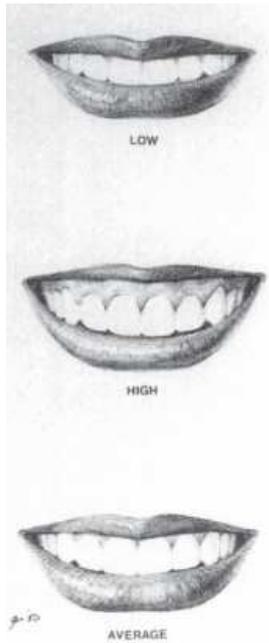
Les auteurs d'une étude (49) ont estimé que l'angle idéal chez la femme serait compris entre 100.9 et 108.9° et chez l'homme entre 90.7 et 103.3°.

Le plan esthétique de Ricketts passe par la pointe du nez et le pogonion. Selon Ricketts (50) pour un profil harmonieux, la lèvre supérieure se situe 4 millimètres en arrière de ce plan et la lèvre inférieure à 2 millimètres en arrière.

2.2.5.1.2 Analyse dento-labiale

- Type de sourire et ligne du sourire

La ligne du sourire se situe sur la face inférieure de la lèvre supérieure. Il existe différentes classifications du sourire en fonction du placement de cette ligne. Tjan et al. (51) classent le sourire en trois catégories :



- Sourire Haut lorsque la ligne du sourire est haute et découvre complètement les incisives maxillaires ainsi qu'un bandeau de gencive (10,57% de la population)
- Sourire moyen lorsque la ligne du sourire découvre 75 à 100% des incisive maxillaires et les papilles inter-dentaires (68,94% de la population)
- Sourire bas lorsque la ligne du sourire est basse et découvre moins de 75% des incisives maxillaires (20,48% de la population).

Figure 80 : Illustration des différentes catégories de sourires selon Tjan et al.

Liébart et collaborateurs (52) proposent eux une classification en fonction de la visibilité du parodonte.

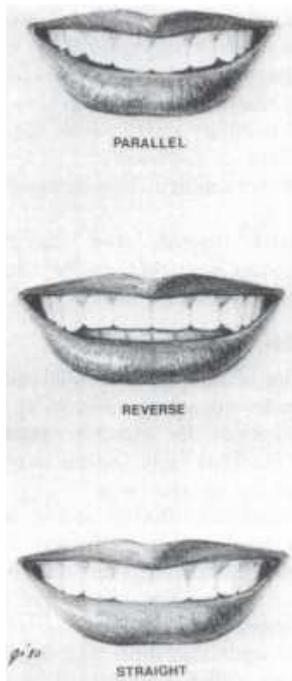
Classe 1 : Ligne du sourire très haute	Plus de 2 mm de gencive marginale sont visibles ou plus de 2mm apicalement à la jonction amélo-cémentaire (JEC) sont visibles sur un parodonte réduit, mais sain. Cela peut être apparenté au SOURIRE GINGIVAL.
Classe 2 : ligne du sourire haute	De 0 à 2mm de gencive marginale ou apicalement à la JEC sont visibles.
Classe 3 : ligne du sourire moyenne	Ne présente que les espaces inter-dentaires ou pas par les papilles.
Classe 4 : ligne du sourire basse	Le parodonte n'est pas visible.

Tableau 3 : Classification de la visibilité du sourire selon Liébart et collaborateurs

Selon la littérature, une exposition gingivale ne dépassant pas 3,0 mm est parfaitement acceptable, alors que des valeurs supérieures à 3,0 mm sont considérées comme non esthétiques (53–55).

- Notion de courbe incisive et ses rapports avec la lèvre inférieure

La courbe incisive (ou plan incisif) suit le bord libre des incisives maxillaires. Dans un sourire harmonieux, elle suit le bord supérieur de la lèvre inférieure. Tjan et al. (51) notent que 84,8% des sujets étudiés présentent un parallélisme entre le plan incisif et la lèvre inférieure accordant au sujet un sourire harmonieux. Les auteurs classent le rapport entre ce plan incisif et la lèvre inférieure en trois catégories :



- Parallèle (84,8% des sujets)
- Inversée (1,32% des sujets)
- Droite (13,88% des sujets)

Figure 81 : Illustration des différentes courbes du sourire (Tjan et al.)

Selon les mêmes auteurs (51), dans 46,61% des cas les incisives sont en contact avec la lèvre inférieure, dans 34,62% des cas il n'y a pas de contact et dans 15,76% des cas la lèvre inférieure va recouvrir le bord libre des incisives.

- Ligne inter-incisive maxillaire et angulation des milieux inter-incisifs

La ligne médiane inter-incisive maxillaire représente la référence verticale du sourire. Elle passe par les faces mésiales des deux incisives centrales. Cette ligne peut présenter trois types de défauts : une déviation vis-à-vis de la ligne sagittale médiane, une angulation vis-à-vis de la ligne sagittale médiane et les deux premiers défauts combinés.

Kokich et collaborateurs (53), montrent qu'une déviation inférieure à 4 millimètres n'est pas détectée par les dentistes et la population générale.

En revanche, une oblicité de cette ligne supérieure à 2 millimètres est jugée comme inesthétique, et aurait un impact plus important sur l'esthétique du sourire qu'une simple déviation par rapport à la ligne sagittale médiane.

- Corridor labial et largeur du sourire

Il s'agit de l'espace bilatéral entre la surface vestibulaire des dents postérieures maxillaires visibles et la commissure des lèvres lors du sourire. Il existe essentiellement trois types de corridors buccaux:

- large, généralement suivi d'un arc dentaire maxillaire étroit
- intermédiaire, dimensions transversales de l'arcade maxillaire intermédiaire
- étroit ou inexistant, associé à de larges arcades dentaires transversales

La littérature ne présente pas de consensus sur l'impact esthétique du corridor buccal sur le sourire. Alors que certaines études démontrent que différents corridors buccaux n'affectent pas l'esthétique du sourire, d'autres affirment le contraire (56,57).

2.2.5.1.3 Analyse dentaire

- Rapport entre les lignes inter-incisives maxillaires et mandibulaires

Idéalement la ligne inter-incisive mandibulaire est en continuité avec la ligne inter-incisive maxillaire. Mais un léger décalage n'est pas considéré comme étant inesthétique.

- Dimension relative et proportion des dents entre elles

De nombreux auteurs (47,58) s'accordent pour dire que les incisives centrales supérieures sont les principaux déterminants de l'évaluation de l'esthétique antérieure.

Le clinicien doit enregistrer la largeur et la hauteur des couronnes cliniques des incisives centrales maxillaires afin de déterminer le rapport largeur sur longueur.

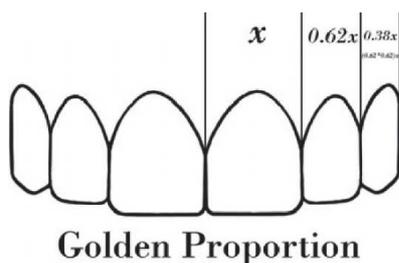
Les incisives centrales esthétiques ont généralement une couronne de 9,5 à 11 mm de hauteur.

Dans une étude de Wolfart (56), les ratios largeur / longueur ont été jugés les plus intéressants esthétiquement parlant, dans une fourchette de 75 à 85%.

Concernant les proportions entre les incisives centrales, les latérales et les canines, Lombardi a été le premier en 1973 à publier sur l'existence d'une proportion suivant le nombre d'or comme étant le plus esthétique (58). Il utilise le terme de proportion d'or avec un ratio de 1.61803 pour 1.

La proportion d'or est basée sur la théorie selon laquelle il existe une relation entre la beauté dans la nature et les mathématiques.

Lombardi applique donc le nombre d'or aux proportions dentaires et par ce biais estime que l'incisive latérale maxillaire devrait faire 62% de la largeur de l'incisive centrale supérieure, et la largeur de la canine maxillaire doit faire 62% de la largeur de l'incisive latérale résultante.



Lombardi applique donc le nombre d'or aux proportions dentaires et par ce biais estime que l'incisive latérale maxillaire devrait faire 62% de la largeur de l'incisive centrale supérieure, et la largeur de la canine maxillaire doit faire 62% de la largeur de l'incisive latérale résultante.

Mais d'autres auteurs ne sont pas en accord avec cette théorie et disent que des preuves manquent pour soutenir cette idée de « Golden Ratio », d'autres en réfutent complètement l'existence ou soutiennent qu'elle n'est pas acceptable esthétiquement (59–61).

Dalaie et al (62) ont réalisé une revue de littérature et ont examiné les proportions dentaires les plus communes et leur relation avec la longueur des dents antérieures maxillaires pour obtenir une esthétique agréable.

Ils ont conclu que les proportions les plus attrayantes sont fonctions de la longueur des dents. Pour des dents longues, la proportion d'or est rapportée comme la plus esthétique, mais pour des dents de longueur moyenne, la proportion 70% RED (Recurrent Esthetic Dental) est jugée comme la plus esthétique.

Il existe une multitude de proportions différentes proposées (Golden ration, golden mean, Preston, RED, Plato Beauty Proportion, Esthetic norm Proportion, Quarter 3:4 Proportion, Human norm 5:6 Proportion) et il convient à l'opérateur de choisir en accord avec le patient la proportion la plus adaptée en prenant en compte la forme du visage, la longueur des dents antérieures maxillaires, l'âge et le sexe.

Ces proportions sont valables en vue de face au visage, elles s'appliquent sur un plan en deux dimensions.

- Contact dentaire

En secteur antérieur, ce ne sont plus des points de contact mais de surface de contact. Stappert et al. (63) démontrent que cette zone de contact est la plus grande entre les

deux incisives centrales et que cette zone diminue de manière antéropostérieure entre les incisives centrales maxillaires et les premières prémolaires bilatéralement, de 4 à 3 et de 2 à 1,5 mm, respectivement.

D'autres auteurs ont démontré que la hauteur de la zone de contact diminuait de manière antéro-postérieure (64) ; plus on se rapproche des dents postérieures, plus cette zone de contact devient un point de contact, et plus elle se situe apicalement.

- Axe des dents et notion de visagisme

On compare l'axe longitudinal des dents à la référence axiale verticale, la ligne médiane sagittale.

De l'incisive centrale à la canine, il doit y avoir une augmentation naturelle et progressive de l'inclinaison mésiale de chaque dent ultérieure (65).

Le visagisme est un concept dont la mise en application dentaire a été faite par Paolucci, Calamita et al (66). Il est utilisé pour décrire différents types de visage :

- Colérique / forte: Ce type d'individu a une face rectangulaire formée par des angles bien définis, des lignes verticales et horizontales autour du front et de la bouche, ainsi que des yeux profondément enfoncés. Les individus colériques / forts ont une personnalité caractérisée par de fortes qualités de leadership, un esprit de décision, de l'audace et de l'intrépidité.
- Sanguine / dynamique: Ce type d'individu a un visage anguleux formé de lignes obliques autour des yeux et du front, un nez proéminent et une bouche large. L'individu sanguin / dynamique est un extraverti actif et communicatif.
- Mélancolique / sensible: Ce type d'individu a les yeux rapprochés et un visage ovale avec des traits arrondis ou formés de fines lignes. La personnalité mélancolique / sensible est douce et a une capacité de conscience et de pensée abstraite.
- Flegmatique / pacifique: Ce type d'individu est doux, discret et diplomate; il a un visage rond ou carré, des lèvres inférieures saillantes et des paupières lourdes.

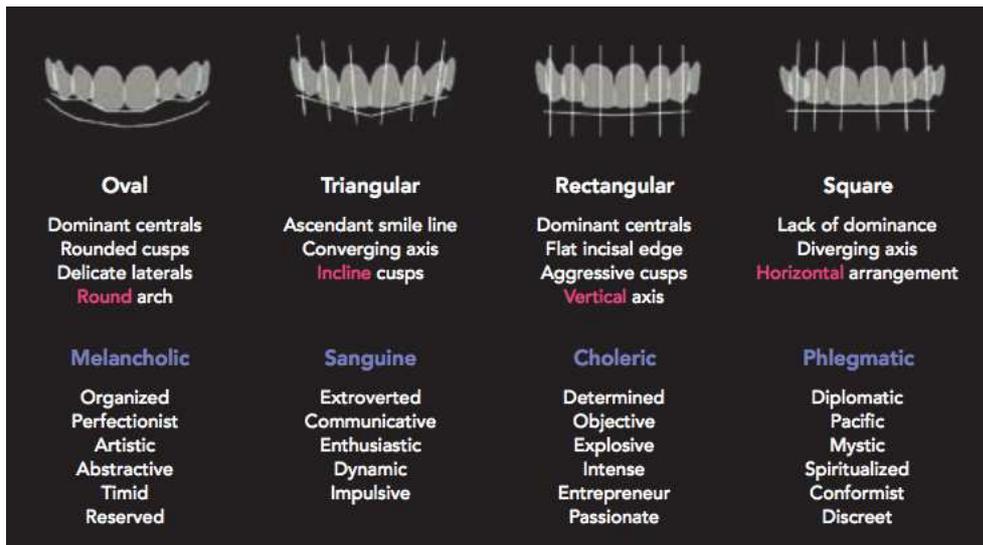


Figure 82 : Les différentes formes d'arcades dentaires antérieures et leurs relations avec le tempérament (Paolucci, Calamita, Coachman et al.)

- Forme des dents et de l'arcade

Les mêmes auteurs (66) ont classé les formes de dents antérieures en quatre catégories : ovale, triangulaire, rectangulaire et carrée

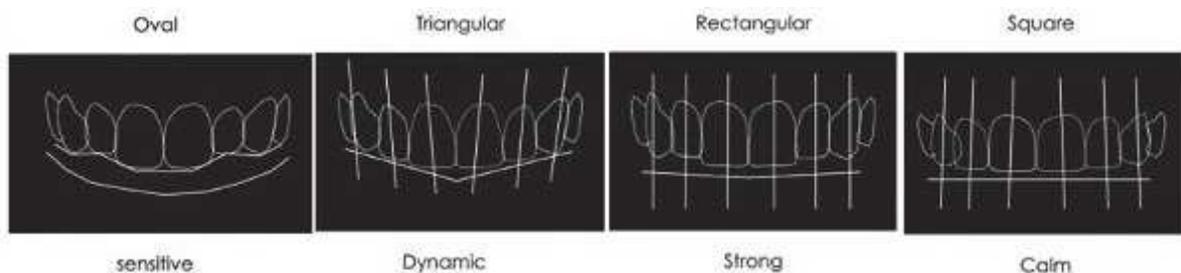
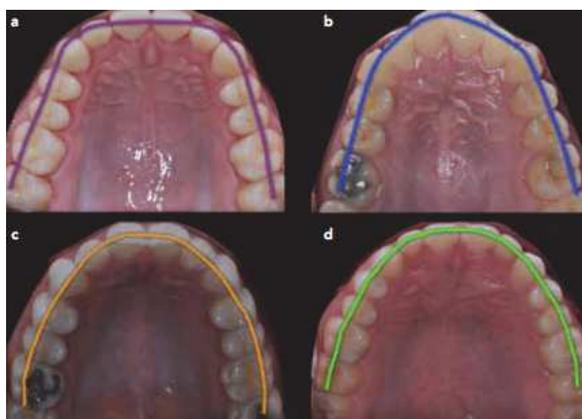


Figure 83 : Schéma des différentes catégories de formes des dents (Paolucci, Calamita, Coachman et al.)

Ils catégorisent également les différentes formes d'arcades dentaires :



- a) Carrée
- b) Triangulaire
- c) Ovale
- d) Circulaire

Figure 84 : Les différentes formes d'arcades (Paolucci, Calamita, Coachman et al.)

- Banque de données dentaires

Avec l'apparition de la CFAO, la banque de données de formes dentaires a explosé. Chaque personne le souhaitant peut désormais créer ses propres formes de dents avec n'importe quel logiciel de modélisation dentaire. Il existe aujourd'hui des groupes de réseaux sociaux où des passionnés partagent leur travail de modélisation. Ces groupes donnent par exemple accès à différentes formes, différents états de surface, des bords libres abîmés, une multitude de choix qui permet de trouver la bonne forme des dents en fonction de la personne, son caractère, son âge, son sexe, etc...

- Symétrie

La symétrie joue un rôle clé pour l'harmonie du sourire. Cette symétrie se fait par rapport à l'axe médian. Toute asymétrie proche de l'axe médian est à éviter. Les asymétries légères ne sont pas forcément perçues mais il faut toujours essayer de se rapprocher d'un résultat le plus symétrique possible.

- Couleur

La couleur est un facteur à prendre en compte lors de l'analyse du sourire, ainsi que ses cinq dimensions (la luminosité, la saturation, l'intensité, la caractérisation et l'opalescence).

2.2.5.1.4 Analyse gingivale

- Fermeture des embrasures et hauteur des papilles inter-dentaires

Les papilles inter-dentaires doivent être suffisamment hautes pour permettre de fermer les embrasures gingivales et ainsi éviter la formation de « triangles noirs ».

Tarnow DP et al. (67) ont démontré que si le point de contact inter-dentaire le plus apical est à 5 mm ou moins de la crête osseuse, cela permet à la papille de bien combler l'embrasement gingivale.

Mais à l'inverse, une restauration trop volumineuse ne laissant pas de place à la papille entraîne un profil d'émergence inadapté et des tissus gingivaux hypertrophiés et inflammés (68).

- Position des zéniths

Chu, Stephen et al. (69) démontrent dans leur étude que les incisives centrales présentent un zénith gingival distalé de 1mm de/par rapport à la bissectrice médiane de la dent. Pour l'incisive latérale une distalisation de 0,5 mm et pour la canine, le zénith gingival se trouve le long de l'axe de la dent.



Le niveau du zénith de la latérale dans le sens apico-coronaire se trouve en dessous de la ligne gingivale joignant le zénith de l'incisive centrale à celui de la canine, à une distance de 1 mm.

Figure 85 : Illustration de la hauteur du zénith de l'incisive latérale

Humagain et al. (70) ont réalisé une étude visant à déterminer s'il existe une différence significative de la position des zéniths. Les auteurs trouvent une différence significative au niveau de la distalisation du zénith gingival de la latérale par rapport à la bissectrice médiane de la dent. Cette distalisation est légèrement plus élevée chez l'homme (environ 0,55 mm chez l'homme contre 0,46 mm chez la femme).

- Notion d'espace biologique

En possession d'informations concernant le niveau osseux il peut être bon de déterminer si l'espace biologique, qui est garant de la pérennité des restaurations en prothèse fixée, est satisfaisant. A défaut d'avoir relevé le niveau osseux cliniquement, il est facile de le relever virtuellement. Mais pour cela il faut être en possession du fichier *DICOM (.dcm)* provenant de la réalisation d'un Cone-Beam. Si ce fichier est bien lisible au niveau des dents (absence d'artefacts trop importants provenant des couronnes métalliques par exemple) il est facile de l'aligner avec l'empreinte optique des arcades dentaires, et ainsi déterminer le niveau osseux et mesurer l'espace biologique entre la base du sulcus (numérisé par l'empreinte intra-orale) et le sommet de la crête osseuse (numérisé grâce au CBCT).

Ingber et al. (71) considèrent qu'un minimum de 3 millimètres coronairement à la crête alvéolaire est nécessaire pour permettre un bonne santé et restauration de la dent.

Dans le cas d'une gingivoplastie ou d'une élongation, grâce à ces données virtuelles la conception d'un guide se fait sans difficultés (Cf partie 3.3).

2.2.5.2 En pratique sur Exocad®

2.2.5.2.1 Mise en articulateur

L'articulateur virtuel n'a rien à envier à son homologue réel, et il en existe des dizaines de différents sur le logiciel de modélisation.

En mode « expert », il faut cliquer sur « *outils* » puis sur « *Démarrer articulateur* ». Deux petites fenêtres s'ouvrent : une permettant de choisir l'articulateur, ses options et paramétrages, l'autre permettant de positionner les arcades dans l'articulateur.

Dans certains cas de réhabilitation étendue, en cas de rétablissement du plan d'occlusion par exemple, l'apport du scan du visage peut s'avérer pertinent car il permettra d'aligner le plan d'occlusion avec le plan bi-pupillaire et/ou le plan de Camper.

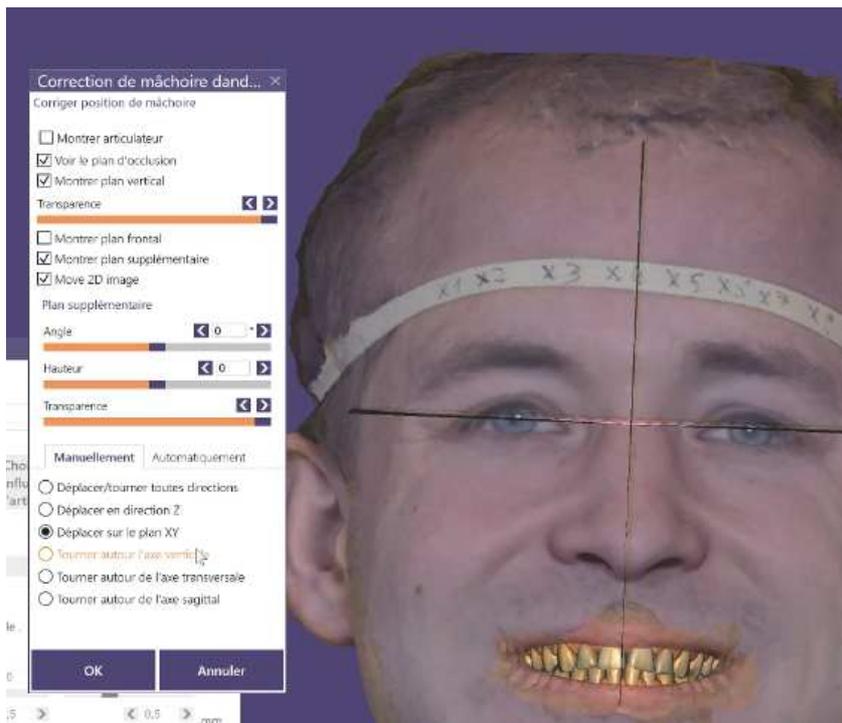


Figure 86 : Capture d'écran lors de la mise en place du plan d'occlusion (parallèle à la ligne bi-pupillaire) et du plan sagittal médian ; vue de face

Dans la petite fenêtre permettant de positionner l'articulateur, il faut cocher les cases « voir le plan d'occlusion » et « montrer plan vertical ».

L'opérateur commence par aligner le plan d'occlusion à la ligne bi-pupillaire et le plan vertical au plan sagittal médian du visage.



Figure 87 : Capture d'écran lors de la mise en place du plan d'occlusion (parallèle à la ligne bi-pupillaire) et du plan sagittal médian ; vue de profil

En bas de la petite fenêtre, le logiciel propose de déplacer l'articulateur dans toutes les directions ou seulement selon la direction X, Y ou Z. Cela permet de ne pas perdre les précédents alignements effectués.

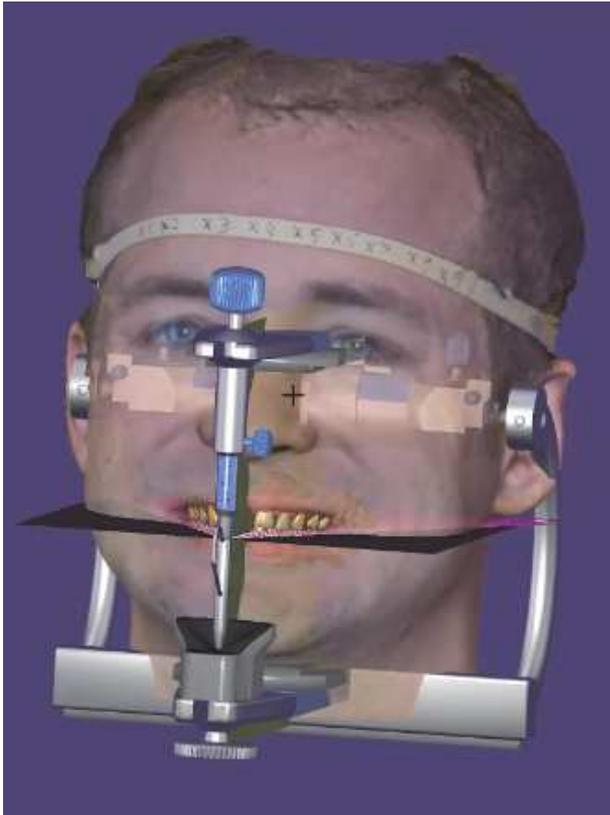


Figure 89 : Fin de la mise en articulateur

Après avoir validé la mise en articulateur, une nouvelle fenêtre s'ajoute à l'espace de travail permettant de simuler les différents mouvements proposés par l'articulateur.

Figure 88 : Fenêtre permettant de simuler les mouvements d'articulateur

Bientôt, grâce à certains nouveaux systèmes novateurs, il sera possible d'enregistrer l'occlusion dynamique propre à chaque patient. C'est ce que propose la société Modjaw® qui commercialise depuis peu un système qui enregistre les différents mouvements de la mâchoire grâce à un système ingénieux mais encore très coûteux.

2.2.5.2.2 Module Smile design

Le module d'aide « Smile design » du logiciel Exocad® apporte un bon nombre d'outils et de guides à la conception du sourire. Ce module est fait pour réaliser le projet esthétique en deux dimensions et le reporter sur l'arcade en trois dimensions. Mais ici, l'opérateur l'utilise directement sur le scan du visage en trois dimensions et non pas sur des photographies (deux dimensions donc) qui peuvent être à l'origine d'erreurs de parallaxe. Pour y accéder il faut repasser en mode « expert » à droite de la fenêtre, si ce n'est pas déjà le cas, et ensuite cliquer sur l'icône « outils » puis sur « Smile design ».

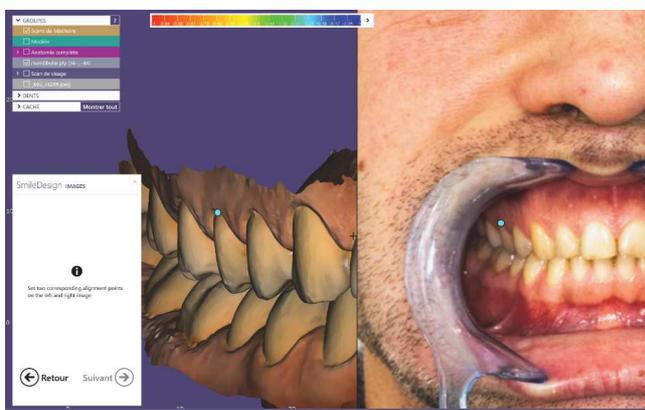
2.2.5.2.2.1 Import de photographies de face sourire et avec écarteur

Même si elles ne servent pas, afin de progresser dans le module « Smile design » et générer les outils d'aide et les guides, il faut quand même importer des photographies de face avec écarteur et en sourire forcé.



Lors du lancement du module, s'ouvre une petite fenêtre d'assistance « *SmileDesign* ». L'opérateur commence par charger une photo de face avec écarteurs.

Figure 90 : Fenêtre de l'assistant SmileDesign



Il doit ensuite l'aligner sur le scan intra-oral en fixant deux points de repère et en jouant sur l'inclinaison du scan le long de cet axe entre les deux points.

Figure 91 : Capture d'écran de l'alignement du scan intra-oral avec la photo 2D

Il répète le processus lors de l'import d'une photographie de face en sourire forcé, puis clique ensuite sur « suivant ». L'assistant demande alors de lui indiquer le centre des pupilles droite et gauche pour fixer la ligne horizontale de référence.

Il faut indiquer ces deux points non pas sur les photographies mais sur le scan du visage. Pour ce faire, grâce à la fenêtre de visualisation des objets, désactivez « images 2D » et affichez le scan de visage sourire.

Il suffit ensuite de cliquer successivement, comme demandé par l'assistant, sur le centre de la pupille droite, puis sur le centre de la pupille gauche. Les lignes de références et guides apparaissent, et il faut alors les adapter au visage et aux dents.

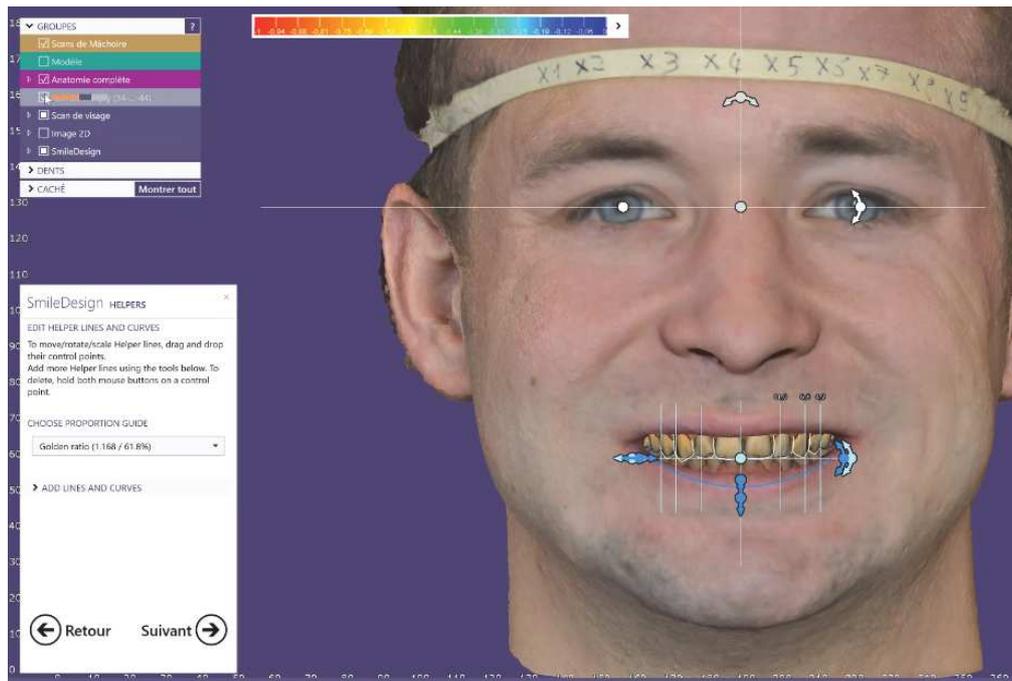
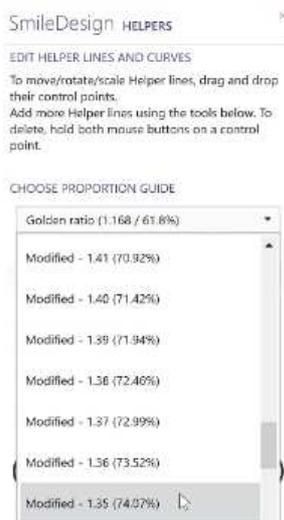


Figure 92 : Capture d'écran lors de la mise en place des lignes de référence

2.2.5.2.2.2 Choix de la grille de proportion



L'opérateur a le choix d'une multitude de grilles de proportions. Il faut choisir celle qui s'adapte le mieux au patient. Ici le choix s'est porté sur une grille de proportion modifiée à 74%.

Figure 93 : Choix du guide de proportions

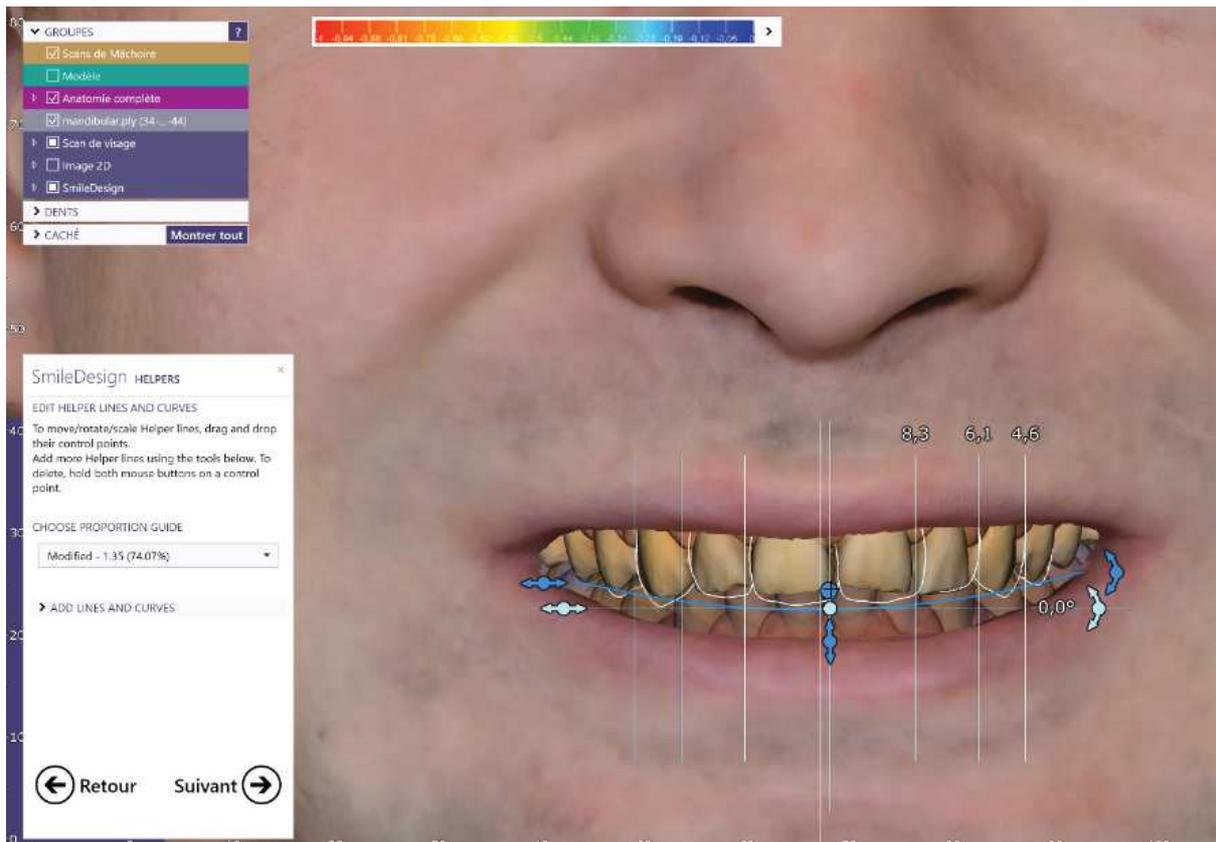


Figure 94 : Capture d'écran lors de l'ajustement de la grille de proportions sur l'arcade maxillaire

L'opérateur redimensionne et positionne correctement la grille de proportion, et fait de même avec la ligne du sourire.

2.2.5.2.3 Modelage

Vient alors l'étape de modélisation à proprement parler. Il faut désormais, dent par dent, dans les trois dimensions, en s'aidant des lignes directrices, de la grille de proportions et en gardant à l'esprit tous les critères esthétiques énoncés plus haut, façonner le sourire « idéal ».

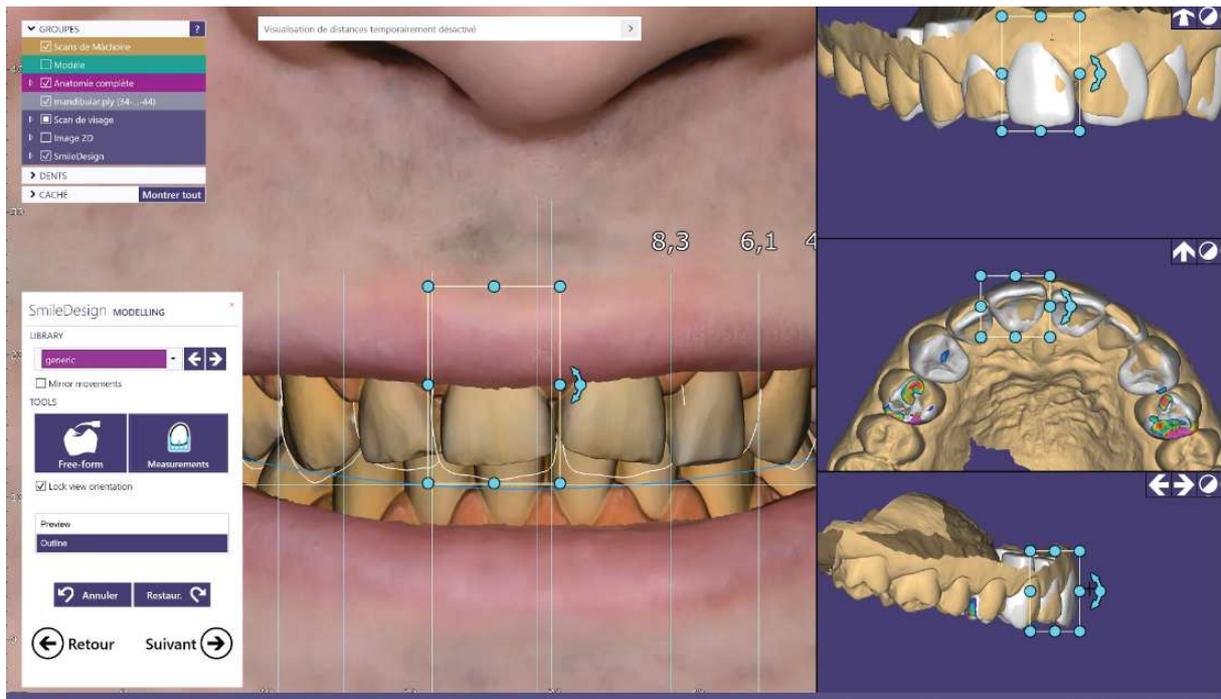


Figure 95 : Capture d'écran lors de l'ajustement dans les trois plans de l'espace, des patrons de formes dentaires à l'arcade maxillaire

Il faut commencer par disposer au mieux les patrons de formes de dents grâce au guide de proportion. Puis, les trois petites fenêtres présentant une vue frontale, latérale et occlusale, aident à adapter au mieux, les dents provenant de la base de données à l'arcade du patient.

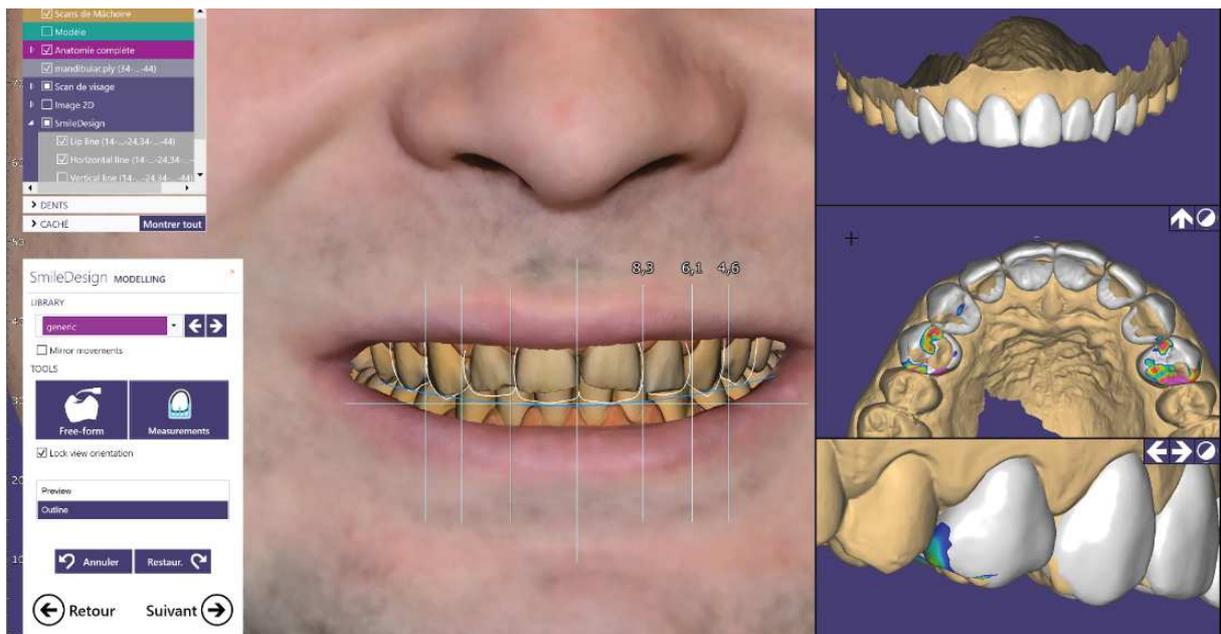


Figure 96 : Capture d'écran lors de la modélisation

Les finitions du mock-up numérique se font ensuite grâce à l'outil de modelage « *Free Form* »



La petite fenêtre d'assistance qui s'ouvre permet de modéliser la dent en question de différentes façons et avec différents outils. En cliquant sur « *LIBRE* » l'opérateur dispose des outils de bases de la modélisation à savoir « ajouter/supprimer », et « lisser/aplatir ». Il est également possible de régler la surface et la force d'action. Pour achever la modélisation il suffit de cliquer sur « *OK* ».

Figure 97 : Fenêtre d'assistant modelage



Figure 98 : Projet esthétique final en trois dimensions (à gauche) et vue occlusale du wax up numérique (à droite)

2.2.5.2.4 Validation du projet

Une fois le projet terminé, il convient de le faire valider auprès des personnes concernées (patient et praticien), selon différentes possibilités. L'opérateur peut par exemple envoyer par courriel les captures d'écrans des vues principales (de face, de profil, vue antérieure du wax-up et vue occlusale), ou encore envoyer un lien HTML qui permet de voir les objets en trois dimensions à partir d'un navigateur internet.

En mode « expert », il suffit alors de cliquer sur « *outils* » puis « *export HTML* ». Par la même manœuvre en cliquant sur « *export PDF* » l'opérateur peut enregistrer un PDF-3D qu'il partage ensuite avec son destinataire.

Il existe une application pour Smartphone et tablette nommée « *exocad webview* » qui permet de visualiser le projet en trois dimensions. Dans ce cas il faut cliquer sur « *Partager en ligne via webview* ». Il est proposé de crypter les données par un mot de passe afin de limiter la vision de données médicales aux personnes concernées.

Si le destinataire dispose du logiciel Exocad® il est alors plus avisé de lui transmettre le fichier de base du programme, à savoir le fichier de la « *scène* » (dont l'extension est « *.dentalCAD* ») :

Il faut commencer par enregistrer le projet, puis, dans le menu déroulant « *outils* », il suffit de cliquer sur l'onglet « *afficher le projet dans l'explorateur* » afin de copier le fichier « *DENTALCAD* » (*.dentalCAD*) portant le nom du projet, et ainsi pouvoir le partager.

Les deux dernières alternatives sont intéressantes car permettent aux praticiens d'avoir accès à tous les objets 3D et de jouer sur la transparence de ceux-ci, d'observer les épaisseurs par exemple afin de pouvoir juger plus facilement de l'indication d'une thérapeutique ou d'une autre.

3 Champ d'application

3.1 Mock-up

La validation du projet prothétique final passe régulièrement par un mock-up. Cette étape est essentielle pour valider l'esthétique mais aussi et surtout la fonction et la phonation.

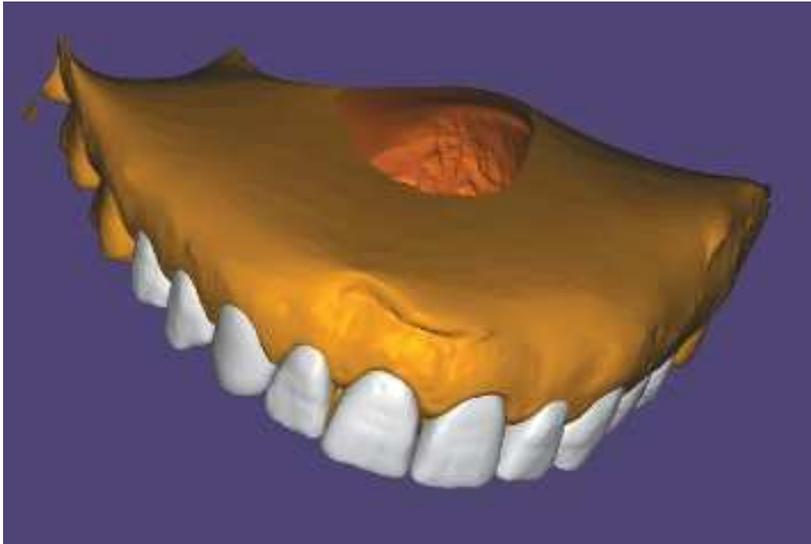
A ce jour il est préférable d'imprimer le modèle par stéréolithographie et de réaliser le mock-up de manière traditionnelle avec une clé en silicone double mélange. Mais grâce à l'apparition prochaine de nouveaux matériaux permettant l'impression ou l'usinage d'épaisseurs infimes, la possibilité d'imprimer le mock-up directement devient envisageable. L'autre alternative est l'impression d'une gouttière pour éviter l'étape de la réalisation de la clé en silicone. Mais, là non plus, il n'existe pas encore de matériaux remplissant les caractéristiques physiques apportés par le silicone à la réalisation du mock-up, même si, depuis peu apparaissent de nouveaux matériaux d'impression souples mais non destinés à un usage intra-oral.

3.1.1 Impression du modèle

Depuis le logiciel de modélisation Exocad®, il est très facile d'exporter le modèle sur un autre programme permettant de préparer l'impression. Si l'opérateur crée un modèle virtuel du wax-up il peut l'enregistrer sous le format STL. Il lui faut alors exporter le modèle virtuel créé plus tôt (Cf partie 2.2.3) ainsi que le wax-up modelé. Pour cela grâce à la boîte de dialogue de visualisation des surfaces, l'opérateur ne sélectionne que les deux objets concernés, et il exporte les objets visibles.

Un autre moyen est de passer par l'éditeur de surface dans Exocad.

Il faut tout d'abord sélectionner le scan maxillaire ainsi que l'objet « *Anatomie complète* » qui représente le wax-up, et ensuite choisir l'action « *Boucher* ».

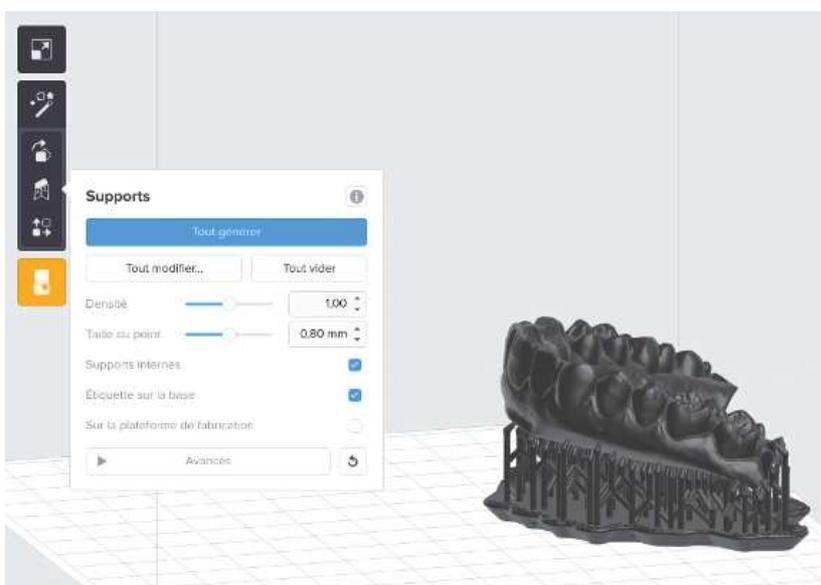


Ainsi le modèle ne sera pas creux et surtout n'aura pas une épaisseur insuffisante.

Figure 99 : Wax up numérique avant impression

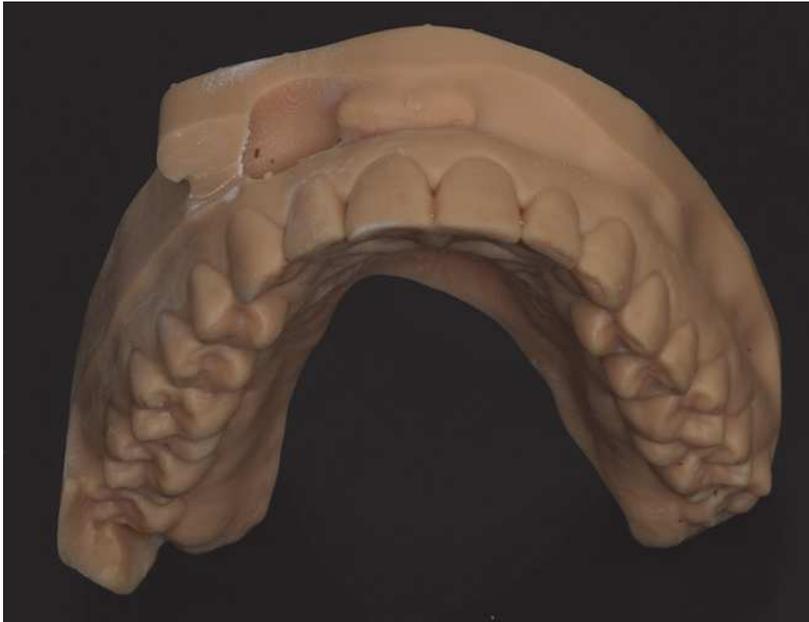
Ensuite, un clic droit sur l'objet puis sur « enregistrer scène en tant que (DentalCAD, STL, PDF)... » permet d'exporter le modèle en STL. Il faut veiller avant cela à n'afficher que les objets concernés, c'est à dire le scan du maxillaire ainsi que l'objet « anatomie complète » du wax-up. Après avoir enregistré le nom du fichier, le programme demande s'il ne faut enregistrer que les objets visibles, il faut confirmer l'option proposée.

Il faut ensuite ouvrir le logiciel de l'imprimante 3D utilisée afin de programmer l'impression (matériau utilisé, imprimante, qualité, supports...).



Ici l'opérateur passe par le logiciel PreForm® permettant de programmer l'impression du modèle (il s'agit notamment de bien positionner le modèle et de choisir le type de supports).

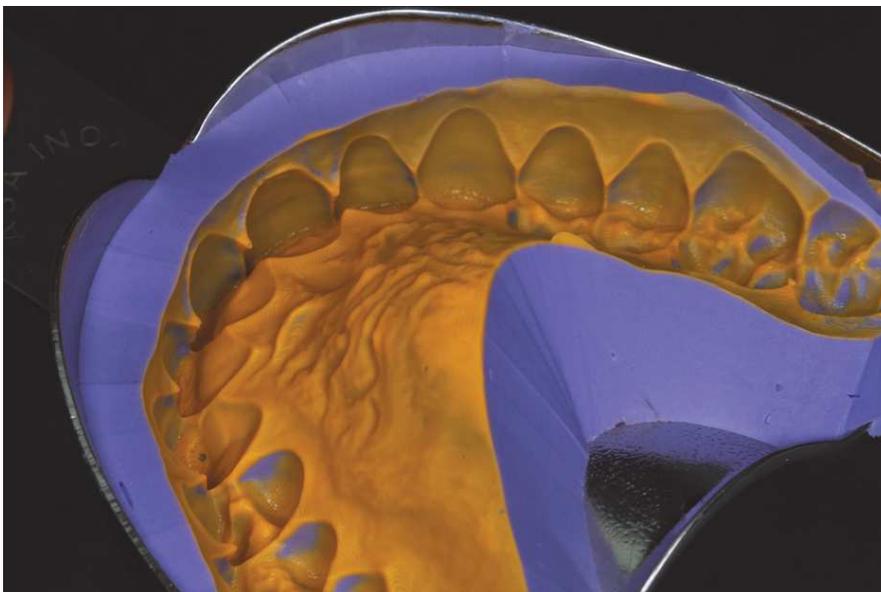
Figure 100 : Préparation du modèle sur PreForm®



Dans le cas présent, l'impression du modèle est réalisée par stéréolithographie en résine grâce à l'imprimante Formlabs®.

Figure 101 : Modèle physique imprimé par stéréolithographie

3.1.2 Réalisation du mock-up



Le praticien passe ensuite à la réalisation du Mock-up de manière classique en faisant une clé en silicone qu'il place ensuite en bouche avec de la résine acrylique pour réaliser le masque.

Figure 102 : Clé en silicone pour la réalisation du Mock-up



Figure 103 : Photographie du patient de face avant et après la mise en place du Mock-up



Ainsi le praticien réalise le mock-up sur lequel il peut ajouter certaines modifications et lui permet de valider de façon définitive la modélisation.

Figure 104 : Photographie intra-orale du Mock-up en vue frontale

3.1.3 Corrections et modifications du mock-up et enregistrement

Rares sont les cas où aucune retouche n'est nécessaire. Après modification et ajustement il faut reprendre une empreinte optique intra-orale pour scanner la maquette validée. Celle-ci permet d'aligner la future restauration sur ce projet.

3.2 Usinage prothèse fixée

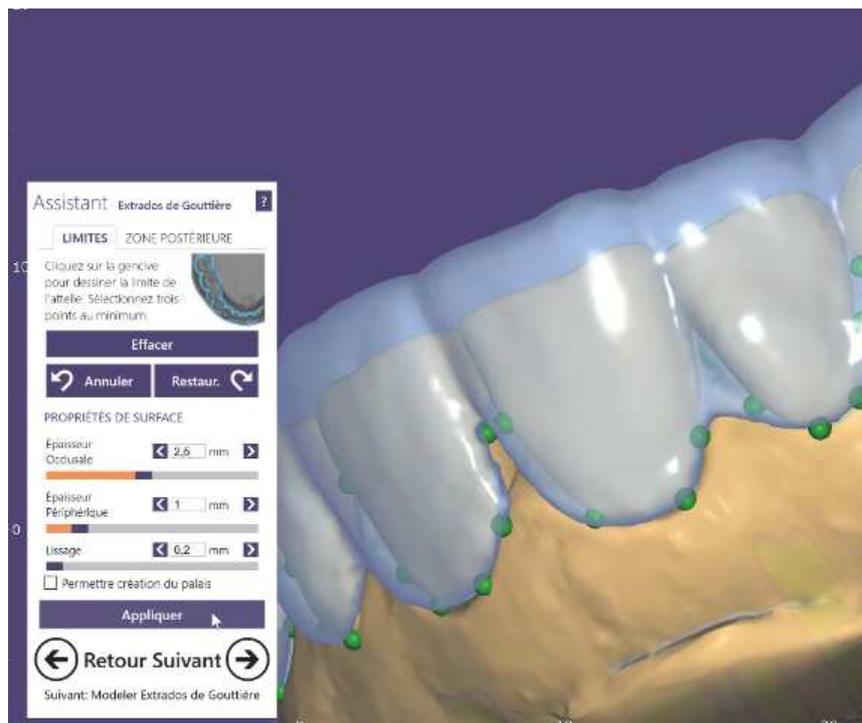
Une fois le projet validé grâce au mock-up le praticien, dans un souci d'économie tissulaire, peut réaliser ses préparations d'épaisseurs contrôlées, au travers du mock-up. Ceci fait, il prend une empreinte optique après préparation et il est ensuite aisé de réaliser la conception des prothèses fixées en se guidant du wax-up numérique, ou grâce au scan du mock-up modifié si tel a été le cas.

3.3 Guide de chirurgie gingivale et osseuse

Dans certains cas l'analyse esthétique indiquera de recourir à une chirurgie de plastie osseuse et/ou gingivale. La CFAO apporte une solution à chacune de ces requêtes.

- Guide de gingivectomie:

Pour rétablir le niveau esthétique des zéniths gingivaux, un aménagement parodontal est parfois nécessaire. L'usage d'un guide chirurgical peut alors s'avérer être un choix judicieux car il permet de simplifier l'intervention et d'augmenter le niveau de précision de l'acte. Il n'existe pas de module de confection de guide chirurgical dans Exocad® mais il est possible de contourner ce problème en passant par le module de réalisation de gouttière.



Il suffira alors d'adapter les limites de la gouttière aux limites de la hauteur des zéniths gingivaux souhaités.

Figure 105 : Capture d'écran lors de la réalisation d'un guide de chirurgie gingivale

Il faut dans tous les cas veiller à la préservation de l'espace biologique permettant la bonne santé parodontale. En possession d'un fichier DICOM provenant d'un Cone-Beam, il est facile de définir l'espace biologique, et ainsi juger de la nécessité de recourir à une chirurgie d'allongement coronaire.



Figure 106 : Photographie d'une gingivectomie aidée d'un guide chirurgical

- Guide de chirurgie osseuse et gingivale:

Liu et al (72) exposent dans leur article comment réaliser grâce aux données intra-orales et osseuses scannées, un guide de chirurgie gingivale et un guide de chirurgie osseuse sur un logiciel de modélisation dentaire (Segma Dental CAD; Segma Dental®).

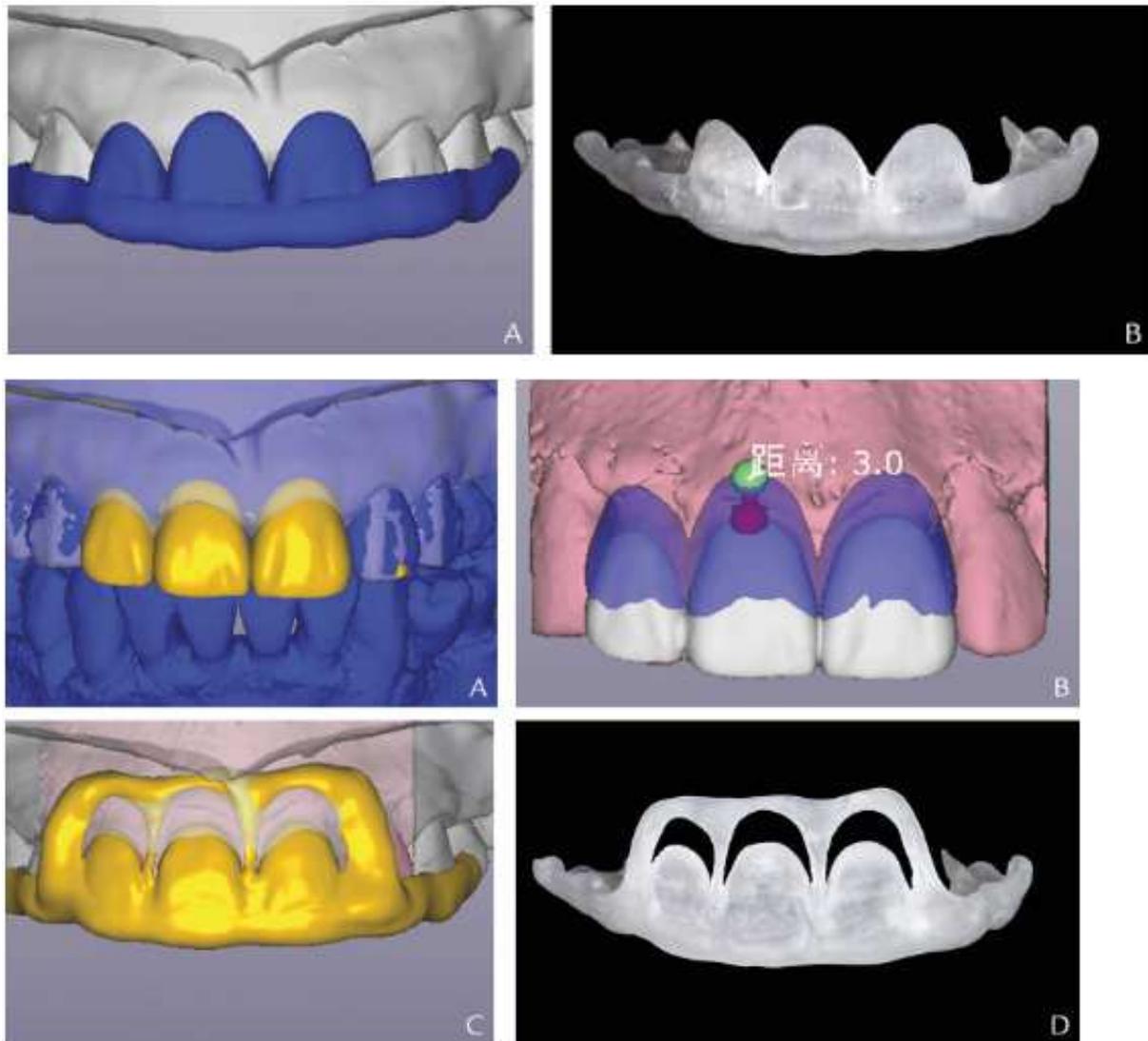


Figure 107 : Réalisation d'un guide de chirurgie osseuse et gingival (Liu et al.)

3.3.1 Alignement CBCT

Le fichier provenant d'un Cone-Beam (Imagerie volumétrique par faisceau conique) est un élément essentiel à la réalisation de certains cas, comme par exemple la réalisation

d'un guide chirurgical ou encore la planification d'un traitement implantaire. Afin de pouvoir l'utiliser à bon escient, il est nécessaire de l'aligner aux autres données scannées. L'alignement se réalise selon les mêmes principes qu'énoncés précédemment. L'opérateur importe le fichier et grâce à la fonction « superposer les surfaces » il trouve des points de repères entre le DICOM et le scan intra-oral. Ainsi il obtient le visage du patient et la structure osseuse sous-jacente.

3.4 Planification implantaire

En possession d'un CBCT permettant la visualisation des structures osseuses, et si la thérapeutique nécessite le recours à la pose d'un ou plusieurs implants, il est facile de réaliser la planification implantaire en se guidant sur le projet esthétique. En connaissance de l'analyse esthétique, l'opérateur peut prévoir l'emplacement idéal des futurs implants en fonction des données osseuses numérisées. C'est ce que décrivent Joda et Galluci (73), qui alignent, en méthode directe, le scan facial extra-oral, avec le scan intra-oral et avec le scan du CBCT. Il est possible de réaliser un guide de chirurgie pour la pose des implants par CFAO. Mais il est également possible par exemple de prévoir les éléments de prothèses supra-implantaires provisoires et les réaliser par impression ou par usinage.

3.5 Impression de prothèses amovibles complètes immédiates

Pour une réhabilitation immédiate complète, l'intégration d'un scan facial lors de l'élaboration de prothèses amovibles immédiates peut s'avérer être d'une aide précieuse. Hassan et al (74,75) utilisent cette technique pour dix patients nécessitant le recours à une prothèse complète immédiate post-extractionnelle. Ils concluent une accélération de la procédure de réhabilitation (depuis la conception de la prothèse immédiate jusqu'à la celle de la prothèse définitive supra-implantaire) menant à des résultats fonctionnels et esthétiques plus prévisibles.

Conclusion

En attendant que la numérisation faciale pour des travaux esthétique se répande, il est possible, dès à présent, de la réaliser par certaines méthodes simples et peu coûteuses. Mais il est facilement concevable d'imaginer que l'évolution de la technologie laisse place à d'autres techniques encore plus simples, plus ergonomiques, plus précises, plus rapides, et encore plus économiques.

Cette analyse esthétique en trois dimensions permet d'obtenir un résultat se rapprochant au plus proche du projet accompli virtuellement. En n'interrompant pas le flux numérique et grâce aux nouveaux outils, le praticien peut obtenir des résultats de thérapeutique plus précis mais aussi plus prévisibles.

Cependant, l'analyse esthétique aboutissant au projet pose un problème de taille ; celui de la normalisation du sourire. Faut-il se défaire de toutes ces petites caractéristiques qui nous différencient, nous distinguent les uns des autres ? Les variations de tailles, de formes, de dispositions, les détails et petites marques individuelles de notre sourire peuvent être reproduits par la main talentueuse de nos précieux et indispensables collègues céramistes, mais ne peuvent pas encore l'être par le bras articulé d'une machine.

Conjointement à cette lacune, le numérique apporte involontairement ses solutions. La modélisation virtuelle est accessible à tous et les banques de données de formes dentaires n'ont jamais été aussi abondantes.

La démocratisation des scanners rend possible leur diffusion dans nos cabinets dentaires. Les scanners intra-oraux remplacent progressivement les empreintes conventionnelles physiques. Cette ère numérique permet des gains de temps, d'argent, des simplifications de protocole et une meilleure et plus simple communication.

La tendance actuelle étant à vouloir tout numériser pour ainsi tout simuler. Mais il reste encore du temps avant de maîtriser le patient 100% virtuel qui simulerait l'harmonie complexe, cette belle symbiose qu'exercent entre eux les différentes composantes de notre corps, sans oublier la part des émotions et de la psychologie humaine.

La profession pourrait facilement concevoir, après la 3D, l'arrivée d'une 4ème dimension avec le mouvement et la fonction. La société Modjaw® propose un nouveau système permettant d'enregistrer les mouvements d'articulation du patient. L'utilisation de l'articulateur devient alors obsolète, car nous obtenons ainsi une simulation virtuelle de l'appareil manducateur propre au patient et non pas une simulation normée de l'articulation temporo-mandibulaire par l'articulateur qui essaye, tant bien que mal, mais sans jamais l'atteindre, d'imiter l'articulation humaine. Cela permettrait un gain de temps important du réglage occlusal après la mise en place de l'élément prothétique.

Après les mouvements d'articulation, il serait également possible de numériser et simuler les mimiques et expressions faciales grâce à ce qu'on appelle la « 3D motion »(76).

A chaque problème et difficulté rencontrés, l'évolution technologique apporte ses solutions. La révolution numérique bouleverse la pratique quotidienne de la profession et ouvre les portes sur l'avenir de la dentisterie moderne, mais il convient de rester attentif à ce que cette pratique préserve une part d'humanité.

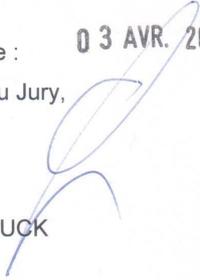
SIGNATURE DES CONCLUSIONS

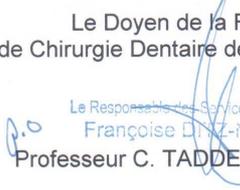
Thèse en vue du Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Nom - prénom de l'impétrant : QUARRE Luc

Titre de la thèse : Acquisition optique tridimensionnelle du visage : méthode et intérêt dans le projet esthétique

Directeur de thèse : Docteur Olivier ETIENNE

VU
Strasbourg, le : **03 AVR. 2019**
Le Président du Jury,

Professeur O. HUCK

VU
Strasbourg, le : **03 AVR. 2019**
Le Doyen de la Faculté
de Chirurgie Dentaire de Strasbourg,

Le Responsable des Services Administratifs
Françoise D'AZÉ-MOUGEL
Professeur C. TADDEI-GROSS

Bibliographie

1. Rangel FA, Chiu Y-T, Maal TJJ, Bronkhorst EM, Bergé SJ, Kuijpers-Jagtman AM. Does powdering of the dentition increase the accuracy of fusing 3D stereophotographs and digital dental casts. *Eur J Orthod.* 1 août 2016;38(4):440-5.
2. Probst A, Gatzolis D, Strigul N. Intercomparison of photogrammetry software for three-dimensional vegetation modelling. *R Soc Open Sci* [Internet]. 11 juill 2018;5(7). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6083669/>
3. Swennen GRJ, Schutyser F, Lemaitre A, Malevez C, De Mey A. Accuracy and reliability of 3-D CT versus 3-D stereo photogrammetry based facial soft tissue analysis. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* 1 janv 2005;34(Supplement 1):73.
4. Ghoddousi H, Edler R, Haers P, Wertheim D, Greenhill D. Comparison of three methods of facial measurement. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* mars 2007;36(3):250-8.
5. Deli R, Gioia ED, Galantucci LM, Percoco G. Accurate facial morphologic measurements using a 3-camera photogrammetric method. *J Craniofac Surg.* janv 2011;22(1):54-9.
6. Galantucci LM, Lavecchia F, Percoco G, Raspatelli S. New method to calibrate and validate a high-resolution 3D scanner, based on photogrammetry. *Precision Engineering.* 1 avr 2014;38(2):279-91.
7. Tzou C-HJ, Artner NM, Pona I, Hold A, Placheta E, Kropatsch WG, et al. Comparison of three-dimensional surface-imaging systems. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* avr 2014;67(4):489-97.
8. Mahmoud A, Bennett M. Introducing 3-Dimensional Printing of a Human Anatomic Pathology Specimen: Potential Benefits for Undergraduate and Postgraduate Education and Anatomic Pathology Practice. *Arch Pathol Lab Med.* août 2015;139(8):1048-51.
9. Koban KC, Leitsch S, Holzbach T, Volkmer E, Metz PM, Giunta RE. [3D-imaging and analysis for plastic surgery by smartphone and tablet: an alternative to professional systems?]. *Handchir Mikrochir Plast Chir.* avr 2014;46(2):97-104.
10. Salazar-Gamarra R, Seelaus R, da Silva JVL, da Silva AM, Dib LL. Monoscopic photogrammetry to obtain 3D models by a mobile device: a method for making facial prostheses. *J Otolaryngol Head Neck Surg.* 25 mai 2016;45(1):33.
11. Holberg C, Schwenzer K, Mahaini L, Rudzki-Janson I. Accuracy of facial plaster casts. *Angle Orthod.* juill 2006;76(4):605-11.
12. Lemon JC, Okay DJ, Powers JM, Martin JW, Chambers MS. Facial moulage: the effect of a retarder on compressive strength and working and setting times of irreversible hydrocolloid impression material. *J Prosthet Dent.* sept 2003;90(3):276-81.
13. Moss JP, Linney AD, Lowey MN. The use of three-dimensional techniques in facial esthetics. *Semin Orthod.* juin 1995;1(2):94-104.
14. Kusnoto B, Evans CA. Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* oct 2002;122(4):342-8.
15. Nyquist G, Tham P. Method of measuring volume movements of impression, model and prosthetic base materials in a photogrammetric way. *Acta Odontol Scand.* avr 1951;9(2):111-30.
16. Adams LP, Wilding RJ. A photogrammetric method for monitoring changes in the residual alveolar ridge form. *J Oral Rehabil.* sept 1985;12(5):443-50.
17. Patias P. Medical imaging challenges photogrammetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 1 août 2002;56(5):295-310.
18. Figueiredo RV, Amaral AC, Shimano AC. Photogrammetry on the identification of

postural asymmetries in cadets and pilots of the Brazilian air force academy. *Rev Bras Fisioter.* févr 2012;16(1):54-60.

19. Gabor LR, Chamberlin AP, Levy E, Perry MB, Cintas H, Paul SM. Digital stereophotogrammetry as a new technique to quantify truncal deformity: a pilot study in persons with osteogenesis imperfecta. *Am J Phys Med Rehabil.* oct 2011;90(10):844-50.
20. Pach J, Pennell DO, Romano PE. Optic disc photogrammetry: magnification factors for eye position, centration, and ametropias, refractive and axial; and their application in the diagnosis of optic nerve hypoplasia. *Ann Ophthalmol.* déc 1989;21(12):454-62.
21. Romano PE. Simple photogrammetric diagnosis of optic nerve hypoplasia. *Arch Ophthalmol.* juin 1989;107(6):824-6.
22. Bulstrode CJ, Goode AW, Scott PJ. Stereophotogrammetry for measuring rates of cutaneous healing: a comparison with conventional techniques. *Clin Sci.* oct 1986;71(4):437-43.
23. Ding Y, Smith L, Smith M, Sun J, Warr R. Obtaining malignant melanoma indicators through statistical analysis of 3D skin surface disruptions. *Skin Res Technol.* août 2009;15(3):262-70.
24. Sigaux N, Ganry L, Mojallal A, Breton P, Bouletreau P. Photographie 3D en chirurgie de la face : principes, intérêts et perspectives. *Annales de Chirurgie Plastique Esthétique.* 1 févr 2018;63(1):62-8.
25. Motta LJ, Martins MD, Fernandes KPS, Mesquita-Ferrari RA, Biasotto-Gonzalez DA, Bussadori SK. Craniocervical posture and bruxism in children. *Physiother Res Int.* mars 2011;16(1):57-61.
26. Jayaratne YSN, Lo J, Zwahlen RA, Cheung LK. Three-dimensional photogrammetry for surgical planning of tissue expansion in hemifacial microsomia. *Head Neck.* déc 2010;32(12):1728-35.
27. Krimmel M, Schuck N, Bacher M, Reinert S. Facial surface changes after cleft alveolar bone grafting. *J Oral Maxillofac Surg.* janv 2011;69(1):80-3.
28. Validity and reliability of craniofacial anthropometric measurement of 3D digital photogrammetric images. - PubMed - NCBI [Internet]. 2018 [cité 7 déc 2018]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/scd-rproxy.u-strasbg.fr/pubmed/18452351>
29. Duce B, Score D, Reeves J. Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series. *Computers & Graphics.* 1 avr 2011;35(2):375-82.
30. Kucukkaya AG. Photogrammetry and remote sensing in archeology. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 15 sept 2004;88(1):83-8.
31. Verhoeven G, Doneus M, Briese C, Vermeulen F. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. *Journal of Archaeological Science.* 1 juill 2012;39(7):2060-70.
32. Cellule de photogrammétrie - Ministère de la Culture [Internet]. 2018 [cité 10 déc 2018]. Disponible sur: <http://www.culture.gouv.fr/Thematiques/Archeologie/Centre-national-de-prehistoire/Historique/Cellule-de-photogrammetrie>
33. Statham N. Use of Photogrammetry in Video Games: A Historical Overview. *Games and Culture.* 3 juill 2018;1555412018786415.
34. GDC. Star Wars: Battlefront and the Art of Photogrammetry [Internet]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=U_WaqCBp9zo
35. IGN - savoir-faire - la photogrammétrie [Internet]. [cité 8 janv 2019]. Disponible sur: <http://www.ngi.be/FR/FR2-2-1.shtm>
36. Buck U, Naether S, Räss B, Jackowski C, Thali MJ. Accident or homicide – Virtual crime scene reconstruction using 3D methods. *Forensic Science International.* 10 févr 2013;225(1):75-84.

37. Thali MJ, Braun M, Markwalder TH, Brueschweiler W, Zollinger U, Malik NJ, et al. Bite mark documentation and analysis: the forensic 3D/CAD supported photogrammetry approach. *Forensic Sci Int.* 12 août 2003;135(2):115-21.
38. Luhmann T. Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* 1 nov 2010;65(6):558-69.
39. Omar D, Duarte C. The application of parameters for comprehensive smile esthetics by digital smile design programs: A review of literature. *The Saudi Dental Journal.* 1 janv 2018;30(1):7-12.
40. Rangel FA, Maal TJJ, Bergé SJ, Vlijmen OJC van, Plooi JM, Schutyser F, et al. Integration of digital dental casts in 3-dimensional facial photographs. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 1 déc 2008;134(6):820-6.
41. Rosati R, De Menezes M, Rossetti A, Sforza C, Ferrario VF. Digital dental cast placement in 3-dimensional, full-face reconstruction: A technical evaluation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 1 juill 2010;138(1):84-8.
42. Masoud MI, Bansal N, C. Castillo J, Manosudprasit A, Allareddy V, Hagni A, et al. 3D dentofacial photogrammetry reference values: a novel approach to orthodontic diagnosis. *Eur J Orthod.* 1 avr 2017;39(2):215-25.
43. Schweiger J, Güth J-F, Edelhoff D, Stumbaum J. Virtual evaluation for CAD-CAM-fabricated complete dentures. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 1 janv 2017;117(1):28-33.
44. Lam WYH, Hsung RTC, Choi WWS, Luk HWK, Pow EHN. A 2-part facebow for CAD-CAM dentistry. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 1 déc 2016;116(6):843-7.
45. Sette A, Laborde G, Dodds M, Maille G, Margossian P. Analyse biométrique des symétries/asymétries faciales. *Stratégie Prothétique.* 2014;14(3):165-71.
46. Rufenacht CR. *Fundamentals of esthetics.* Chicago: Quintessence Pub. Co.; 1990. 373 p.
47. Chiche G, Pinault A. In: *Esthétique et restauration des dents antérieures.* Groupe CdP. 1995.
48. Lee RL. Standardized head position and reference planes for dento-facial aesthetics. *Dent Today.* févr 2000;19(2):82-7.
49. Guyuron B. Discussion: The ideal nasolabial angle in rhinoplasty: a preference analysis of the general population. *Plast Reconstr Surg.* août 2014;134(2):211-3.
50. Ricketts R. Planning treatment on the Basis of the Facial Pattern and an Estimate of Its Grow. *The Angle Orthodontist.* janv 1957;27(1):14-37.
51. Tjan AHL, Miller GD, The JGP. Some esthetic factors in a smile. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 1 janv 1984;51(1):24-8.
52. Liébart M-F, Fouque-Deruelle C, Santini A, Dillier F-L, Monnet-Corti V, Glise J-M, et al. Smile Line and Periodontium Visibility. 1(1):9.
53. Kokich VO, Kiyak HA, Shapiro PA. Comparing the perception of dentists and lay people to altered dental esthetics. *J Esthet Dent.* 1999;11(6):311-24.
54. Kokich VO, Kokich VG, Kiyak HA. Perceptions of dental professionals and laypersons to altered dental esthetics: Asymmetric and symmetric situations. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 1 août 2006;130(2):141-51.
55. Suzuki L, Machado AW, Bittencourt MAV. An evaluation of the influence of gingival display level in the smile esthetics. *Dental Press J Orthod.* sept 2011;16(5):37-9.
56. Krishnan V, Daniel ST, Lazar D, Asok A. Characterization of posed smile by using visual analog scale, smile arc, buccal corridor measures, and modified smile index. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* avr 2008;133(4):515-23.
57. Zange SE, Ramos AL, Cuoghi OA, de Mendonça MR, Suguino R. Perceptions of

- laypersons and orthodontists regarding the buccal corridor in long- and short-face individuals. *The Angle Orthodontist*. janv 2011;81(1):86-90.
58. Lombardi RE. The principles of visual perception and their clinical application to denture esthetics. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1 avr 1973;29(4):358-82.
 59. Mahshid M, Khoshvaghti A, Varshosaz M, Vallaei N. Evaluation of « Golden Proportion » in Individuals with an Esthetic Smile. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. mai 2004;16(3):185-92.
 60. Basting RT, Trindade RS, Flório FM. Comparative Study of Smile Analysis by Subjective and Computerized Methods. *Operative Dentistry*. 1 nov 2006;31(6):652-9.
 61. Rosenstiel SF, Ward DH, Rashid RG. Dentists' preferences of anterior tooth proportion-a Web-based study. *Journal of Prosthodontics*. sept 2000;9(3):123-36.
 62. Dalaie K, Behnaz M, Mirmohamadsadeghi H, Dashti M. Maxillary Anterior Teeth Width Proportion a Literature Review. :10.
 63. Stappert CFJ, Tarnow DP. Proximal Contact Areas of the Maxillary Anterior Dentition. *The International journal of periodontics & restorative dentistry*. oct 2010;(30):471-7.
 64. Sghaireen MG, Al-Zarea BK, Al-Shorman HM, AL-Omiri MK. Clinical measurement of the height of the interproximal contact area in maxillary anterior teeth. *Int J Health Sci (Qassim)*. nov 2013;7(3):325-30.
 65. Bhuvaneshwaran M. Principles of smile design. *J Conserv Dent*. 2010;13(4):225-32.
 66. Paolucci B, Calamita M, Coachman C, Gürel G, Shayder A, Hallawell P. Visagism: The Art of Dental Composition. :14.
 67. Tarnow DP, Magner AW, Fletcher P. The effect of the distance from the contact point to the crest of bone on the presence or absence of the interproximal dental papilla. *J Periodontol*. déc 1992;63(12):995-6.
 68. Kois JC, Vakay RT. Relationship of the periodontium to impression procedures. *Compend Contin Educ Dent*. août 2000;21(8):684-6, 688, 690 passim.
 69. Chu SJ, Tan JH-P, Stappert CFJ, Tarnow DP. Gingival Zenith Positions and Levels of the Maxillary Anterior Dentition. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 1 avr 2009;21(2):113-20.
 70. Humagain M, Rokaya D, Sree R, Dixit S, Kafle D. Gender Based Comparison of Gingival Zenith Esthetics. *Kathmandu Univ Med J (KUMJ)*. juin 2016;14(54):148-52.
 71. Ingber JS, Rose LF, Coslet JG. The « biologic width »--a concept in periodontics and restorative dentistry. *Alpha Omegan*. déc 1977;70(3):62-5.
 72. Liu X, Yu J, Zhou J, Tan J. A digitally guided dual technique for both gingival and bone resection during crown lengthening surgery. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1 mars 2018;119(3):345-9.
 73. Joda T, Gallucci GO. The virtual patient in dental medicine. *Clinical Oral Implants Research*. 2015;26(6):725-6.
 74. Hassan B, Greven M, Wismeijer D. Integrating 3D facial scanning in a digital workflow to CAD/CAM design and fabricate complete dentures for immediate total mouth rehabilitation. *J Adv Prosthodont*. oct 2017;9(5):381-6.
 75. Hassan B, Gimenez Gonzalez B, Tahmaseb A, Greven M, Wismeijer D. A digital approach integrating facial scanning in a CAD-CAM workflow for complete-mouth implant-supported rehabilitation of patients with edentulism: A pilot clinical study. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 1 avr 2017;117(4):486-92.
 76. OzzybanOswald. « Old Man » with Actor - 3D Motion Capture Facial Animation [Internet]. [cité 8 janv 2019]. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=o_7CfWlkqm8

MOTS CLÉS : Scan facial, Smile Design 3D, photogrammétrie
KEYWORDS : face scanning, 3D Smile Design, photogrammetry

Le projet esthétique 3D : la voie du futur

Luc Quarré

Docteur en chirurgie dentaire

Jean-Marc Faudi

Maître-Prothésiste

Olivier Etienne

MCU-PH, pratique libérale, Strasbourg

RÉSUMÉ

La révolution numérique que nous vivons permet aujourd'hui à quiconque le veut d'accomplir une acquisition en trois dimensions du monde qui l'entoure. Il est désormais possible d'effectuer sans difficulté un scan du visage et de l'aligner de manière précise avec l'empreinte optique intra-orale, afin de concevoir le projet esthétique en trois dimensions. L'un des moyens d'acquisition 3D est la photogrammétrie. Grâce à un appareil photo, en prenant une série de clichés autour de la tête du patient, et ensuite grâce à un logiciel de photogrammétrie, le praticien réalise la numérisation du visage. Une autre possibilité est d'utiliser un scanner du commerce. Si le scanner offre une précision suffisante, il sera facile d'aligner le visage numérique avec le scan des arcades dentaire. Dans le cas contraire, il sera nécessaire d'utiliser un dispositif qui servira de clé de repositionnement des scans entre eux.

ABSTRACT

Titre en anglais
Résumé en anglais

??????????????

**Les auteurs ne déclarent
aucun lien d'intérêt.**

??????????????

La photographie permet, depuis quelques années, de développer la planification d'un projet esthétique en deux dimensions (voir l'article « Le Photo Smile Design : outil de communication à double sens » dans ce numéro). L'analyse du visage, associée à des « règles » esthétiques fondamentales, sert à élaborer un projet idéal et harmonieux.

Cette technique en deux dimensions présente toutefois des limites et des inconvénients que sont les problèmes de parallaxe et le fait d'interrompre une pure succession de tâches numériques (de l'empreinte optique à l'usinage des futures pièces prothétiques). Grâce aux dernières technologies d'acquisition, la réalisation d'un projet en trois dimensions ouvre une nouvelle perspective pour les praticiens. Elle permet de répondre à bon nombre des problèmes identifiés pour la planification en deux dimensions.

Cet article a pour objectif de définir les outils permettant la planification numérique tridimensionnelle du projet prothétique et d'expliquer comment les mettre en œuvre.

Les moyens techniques

Différents critères sont à prendre en compte pour le choix de la technique à utiliser pour numériser le visage. En effet, la complexité vient du fait que le visage humain est mobile et sensible aux rayonnements ionisants. Les yeux sont, eux, sensibles aux rayons lumineux trop puissants comme des lasers. Quant aux dents, elles présentent une surface réfléchissante pouvant induire des erreurs d'acquisition.

Notre choix doit donc s'orienter vers un scanner sans contact, dont le temps d'acquisition ne soit pas supérieur au temps d'immobilité que peut supporter le patient. Si le scanner émet des rayonnements, ceux-ci doivent être non-ionisants et inoffensifs pour les yeux. Enfin, les reflets

lumineux des dents ne doivent pas induire d'erreurs d'acquisition avec la technique utilisée (utilisation d'un filtre polarisant ou poudrage des dents [1]).

L'alignement des objets numériques

Le grand défi du Smile Design en trois dimensions n'est pas l'acquisition du visage ou de la modélisation du sourire, mais plutôt l'alignement précis entre le scan intra-oral et le scan extra-oral. Tous les alignements d'objets numériques se font grâce à des points de repère d'alignement présents sur les deux objets numériques. Il faut donc un scanner permettant d'obtenir une numérisation du visage précise au niveau des dents, afin de pouvoir aligner cette numérisation à l'empreinte optique intra-orale.

Concernant la précision et la facilité de numérisation, ces dernières sont souvent proportionnelles au budget alloué au scanner.

Comme alternative à cette nécessité de précision de numérisation au niveau des dents, il a été suggéré d'utiliser une clé d'alignement [2,3] encore appelée « aligneur ». Deux techniques d'alignement des scans entre eux sont envisageables : la méthode directe et la méthode indirecte (par le biais d'un aligneur).

La méthode directe (fig. 1a et b)

L'alignement par méthode directe demande une bonne précision au niveau des dents, afin d'y trouver assez de points de repère permettant d'aligner le scan extra-oral avec l'empreinte optique de l'arcade maxillaire. Pour augmenter le nombre de points de repère possibles et ainsi augmenter la précision de l'alignement, nous réalisons un scan du visage « intermédiaire » avec écarteurs en place [4,5]. Ce scan nous permet d'obtenir un scan plus précis au niveau des dents et offre une multitude de points de repère, générant ainsi l'alignement le plus précis possible.

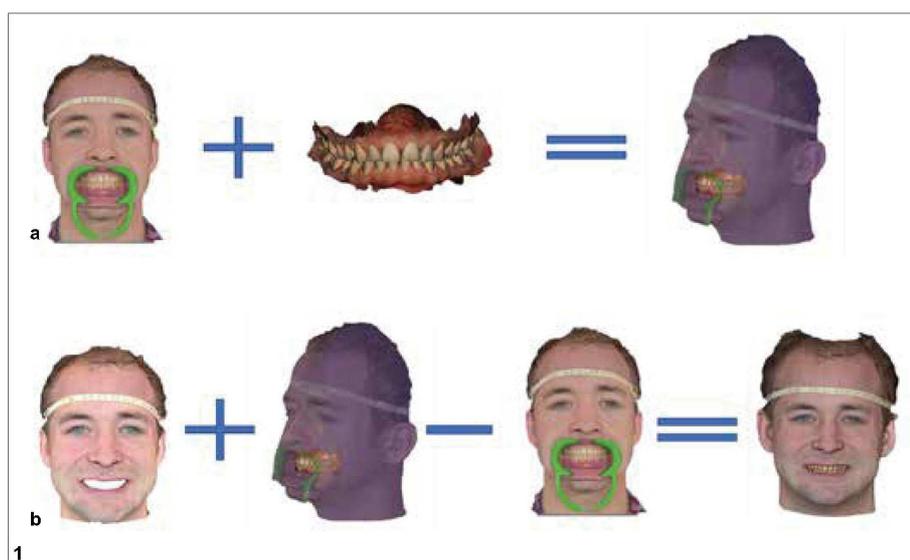


Fig. 1 - Principe de la méthode directe pour l'alignement des scans intra- et extra-oral entre eux : dans un premier temps, alignement du scan de mâchoire avec le scan du visage « écarteur » (a). Dans un second temps, alignement des deux scans de visage entre eux (b). Une fois l'alignement réalisé, le scan du visage avec écarteur peut être supprimé. Le scan du visage en sourire et l'empreinte optique intra-orale restent alignés.

Le projet esthétique

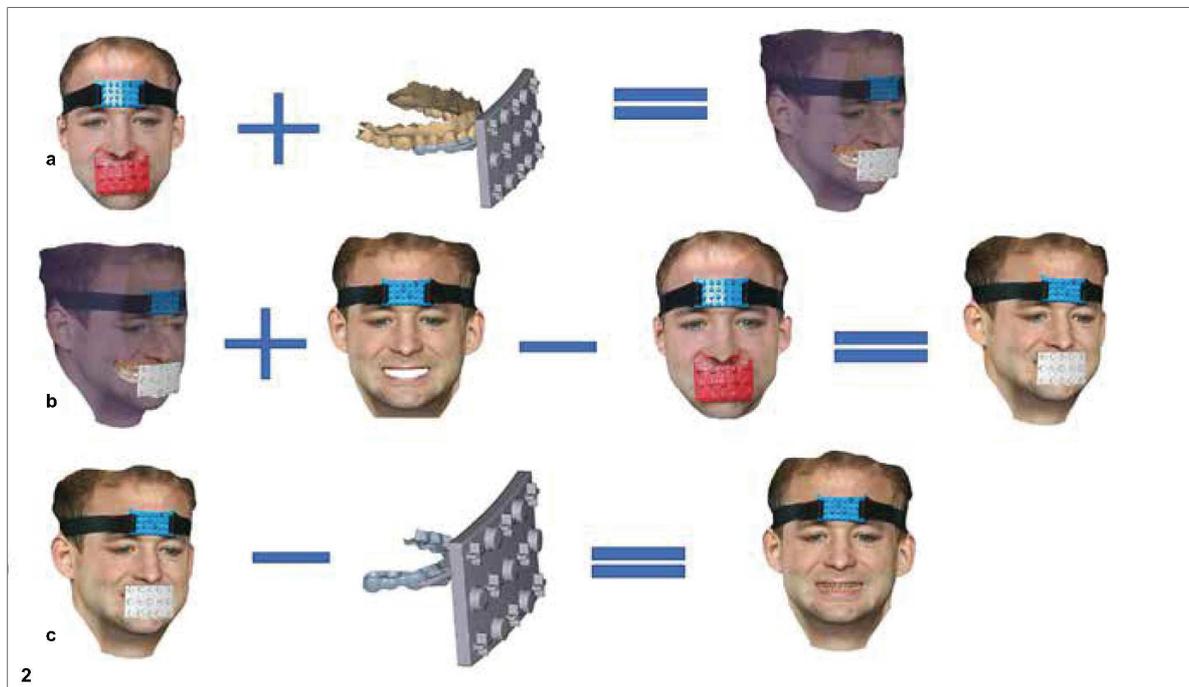


Fig. 2 - Principe de la méthode indirecte pour l'alignement des scans intra- et extra-oral entre eux : un fichier STL de l'aligneur (gouttière et forme géométrique) est généré sur l'empreinte intra-orale. La partie extra-orale permet, par de larges motifs, d'aligner le scan du visage aligneur buccal en place avec le fichier STL de l'aligneur (a). Un aligneur frontal, qui ne doit pas être déplacé entre les deux scans de visage, peut être utilisé pour faciliter l'alignement des deux scans en question (b). Il ne reste alors plus qu'à supprimer les scans sans utilité, à savoir le scan du visage aligneur buccal en place et le fichier STL de l'aligneur (c).

La méthode indirecte (fig. 2a à c)

Si le sourire du patient ne découvre pas suffisamment ses dents ou si la précision du scanner est insuffisante pour trouver suffisamment de points de repère, il faut réaliser l'alignement des scans d'arcade et du visage par l'intermédiaire d'un « aligneur » [2,3] à la place du scan du visage avec écarteur.

L'aligneur buccal et l'aligneur frontal servent de clé de repositionnement des différents scans entre eux.

Dans cette méthode, trois scans sont nécessaires : intra-oral, du visage grand sourire, du visage avec l'aligneur buccal en place et un fichier STL de l'aligneur buccal personnalisé (fig. 3a et b).

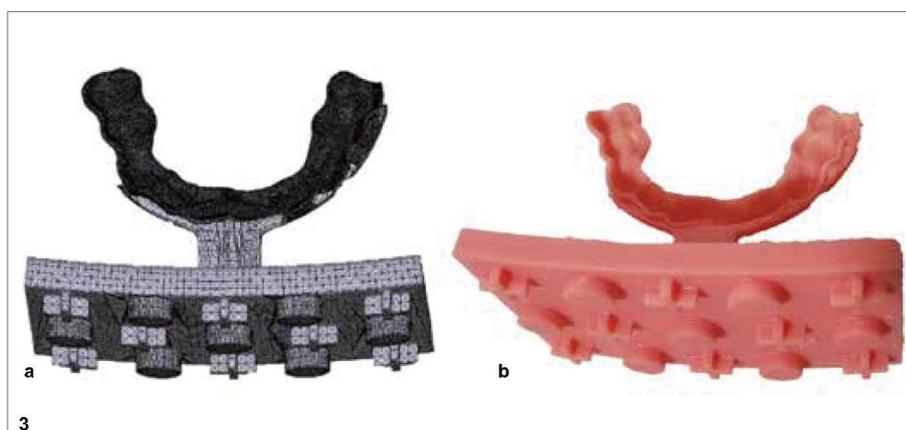


Fig. 3a et b - L'aligneur buccal comprend une partie intra-orale, composée d'une gouttière de positionnement directement modélisée à partir de l'empreinte intra-orale, et une partie extra-orale, qui présente de larges motifs facilement reconnaissables et repositionnables.



Fig. 4 - Photographie extra-orale de face en sourire (a) et de face avec écarteur (b). Le sourire inversé motive la consultation esthétique du sourire.

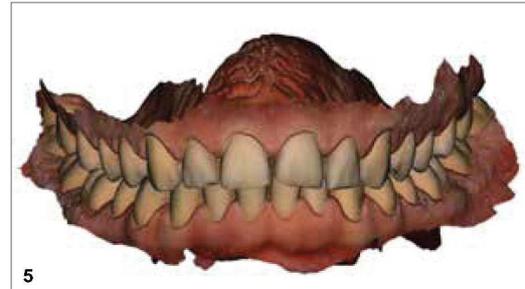


Fig. 5 - Les arcades dentaires en occlusion sont numérisées à l'aide d'une caméra intra-orale (ici, Medit i500), puis exportées en format PLY.

La photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique avec laquelle on réalise la numérisation d'un objet en prenant, simultanément ou non, plusieurs photographies distinctes de cet objet. Un logiciel de photogrammétrie permet ensuite de générer l'objet virtuel.

À défaut de le faire avec un scanner, les praticiens disposant d'un éclairage homogène et d'un appareil photo (d'une résolution minimum de 14 Mp) peuvent réaliser un scan du visage grâce à cette technique [6,7].

Les scanners du commerce

L'utilisation d'un scanner portable pour numériser le visage du patient simplifie le protocole d'acquisition. La gamme de prix d'un tel appareil est très large, et la qualité et la précision de rendu vont souvent de pair avec son coût.

Les aligneurs permettent de pallier le manque de précision de certains appareils. À titre d'exemple, la caméra d'acquisition 3D développée par la société Bellus est accessible et offre des résultats probants. Cette société développe par ailleurs une version logicielle accessible sans équipement supplémentaire sur les dernières générations de tablettes équipées de caméras « TrueDepth ». Toutefois, la limite principale de ces options à faible coût reste la déformation, légère mais présente, du modèle obtenu.

Par ailleurs, d'autres systèmes professionnels, comme le Face Hunter (Zirkonzahn), ou dérivés de l'instrumentation radiologique, comme chez PlanMeca, offrent des solutions plus simples d'utilisation mais aussi beaucoup plus coûteuses.

Application clinique

Afin d'illustrer le principe d'acquisition 3D, nous nous appuyons sur le cas de Monsieur S., 27 ans, présentant une usure au niveau des dents antérieures maxillaires et d'anciennes fractures des angles mésiaux de la 11 et de la 21. La ligne incisive est inversée et le milieu inter-incisif présente un léger décalage par rapport à la ligne médiane du

visage (fig. 4a et b). Le patient souhaite une proposition de traitement esthétique.

Séance d'acquisition intra-orale et extra-orale

L'acquisition intra-orale se fait classiquement à l'aide d'une caméra intra-orale, pour peu que celle-ci puisse exporter son acquisition en format libre, avec sa texture (couleurs), selon le format PLY (fig. 5).

L'acquisition extra-orale du visage peut se faire à l'aide de différentes méthodes. Nous exposerons ci-après nos propres expériences fondées sur le matériel à notre disposition : la photogrammétrie et la caméra 3D Bellus.

Matériel et méthode pour la numérisation du visage par photogrammétrie

Pour réaliser le projet esthétique en trois dimensions, le praticien effectue les acquisitions du visage et des arcades dentaires. Dans le cas décrit, les scans du visage ont été obtenus par reconstruction logicielle à partir de photos prises avec un appareil photo reflex (Nikon D5500). L'application de cette méthode nécessite un éclairage diffus et homogène ainsi qu'une surface libre autour du patient offrant une mobilité au praticien à 180° (où 90° est le principal domaine d'intérêt, face au patient) autour du sujet.

Pour générer le modèle numérique du visage à partir des photographies, l'opérateur utilise un logiciel de photogrammétrie. Il est nécessaire de mettre l'objet virtuel à la bonne échelle. Pour cela, il suffit de mesurer une distance invariable entre deux points fixes du visage (les canthus internes, par exemple) et de la reporter ultérieurement sur le modèle numérique.

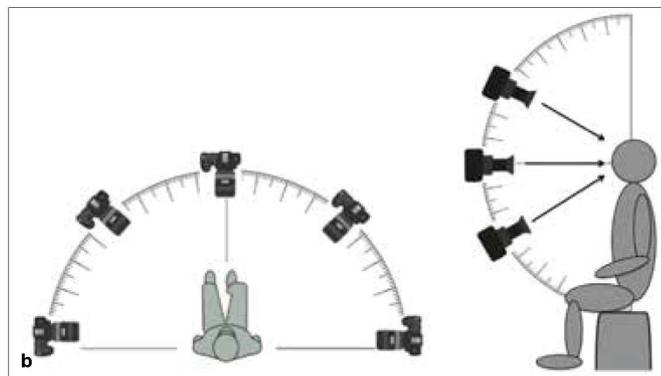
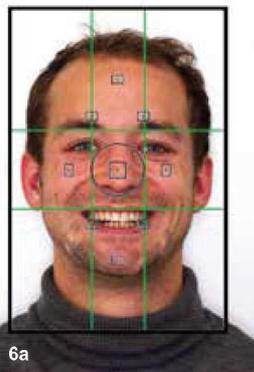
Principe de la capture faciale par photographies

Le patient se tient assis sur un tabouret, dégagé de tout accessoire au niveau du visage, si possible dos contre le mur pour lui permettre de se stabiliser ; il fixe une cible de vue afin de stabiliser son regard à l'horizon.

Les photographies sont à prendre en mode portrait et au plus proche, de manière à ce que seuls la tête et le début du buste du patient soient dans

Le projet esthétique

Fig. 6 - Les clichés portrait ne cadrent que la tête et le début du buste du patient (a). Le praticien réalise une série de clichés du visage autour du patient sur 180° et trois étages (b). Au total, pas moins de 30 à 50 photos sont recommandées pour obtenir une précision du scannage (c), réalisées en mode « rafale » sur le boîtier photographique.



le champ de vision de l'appareil photo (**fig. 6a**). La série de photographies se réalise sur trois étages à 180° autour du patient (**fig. 6b et c**). La précision de rendu 3D de la photogrammétrie permet de réaliser la méthode d'alignement direct, et ne nécessite donc pas l'utilisation d'aligneur. Ainsi, il suffit de réaliser deux séries de photos pour deux numérisations du visage différentes. La première acquisition du visage se fait avec écarteur et la seconde en demandant au patient de sourire (**fig. 7a et b**).

Acquisition extra-orale avec un scanner du commerce (Bellus) (**fig. 8**)

Une autre option d'acquisition consiste à recourir à une caméra 3D au lieu des séries de photographies et du logiciel Photoscan. Le scanner Bellus se place sur une tablette ou un Smartphone; la capture est rapide

et le visage 3D est obtenu instantanément par l'application dédiée. Si cette partie de capture est rapide, la précision du maillage obtenue n'est en revanche pas suffisante pour un alignement direct. Il est nécessaire d'utiliser des aligneurs pour mener à bien l'alignement des scans des arcades avec le visage 3D du patient.

Le praticien réalise une première numérisation du visage du patient avec l'aligneur buccal personnalisé et l'aligneur frontal en place, puis une seconde du visage avec un grand sourire et avec l'aligneur frontal en place (**fig. 9a à c**).

Si l'acquisition semble plus facile avec la tablette et la caméra Bellus, cette méthode nécessite toutefois la préparation d'un aligneur personnalisé et génère des repositionnements qui peuvent être sources de déviations.

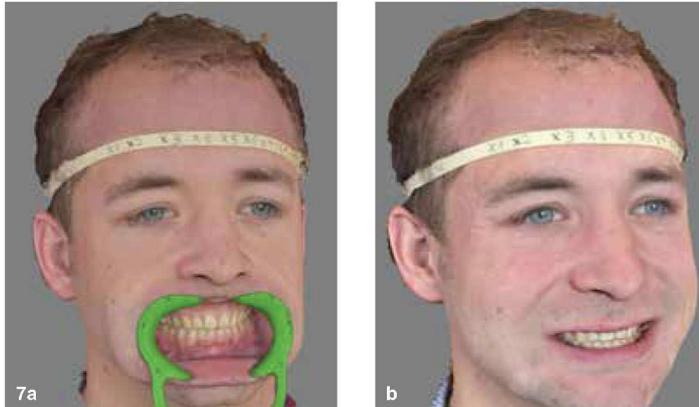


Fig. 7 - Modèle numérique en trois dimensions du visage du patient avec écarteurs (a) et du visage en sourire (b) obtenu grâce au logiciel de photogrammétrie Photoscan (Agisoft).



Fig. 8 - Le patient doit se tenir assis face à la tablette numérique, à une distance de 30 à 40 cm. L'application de scannage Bellus est très intuitive ; elle guide le patient tout au long de la numérisation.

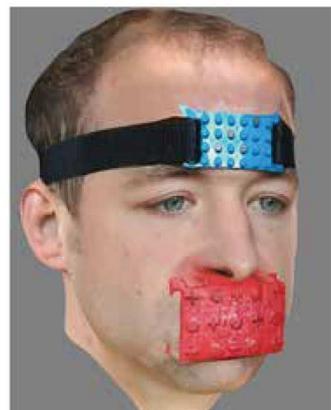
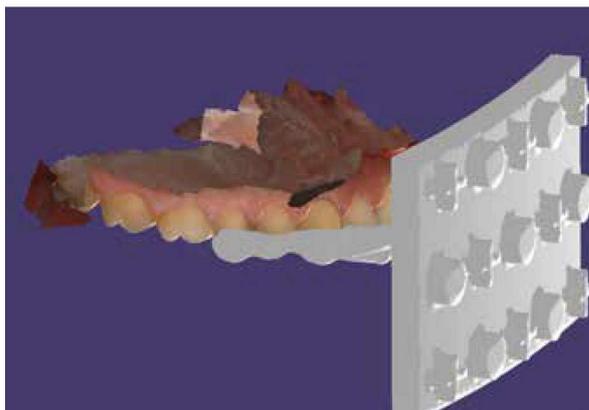


Fig. 9 - Réalisation de la gouttière de positionnement liée avec l'aligneur extra-buccal présentant des formes géométriques repositionnables (a). Modèle numérique en trois dimensions du visage du patient avec aligneurs buccal et frontal en place (b) et du visage en sourire avec aligneur frontal (c), obtenus grâce à la caméra Bellus. Les aligneurs permettent le repositionnement exact des différents scans entre eux.

Conception du sourire

Matériel et méthode (logiciels utilisés et alignement des scans)

L'étape du Smile Design à proprement parler consiste à modéliser le sourire en trois dimensions à partir des repères du visage et du sourire. Dans notre cas, tous les scans issus de la photogrammétrie sont importés et alignés entre eux dans le logiciel de CFAO dentaire Exocad (fig. 10a à d).

Analyse esthétique et modélisation

L'analyse esthétique permet dans un premier temps de confirmer le diagnostic des défauts d'harmonie, et ainsi de déterminer les points sur lesquels travailler par la suite.

Le module d'aide Smile Design du logiciel Exocad offre un nombre important d'outils et de guide à la conception du sourire.

Il a initialement été imaginé pour réaliser le projet esthétique en deux dimensions et le reporter sur l'arcade en trois dimensions. Nous l'utilisons directement sur le scan du visage en trois dimensions et non pas sur les photographies. Après avoir choisi et bien positionné la grille de proportion, la modélisation dent par dent peut commencer (fig. 11a et b).

Une fois le projet terminé (fig. 12), il doit être validé auprès des personnes concernées (export du projet, capture d'écran, lien HTML) : le patient et le praticien. Les possibilités de visualisation tridimensionnelle permettent une excellente communication.

Le projet esthétique

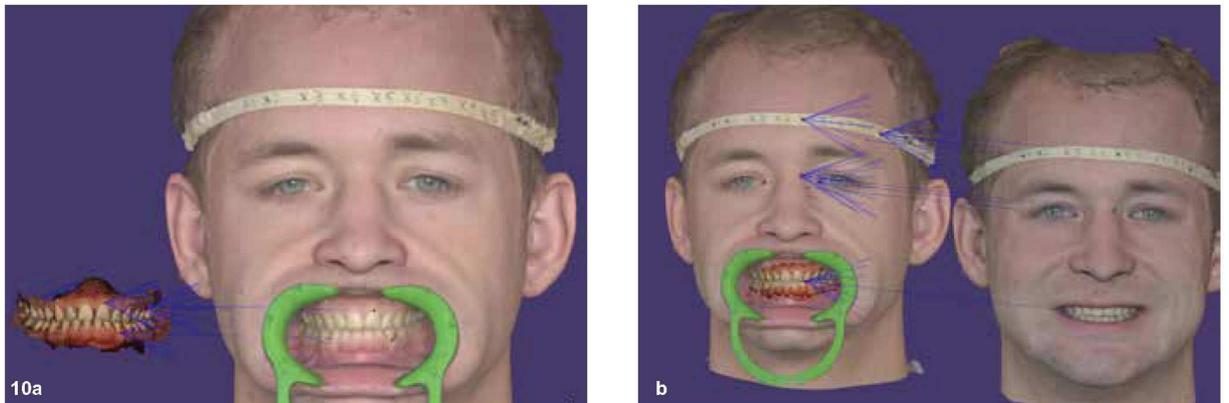


Fig. 10 - Principe des différentes étapes d'alignement. a. Alignement du scan du visage écarteur avec les arcades dentaires. b. Alignement du visage sourire avec le visage écarteur. c. Découpe de la zone des dents du scan du visage sourire pour laisser apparaître les dents de l'empreinte optique (le bourrelet interne de l'épaisseur de la lèvre est fidèlement reproduit). d. Résultat final après alignement des scans.

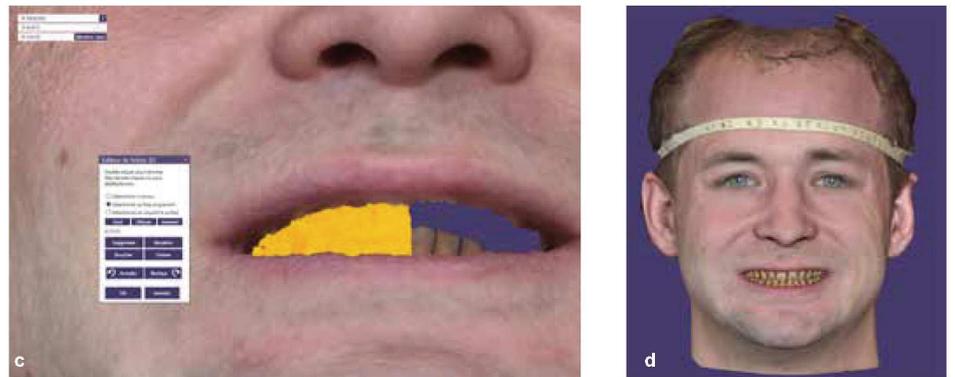
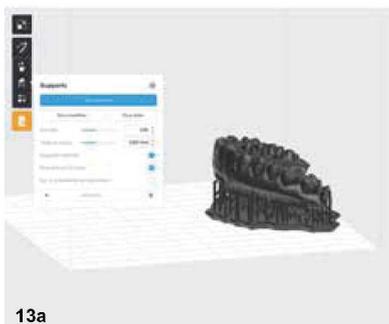


Fig. 11 - L'étape initiale consiste à mettre en place les différents guides esthétiques sur le visage numérique du patient (a). Le logiciel propose ensuite une multitude de patrons de dents différents (templates). Une fois choisie, la modélisation, en groupe ou dent par dent (b), permet de façonner le nouveau sourire du patient.



12

Fig. 12 - Le projet esthétique finale en 3D peut être coloré selon le choix du praticien, afin de répondre aux attentes esthétiques du patient.

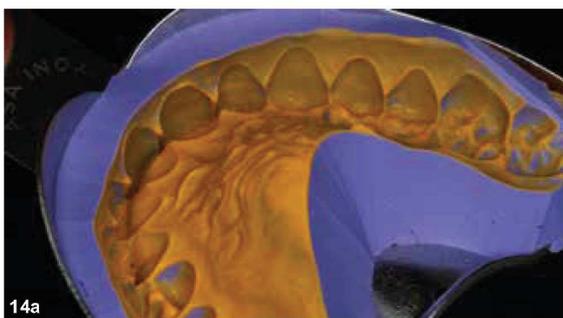


13a



b

Fig. 13a et b - Préparation de l'impression avec le logiciel Preform (a) et modèle 3D du projet esthétique imprimé (b).



14a



b



c

Fig. 14 - Le mock-up est réalisé grâce à une empreinte en silicone du modèle imprimé (a), qui est remplie puis insérée en bouche chargée de résine bis-acryl (Luxatemp Star, DMG-Pred). Les photographies de face et intra-orales avec le mock-up confirment l'intérêt et l'impact esthétique de la réhabilitation du sourire (b et c).

conduisent vers une méthode mixte, plus réaliste, plutôt qu'une méthode « tout numérique ».

Impression du modèle numérique

Depuis le logiciel de CAO, le modèle virtuel est exporté avec les modifications éventuellement apportées. Puis celui-ci est imprimé par stéréolithographie en résine (Formlabs 2) via le logiciel PreForm (**fig. 13a et b**).

Mock-up

Grâce à ce modèle, une clé en silicone est réalisée, puis placée en bouche avec de la résine bis-acryl temporaire afin d'obtenir le mock-up (**fig. 14a à c**).

Validation du projet par le mock-up

La validation du projet prothétique final passe classiquement par la réalisation d'un masque (mock-up). Cette étape est essentielle pour valider l'esthétique, mais aussi et surtout la fonction et la phonation. Plusieurs méthodes sont envisageables ; à ce stade, nos expérimentations nous

Conclusion

En plus d'améliorer la communication patient/praticien/prothésiste, l'analyse esthétique en trois dimensions permet d'obtenir un résultat se rapprochant au plus proche du projet accompli virtuellement. Sans interrompre le flux numérique, et grâce aux nouveaux outils, il est

Le projet esthétique

possible de tendre vers des résultats thérapeutiques plus précis mais surtout plus prédictibles. La plupart des outils actuellement disponibles reposent sur les principes de la photogrammétrie. Parmi ceux-ci, l'utilisation de clichés photographiques et d'un logiciel de reconstruction 3D adapté nous paraît être, à ce jour, la solution la plus fidèle et la plus économique.

Remerciements

Les auteurs remercient la société 3D Dental store pour le prêt de la caméra Medit i500 et de la caméra Bellus.

Bibliographie

1. Rangel FA, Chiu Y-T, Maal TJJ, Bronkhorst EM, Bergé SJ, Kuijpers-Jagtman AM. Does powdering of the dentition increase the accuracy of fusing 3D stereophotographs and digital dental casts. *Eur J Orthod.* 1 août 2016;38(4):440-5.
2. Lam WYH, Hsung RTC, Choi WWS, Luk HWK, Pow EHN. A 2-part facebow for CAD-CAM dentistry. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 1 déc 2016;116(6):843-7.
3. Bowen Antolín A. Digital Flow in Implantology Using Facial Scanner. *GD.* mars 2018;(300):220-32.
4. Rosati R, De Menezes M, Rossetti A, Sforza C, Ferrario VF. Digital dental cast placement in 3-dimensional, full-face reconstruction: A technical evaluation. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 1 juill 2010;138(1):84-8.
5. Rangel FA, Maal TJJ, Bergé SJ, Vlijmen OJC van, Plooi JM, Schutyser F, et al. Integration of digital dental casts in 3-dimensional facial photographs. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 1 déc 2008;134(6):820-6.
6. Salazar-Gamarra R, Seelaus R, da Silva JVL, da Silva AM, Dib LL. Monoscopic photogrammetry to obtain 3D models by a mobile device: a method for making facial prostheses. *J Otolaryngol Head Neck Surg.* 25 mai 2016;45(1):33.
7. Ghoddousi H, Edler R, Haers P, Wertheim D, Greenhill D. Comparison of three methods of facial measurement. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery.* mars 2007;36(3):250-8.

Correspondance :
olivier.etienne@unistra.fr

QUARRÉ (Luc) – Acquisition optique tridimensionnelle du visage : méthode et intérêt dans le projet esthétique.

(Thèse : 3ème cycle Sci. Odontol. : Strasbourg : 2019 ; N° 32)

N° 43.22.19.32

Résumé :

La révolution numérique actuelle permet à quiconque d’accomplir une acquisition en trois dimensions du monde qui l’entoure. En dentisterie, il est désormais possible d’effectuer une capture du visage et de l’aligner de manière précise avec l’empreinte optique intra-orale, afin de concevoir le projet esthétique en trois dimensions. Parmi les moyens d’acquisition, la photogrammétrie constitue une approche simple et de qualité. Équipé d’un appareil photo, en prenant une série de clichés autour de la tête du patient, puis en exploitant un logiciel dédié, le praticien réalise la numérisation du visage. Une autre possibilité consiste à utiliser un scanner commercial. Si celui-ci offre une précision de résolution suffisante, il est aisé d’aligner le visage numérique avec les arcades dentaires. Dans le cas contraire, il est nécessaire d’utiliser un dispositif qui assure le repositionnement des deux acquisitions tridimensionnelles entre elles. Cette thèse présente une méthodologie clinique accessible à moindre coût pour tous, permettant de concevoir un projet esthétique tridimensionnel.

En plus d’améliorer la communication patient/praticien/prothésiste, l’analyse esthétique en trois dimensions permet d’obtenir un résultat se rapprochant au plus proche du projet accompli virtuellement. Sans interrompre le flux numérique, et grâce aux nouveaux outils, il est possible de tendre vers des résultats thérapeutiques plus précis mais surtout plus prédictibles. La plupart des outils actuellement disponibles reposent sur les principes de la photogrammétrie. Parmi ceux-ci, l’utilisation de clichés photographiques et d’un logiciel de reconstruction 3D adapté nous paraît être, à ce jour, la solution la plus fidèle et la plus économique.

Rubrique de classement :

Prothèse

Mots clés : Scan facial, Smile Design 3D, photogrammétrie, Mock-up 3D

Me SH : Face scanning, 3D Smile Design, photogrammetry, 3D Mock-up

Jury :

Président : Professeur HUCK Olivier
Assesseurs : Docteur ETIENNE Olivier
Docteur BAHI-GROSS Sophie
Docteur PYLAVIAN Elise
Membre invité : Docteur GERMAIN Paul

Coordonnées de l’auteur :

Adresse postale :
Luc QUARRÉ
8, rue du Kirchweg
68300 SAINT-LOUIS
Adresse de messagerie : luc.quarre@gmail.com

