UNIVERSITÉ DE LILLE

UFR3S – DÉPARTEMENT ODONTOLOGIE

Année de soutenance : 2026 N° :

THÈSE POUR LE

DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le 18 août 2026

Par Imane KARRAT

Le mock-up à l'ère du numérique : vers une planification esthétique plus prévisible, validable et transférable

JURY

Président : Professeur Kevimy AGOSSA

Assesseurs : Docteur Corentin DENIS

Docteur Xavier COUTEL

Docteur Adam ABED

Président de l'Université :	Pr. R. BORDET
Directrice Générale des Services de l'Université :	A.V. CHIRIS FABRE
Doyen UFR3S :	Pr. M. HAZAN
Directrice des Services d'Appui UFR3S :	A. PACAUD
Vice-doyen département facultaire UFR3S-Odontologie :	Pr. C. DELFOSSE
Responsable des Services :	L. KORAÏCHI
Responsable de la Scolarité :	V. MAURIAUCOURT

PERSONNEL ENSEIGNANT DE LA FACULTE

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

K. AGOSSA	Parodontologie
P. BOITELLE	Prothèses
T. COLARD	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DELFOSSE	**Vice-doyen du département UFR3S-Odontologie** **Odontologie Pédiatrique** **Responsable du département d'Orthopédie dento-faciale**
M. DEHURTEVENT	**Co-responsable du département de Prothèses**
B. LOUVET	Chirurgie orale (Professeur des universités associé)
T. MARQUILLIER	Odontologie Pédiatrique
L. ROBBERECHT	**Responsable du département de Dentisterie** **Restauratrice Endodontie**

MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale
F. BOSCHIN	Parodontologie
F. CATHALA	Prévention,Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale (Maître de conférences des Universités associé)
C. CATTEAU	**Responsable du département de Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.**
X. COUTEL	Biologie Orale
A. de BROUCKER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
C. DENIS	**Co-responsable du département de Prothèses**
F. DESCAMP	Prothèses
M. DUBAR	**Responsable du département de Parodontologie**
A. GAMBIEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
M. LINEZ	Dentisterie Restauratrice Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	**Responsable du département de Chirurgie Orale Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHU Lille**
C. OLEJNIK	**Responsable du département de Biologie Orale**
P. OLEKSIAK	Dentisterie Restauratrice Endodontie (Maître de conférences des Universités associé)
H. PERSOON	Dentisterie Restauratrice Endodontie (Maître de conférences des Universités associé)
C. PRUVOST	Prévention,Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale (Maître de conférences des Universités associé)
P. ROCHER	Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux
M. SAVIGNAT	**Responsable du département de Fonction-Dysfonction, Imagerie,Biomatériaux**
T. TRENTESAUX	**Responsable du département d'Odontologie Pédiatrique**
J. VANDOMME	Prothèses
R. WAKAM KOUAM	Prothèses

PRATICIEN HOSPITALIER et UNIVERSITAIRE

M. BEDEZ Biologie Orale

Réglementation de présentation du mémoire de Thèse

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

Remerciements,

Aux membres du jury…

Monsieur le Professeur Kevimy AGOSSA

Professeur des Universités – Praticien hospitalier
Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale
Département Parodontologie

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur de l'Université de Lille – mention Sciences de la vie et de la santé
Habilitation à Diriger des Recherches (Université de Lille)

Master II Santé publique *Évaluation médico-économique Recherche Clinique*
C.E.S de Parodontologie
Attestation d'Études Approfondies en Odontologie

Ancien Assistant des Hospices Civils de Lyon
Ancien Interne en Odontologie
Lauréat de l'Académie Nationale de Chirurgie Dentaire

Responsable de l'Unité Fonctionnelle de Parodontologie au CHU de Lille
Chargé de mission Relations Internationales

Vous me faites l'honneur de présider ce jury et je vous en suis très reconnaissante. J'ai eu la chance de bénéficier de votre enseignement, dont la rigueur et la clarté m'ont durablement marquée. Vous êtes aussi celui qui m'a fait changer d'avis sur la parodontologie, et ce regard neuf m'accompagnera tout au long de ma pratique. Vous vous êtes toujours rendu disponible, et vous avez accepté de présider ce jury sans la moindre hésitation, alors même que le sujet vous éloignait de votre discipline. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon plus grand respect.

Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier
Section de Réhabilitation Orale
Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur de l'Université de Lille, Mention Sciences de la Vie et de la Santé, Innovation technologique - Odontologie
Master II « Sciences du médicaments » - Parcours « Dispositifs Médicaux–Biomatériaux » - Université Lille2
C.E.S Prothèses Fixées – Université d'Aix-Marseille
Diplôme Universitaire d'Odontologie Numérique – Université de Montpellier

Vous avez accepté de prendre part au jury de cette thèse, et je vous en remercie.
Votre expertise en prothèse et la qualité de vos enseignements de deuxième année ont contribué à ma formation. Nos chemins ne se sont pas beaucoup croisés en clinique, mais si je sais aujourd'hui reconnaître une contre-dépouille, c'est indiscutablement grâce à vous.
Veuillez trouver ici le témoignage de ma gratitude et de toute ma considération.

Monsieur le Docteur Xavier COUTEL

Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier
Section Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale
Département Biologie Orale

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur de l'Université de Lille (Biologie Orale)

Master « Sciences, Technologies, Santé mention « Biologie cellulaire, Physiologie et Pathologies » - Spécialité « Biologie, Biomorphologie, Bio ingénierie du squelette » (Paris Descartes)

Je suis heureuse de vous compter parmi les membres de ce jury, et je vous remercie d'avoir accepté d'y siéger. J'ai eu la chance de vous côtoyer en cours comme en clinique, et j'y ai toujours trouvé le même calme et la même bienveillance. Dans ces moments où l'on doutait beaucoup, votre sérénité valait bien des enseignements, et je tâcherai de m'en souvenir dans ma pratique. Veuillez trouver ici l'expression de ma gratitude et de mon respect.

Monsieur le Docteur Adam ABED

Chef de Clinique des Universités – Assistant Hospitalier des CSERD
Section Réhabilitation Orale
Département Prothèses

Docteur en Chirurgie Dentaire
Master 1 « Sciences du médicament » - Parcours « Dispositifs Médicaux – Biomatériaux » – Université de Lille
Master 2 « Sciences du médicament » - Parcours « Dispositifs Médicaux– Biomatériaux » – Université de Lille
Diplôme Universitaire – DU Clinique d'occlusodontie et de réhabilitation fonctionnelle – Université de Lille
Certificat d'études supérieures universitaires - CESU Biomatériaux et techniques en dentisterie préventive adhésive, esthétique et numérique - Faculté d'Odontologie Aix Marseille Université
Diplôme Universitaire - DU Esthétique du Sourire - Université de Strasbourg

Tu as accepté de diriger cette thèse et de m'accompagner tout au long de sa réalisation. Je tiens à t'exprimer ma gratitude pour tes conseils, ta disponibilité et la confiance que tu m'as accordée. Ton exigence, tes remarques et la rigueur de ton suivi m'ont permis de progresser et d'approfondir ce sujet bien au-delà de ce que j'imaginais au départ. Je te remercie également pour ta patience et ta compréhension. Malgré les difficultés rencontrées et les délais parfois plus longs que prévu, tu m'as toujours accompagnée avec bienveillance. Je te prie de trouver dans ce travail ma reconnaissance, mon respect et mes remerciements les plus chaleureux.

Abréviations

2D : Deux dimensions

3D : Trois dimensions

APT : Aesthetic Pre-evaluative Temporary

BFEP : Bonded Functional Esthetic Prototype

CAO : Conception assistée par ordinateur

CBCT : Cone Beam Computed Tomography

CFAO : Conception et fabrication assistées par ordinateur

DLP : Digital Light Processing

DSD® : Digital Smile Design®

DSS® : Digital Smile System®

DVO : Dimension verticale d'occlusion

FAO : Fabrication assistée par ordinateur

IA : Intelligence artificielle

OIM : Occlusion d'Intercuspidie Maximale

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle

PVS : Polyvinylsiloxane

SLA : Stereolithography Apparatus

STL : Standard Tessellation Language

Sommaire

INTRODUCTION **13**

1 LE MOCK-UP : FONDEMENTS ET INTEGRATION DANS LA DEMARCHE THERAPEUTIQUE **15**

1.1 DEFINITION, TERMINOLOGIE ET TECHNIQUES DE REALISATION 15

1.2 ÉVOLUTION HISTORIQUE ET RUPTURE NUMERIQUE 20

1.2.1 Approche traditionnelle et évolution : conception au laboratoire, transfert par moulage *20*

1.2.2 Transition vers le numérique : facteurs déclencheurs et chronologie *21*

1.2.3 Évolution du rôle du mock-up : de la visualisation à la validation intégrée du projet *23*

1.3 PLACE DU MOCK-UP DANS LE PLAN DE TRAITEMENT CONTEMPORAIN 24

1.3.1 Fonctions diagnostiques, esthétiques et fonctionnelles *24*

1.3.2 Fonction de communication *28*

1.3.3 Guide de préparation et référence morphologique *29*

2 FLUX NUMERIQUE DU MOCK-UP : DE L'ACQUISITION DES DONNEES A LA MATERIALISATION CLINIQUE **30**

2.1 ACQUISITION DES DONNEES : CONSTRUIRE UNE BASE CLINIQUE EXPLOITABLE 31

2.1.1 Acquisition photographique et calibration *31*

2.1.2 Empreintes optiques, fiabilité de l'acquisition et intégration des données *33*

2.2 CONCEVOIR LE PROJET : QUATRE DEGRES D'INTEGRATION NUMERIQUE 34

2.3 MATERIALISER LE PROJET : TECHNIQUES DE FABRICATION DU MOCK-UP NUMERIQUE 38

2.3.1 Choix des matériaux : des propriétés adaptées à une fonction *38*

2.3.2 Fabrication additive : technologies et paramètres *42*

2.3.3 Fabrication soustractive : technique, indications et limites *44*

3 ILLUSTRATIONS CLINIQUES : TROIS DEGRES D'INTEGRATION NUMERIQUE **45**

3.1 CAS 1 : FLUX MIXTE 2D-3D ET TRANSFERT ANALOGIQUE 46

3.2 CAS 2 : CONCEPTION 3D ET RESTAURATION D'ESSAI AU FAUTEUIL 50

3.3 CAS 3 : PLANIFICATION INTEGREE PAR PATIENT VIRTUEL DYNAMIQUE 54

3.4 CE QUE L'ENCHAINEMENT DES TROIS CAS MET EN EVIDENCE 59

4 DISCUSSION **61**

4.1 CE QUE LE NUMERIQUE CHANGE ET CE QU'IL NE CHANGE PAS 61

4.2 INTERET REEL POUR L'OMNIPRATICIEN : INDICATIONS ET CHOIX DU FLUX 62

4.3 COUT, ACCESSIBILITE ET STRATEGIE D'INTEGRATION EN PRATIQUE COURANTE 63

5 PERSPECTIVES **66**

CONCLUSION **67**

REFERENCES **68**

LISTE DES TABLES **72**

LISTE DES FIGURES **73**

Introduction

En dentisterie, l'écart entre le résultat attendu par le patient et le résultat obtenu est une source classique d'insatisfaction, notamment lorsque les attentes et les limites du traitement n'ont pas été suffisamment discutées en amont [1,2]. Le principe du gradient thérapeutique conduit donc à privilégier, lorsque la situation clinique le permet, les options les plus conservatrices [3]. La prévisibilité du résultat dépend ainsi de la maîtrise du geste clinique, mais également de la pertinence du projet initial et de sa validation avant le traitement définitif [2,4].

Le mock-up répond à cet objectif en matérialisant temporairement le projet directement en bouche. Dans sa forme diagnostique, il est réalisé sur des dents non préparées, sans protocole adhésif, puis déposé à l'issue de l'essayage [4,5]. Il permet au patient et au praticien d'évaluer en trois dimensions l'intégration esthétique du projet ainsi que certains paramètres fonctionnels avant toute préparation dentaire [2–4]. Cette validation préalable en fait une étape clé des traitements esthétiques planifiés [4].

Le flux analogique repose sur plusieurs étapes successives, de l'empreinte au transfert intra-oral du mock-up. Les étapes de moulage et le transfert par clé en silicone peuvent introduire des écarts liés aux propriétés de la clé, à son positionnement, à la pression exercée pendant la polymérisation et à la gestion des excès de résine [6,7]. À lui seul, le modèle d'étude ne permet d'évaluer ni l'intégration du projet par rapport aux repères faciaux, ni la dynamique du sourire [8,9].

Le développement de l'empreinte optique, de la conception assistée par ordinateur (CAO) et des procédés de fabrication numérique a progressivement modifié la conception et la matérialisation du projet esthétique [9,10]. Ces outils permettent de conserver, de modifier et de dupliquer les données du projet avant sa fabrication [9,10]. Le Digital Smile Design® (DSD®), initialement fondé sur une analyse photographique bidimensionnelle (2D), a structuré la planification esthétique autour de repères dentaires, labiaux et faciaux [8].

Les données consacrées au mock-up numérique restent limitées. Les études comparant directement les procédés conventionnels, additifs et soustractifs sont encore peu nombreuses [11]. Les travaux portant plus largement sur la planification numérique du sourire présentent également une hétérogénéité des protocoles, des outils étudiés et des critères d'évaluation [12]. Au-delà de l'apport technologique, le flux numérique modifie-t-il réellement la prévisibilité, la validation clinique et la fidélité du transfert du projet esthétique, ou en modifie-t-il seulement les modalités de conception et de fabrication ?

Ce travail poursuit trois objectifs : préciser la place du mock-up dans la planification esthétique contemporaine, analyser les modifications apportées par le numérique à la conception et au transfert du projet, puis examiner si les données disponibles permettent de conclure à une amélioration conjointe de sa prévisibilité, de sa validation clinique et de la fidélité de son transfert.

La première partie rappelle les fondements conceptuels du mock-up, retrace son évolution et précise sa place dans le plan de traitement. La deuxième décrit le flux numérique, de l'acquisition des données à la matérialisation clinique. La troisième présente trois illustrations cliniques correspondant à des degrés croissants d'intégration numérique. Ces observations sont ensuite discutées au regard de la littérature avant d'aborder les principales perspectives d'évolution.

Cette démarche s'appuie sur une revue narrative de la littérature plutôt que sur une méthodologie systématique. Elle vise à organiser un champ encore peu structuré par des données comparatives.

1 Le mock-up : fondements et intégration dans la démarche thérapeutique

1.1 Définition, terminologie et techniques de réalisation

La planification esthétique repose sur deux outils complémentaires mais distincts : le wax-up et le mock-up, réalisés selon des flux analogiques (Figure 1) ou numériques (Figure 2). Le wax-up est une maquette tridimensionnelle conçue au laboratoire sur modèle d'étude, permettant d'anticiper la morphologie, les proportions et les rapports occlusaux avant de définir le projet esthétique [4].

Dans sa forme diagnostique classique, le mock-up constitue la transposition clinique intra-orale du wax-up, réalisée sur des dents non préparées et de manière réversible [4]. Il permet de vérifier l'intégration clinique du projet avant toute intervention irréversible [1,4]. Un wax-up jugé satisfaisant sur le modèle d'étude peut néanmoins révéler des défauts d'intégration lors de son transfert clinique, notamment au repos, au sourire et pendant la phonation [4].



Figure 1 : Wax-up diagnostique sur modèle analogique (courtoisie Dr Bechrouri)

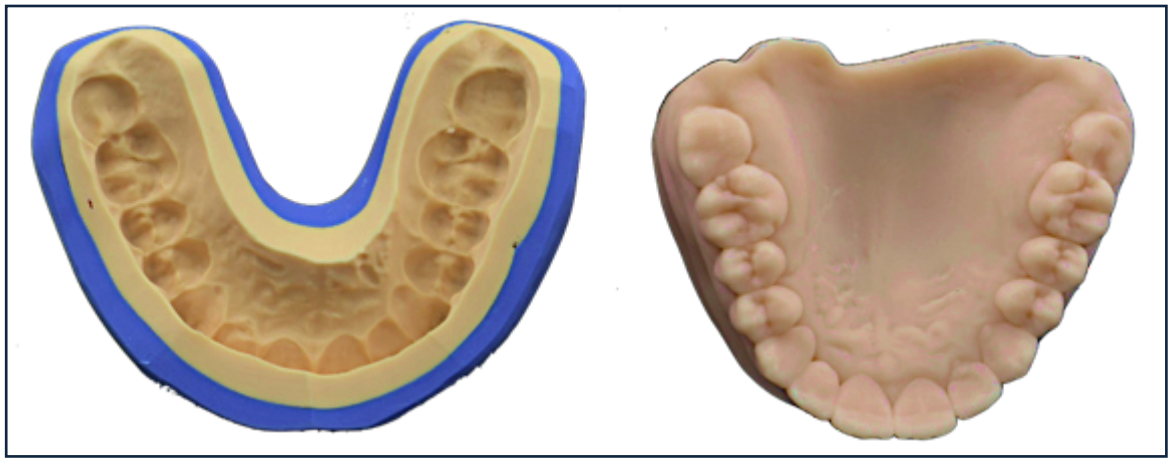


Figure 2 : Clé de transfert en silicone de laboratoire, réalisée en double mélange et wax-up sur modèle imprimé en 3D (courtoisie Dr Dupont)

L'essayage intra-oral permet d'apprécier les rapports dento-labiaux, la phonation [4] et l'intégration dento-faciale [1]. Le mock-up constitue ainsi un support commun de communication et de décision pour le praticien, le patient et le prothésiste [1,2].

Plusieurs dénominations sont utilisées dans la littérature anglo-saxonne pour désigner différentes variantes cliniques. Dans ce travail, le terme « mock-up » est retenu comme terme de référence. L'Aesthetic Pre-evaluative Temporary (APT), décrite par Gürel, correspond à un mock-up pré-évaluatif utilisé notamment pour guider la préparation des facettes céramiques [13]. Le Bonded Functional Esthetic Prototype (BFEP), proposé par McLaren, désigne un prototype composite collé pouvant servir de restauration pré-thérapeutique ou de solution provisoire à moyen terme. Il permet une évaluation prolongée de l'esthétique, de la fonction et de la stabilité avant le traitement définitif [14]. Ces dénominations ne sont donc pas strictement synonymes. Elles se distinguent par leur protocole de réalisation, leur durée d'utilisation et leurs indications cliniques. Le Tableau 1 en synthétise les principales caractéristiques cliniques.

Tableau 1 : Typologie et caractéristiques cliniques du mock-up en dentisterie contemporaine (illustration personnelle)

Terminologie (FR/EN)	Indication principale	Caractéristiques cliniques	Réf.
Aesthetic Pre-evaluative Temporary **(APT)**	Aide à la préparation et guidage thérapeutique	Mock-up pré-évaluatif ; permet des préparations guidées à travers le masque, approche minimalement invasive	[13]
Bonded Functional Esthetic Prototype **(BFEP)**	Validation esthétique et fonctionnelle prolongée ; cas d'usures, modification de la DVO	Collé, porté sur une durée prolongée ; test et validation de la dimension verticale d'occlusion (DVO) Permet l'intégration esthétique et le rodage fonctionnel avant les restaurations définitives	[14]
Mock-up partiel de réhabilitation	Réhabilitation sectorielle	Collé, simulation sectorielle	[15]
Full mock-up ***(mock-up complet de réhabilitation)***	Réhabilitations globales, uni- ou bi-maxillaire ; cas d'usures, modification de la DVO	Collé, simulation complète d'une ou de deux arcades, validation de la DVO et de l'intégration fonctionnelle	[16]

Les techniques de réalisation du mock-up vont de l'approche directe à main levée aux protocoles guidés et aux flux numériques indirects les plus sophistiqués.

La technique directe, réalisée à main levée, est rapide et peu coûteuse mais reste très dépendante de la technicité de l'opérateur [5].

Les techniques guidées nécessitent principalement l'utilisation d'une clé en silicone transparente issue soit d'un enregistrement préalable en bouche, soit d'un wax-up de laboratoire afin de mieux maîtriser le transfert intra-oral du projet [17,18].

Parmi les techniques guidées figurent la *stamp technique* (technique du tampon), la *molding technique* (technique par moulage du composite) et l'*injected composite technique* (technique d'injection du composite). Le choix dépend de la complexité clinique, du niveau de fidélité recherché et des moyens disponibles.

Les techniques numériques indirectes reposent, quant à elles, sur un flux CFAO (conception et fabrication assistée par ordinateur) dématérialisé [19].

Le Tableau 2 compare ces approches selon leurs principes, matériaux, avantages et limites. Les aspects relatifs aux matériaux seront développés en détail dans la section 2.3.1, à la page 38.

Tableau 2 : Principales techniques de réalisation du mock-up : principes, matériaux, avantages et limites (illustration personnelle)

Technique	Principe	Matériaux	Avantages	Limites	Réf.
Directe	Application à main levée	Composite fluide ou visqueux	Rapide, simple, économique	Opérateur-dépendant ; cas simples	[5]
Directe guidée	Clé issue d'un enregistrement initial en bouche ou d'un wax-up de laboratoire (physique ou virtuel/numérique par CAO)	Composite fluide chargé (*injected composite technique*) ou composite visqueux réchauffé (*stamp/molding technique*)	Bonne fidélité du transfert, reproductibilité améliorée par rapport à la technique directe	Dépend d'un projet préalable	[17,18,20]
Indirecte	Clé issue d'un wax-up de laboratoire (physique ou virtuel/numérique par CAO)	Résines bis-acryliques	Fidélité de transfert cliniquement acceptable (≈100 µm), technique de référence pour la préparation des facettes	Dépend d'un projet préalable	[1,4,6,7]
Indirecte (numérique par CFAO)	Wax-up virtuel/numérique par CAO + impression ou usinage (FAO)	Blocs de PMMA usinés, résines PMMA photo-polymérisables	Fidélité de transfert, stabilité dimensionnelle, archivage	Équipement nécessaire, coût, contraintes d'insertion et rendu esthétique dépendant du procédé	[6,19,21,22]

1.2 Évolution historique et rupture numérique

1.2.1 Approche traditionnelle et évolution : conception au laboratoire, transfert par moulage

La prévisualisation esthétique en dentisterie n'est pas un concept récent. Dès les années 1990, l'analyse esthétique s'est structurée autour de l'étude de la forme, de la couleur, de la texture de surface et de l'intégration dento-faciale des restaurations fixes [9,23]. Cette démarche, fondée sur l'observation clinique et la photographie analogique, a longtemps constitué le socle de la planification esthétique en prothèse fixée. Dans ce contexte, le wax-up en cire, réalisé manuellement par le prothésiste sur un modèle en plâtre, permettait de matérialiser le projet en trois dimensions [4]. Le mock-up en assurait la transposition clinique, le plus souvent à l'aide d'une clé en silicone chargée de résine auto-polymérisable et appliquée sur les dents non préparées [4].

Dans les années 2000, Simon et Magne ont décrit un protocole en deux étapes destiné à améliorer la prévisibilité des traitements esthétiques [4]. Un premier mock-up en composite, dit préliminaire, était évalué et ajusté en bouche afin d'établir des repères cliniques. Ces informations étaient ensuite transmises au laboratoire pour guider la conception du wax-up. Un second mock-up, dit secondaire, issu de ce wax-up, était réessayé en bouche pour valider le projet. L'apport du protocole résidait surtout dans la nature du référentiel transmis au laboratoire : un modèle physique reproduisant des repères définis cliniquement. Sa conservation et sa transmission reposaient toutefois sur des supports matériels et photographiques.

1.2.2 Transition vers le numérique : facteurs déclencheurs et chronologie

L'intégration progressive du numérique en dentisterie s'est appuyée sur le développement de la CFAO, des scanners intra-oraux, de l'imagerie 3D et des logiciels de planification esthétique [9]. En 1985, François Duret a présenté un dispositif de CFAO dentaire associant un scanner optique à une unité de fraisage à commande numérique, marquant une étape fondatrice de cette évolution [9].

Le développement de l'impression 3D a ensuite élargi les possibilités de fabrication numérique [22]. Parallèlement, la photographie a été intégrée aux logiciels de planification et d'analyse esthétique [24] (Figure 3). Ces outils ont permis de concevoir, de modifier et de dupliquer le projet sous forme numérique avant sa fabrication [9].

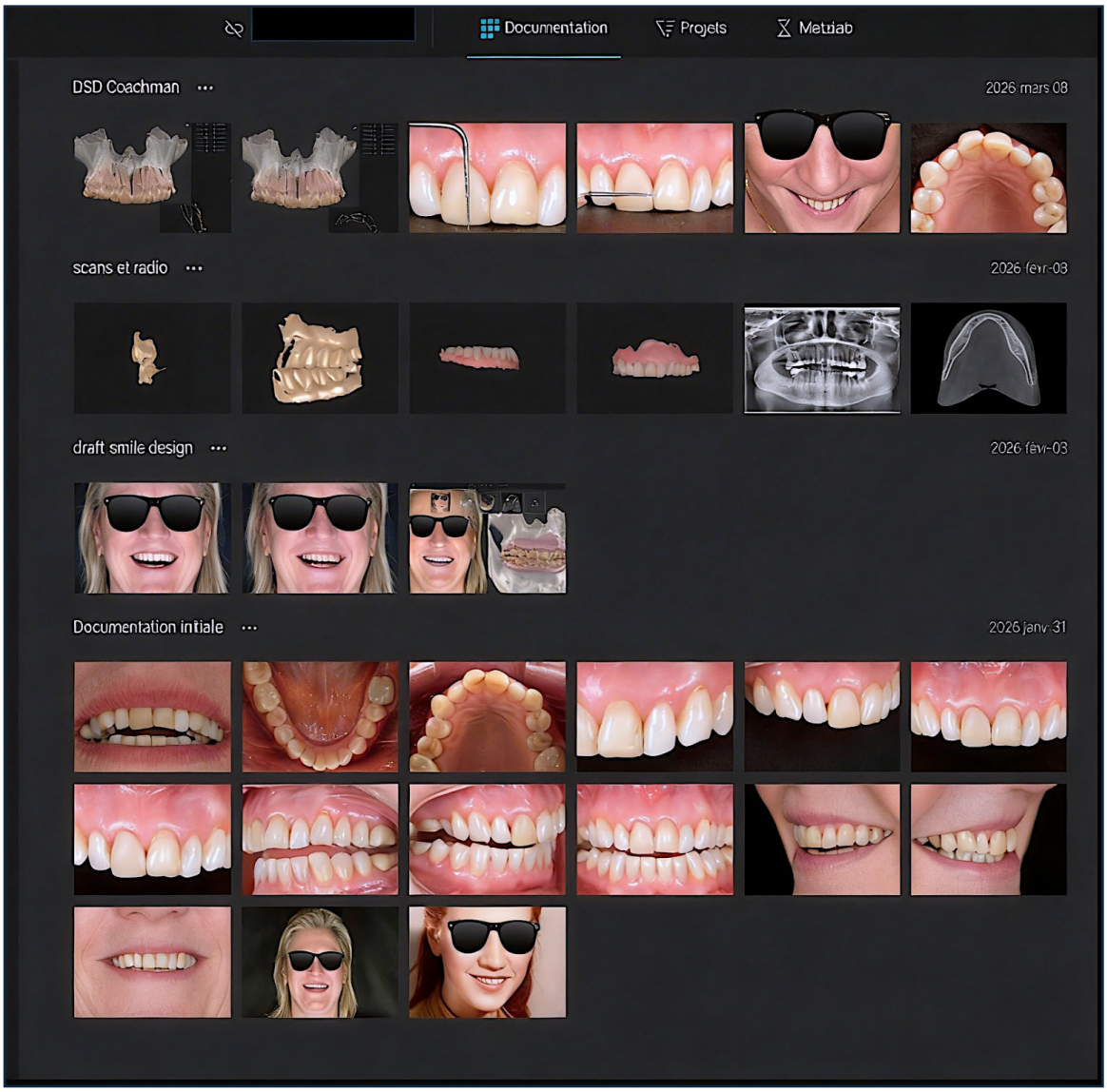


Figure 3 : Bibliothèque de données centralisées sur le logiciel Smilecloud® (courtoisie Dr Abed)

Le Digital Smile Design® (DSD®), développé à partir de 2008 puis décrit par Coachman et Calamita en 2012, a structuré la planification esthétique numérique (Figure 4). Le protocole initial reposait sur l'analyse de photographies extra- et intra-orales du visage et du sourire. Des repères et des mesures étaient tracés sur ces images, puis transférés sur le modèle en plâtre afin de guider la réalisation du wax-up [8,9]. Ce flux restait hybride, associant une analyse numérique en deux dimensions à une matérialisation analogique. Les évolutions ultérieures du Smile Design ont permis d'intégrer les photographies, les modèles dentaires numériques et les scans faciaux dans une planification esthétique tridimensionnelle [9,25].

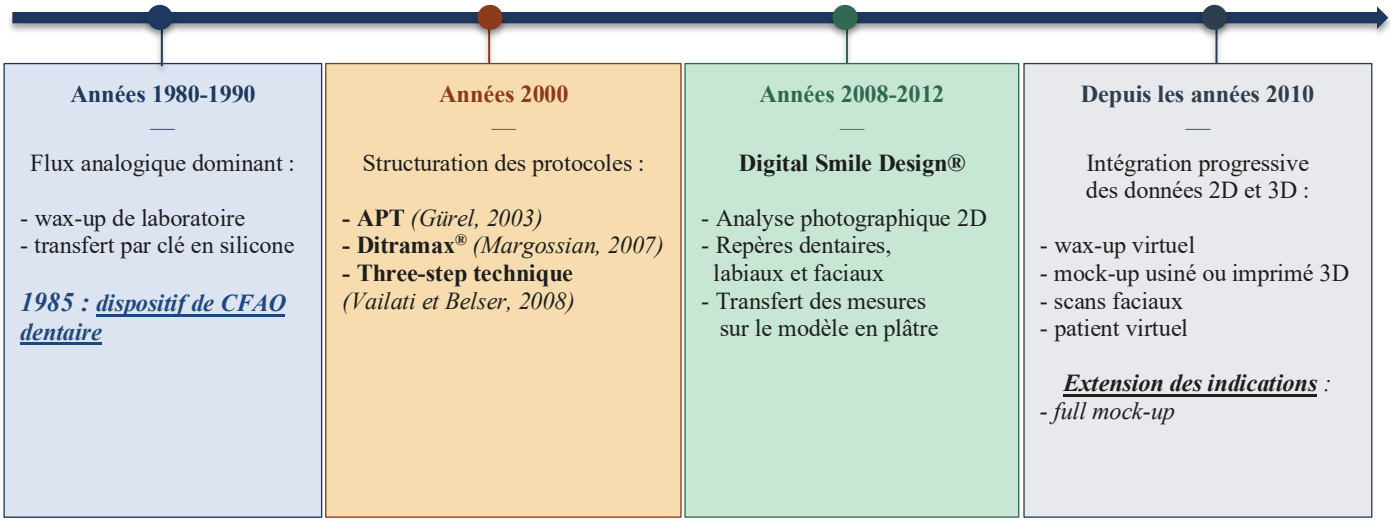


Figure 4 : Évolutions chronologiques et place du mock-up dans le flux numérique (illustration personnelle)

1.2.3 Évolution du rôle du mock-up : de la visualisation à la validation intégrée du projet

Dans un flux numérique intégré, le wax-up virtuel sert de référence à la fabrication du mock-up par usinage ou impression 3D [19,25]. Conservé sous forme de fichiers, le projet esthétique peut être modifié, archivé et partagé tout au long du traitement [8].

Contrairement au flux conventionnel, qui repose sur une succession d'étapes analogiques - empreinte physique, modèle en plâtre, wax-up diagnostique, puis transfert par clé en silicone -, le flux numérique permet de conserver un même projet de référence entre la conception du wax-up et la fabrication du mock-up [4,19,25] (Figure 5). Cette continuité limite certaines étapes manuelles susceptibles d'introduire des écarts, sans supprimer les sources d'erreur propres à l'acquisition, à la conception et à la fabrication numériques [19,26].

Le mock-up constitue alors la matérialisation clinique du projet esthétique [4]. Son essayage en bouche permet d'en apprécier l'intégration en situation clinique réelle et de le valider avant le traitement définitif [2,4]. Si les outils numériques ont diversifié ses modalités de conception, de fabrication et de transfert [4,19,25], les critères sur lesquels repose son évaluation demeurent inchangés : l'analyse du visage, les proportions dentaires et les rapports dento-labiaux [8,23].

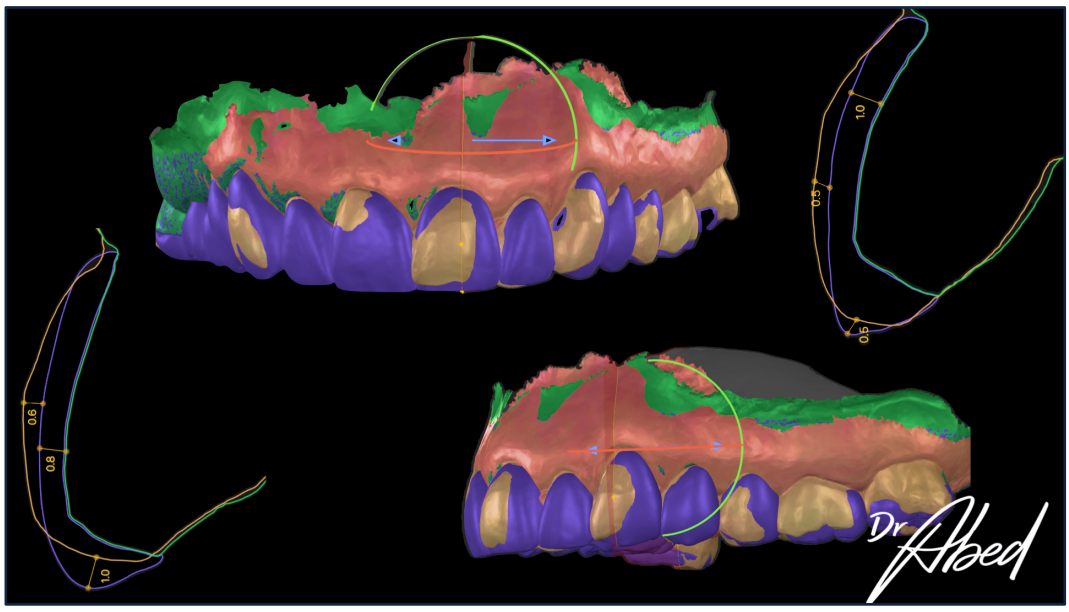


Figure 5 : Superposition des fichiers d'empreintes optiques et coupes correspondantes, enregistrés aux différentes étapes de la réhabilitation : situation initiale en jaune ; préparations dentaires en bleu ; projet prothétique issu du wax-up virtuel en violet (courtoisie Dr Abed)

1.3 Place du mock-up dans le plan de traitement contemporain

1.3.1 Fonctions diagnostiques, esthétiques et fonctionnelles

Le mock-up a d'abord une fonction diagnostique. Essayé en bouche, il permet d'évaluer le projet au repos, au sourire et lors de la phonation, en tenant compte de ses rapports dento-labiaux et de son intégration dento-faciale [4]. Contrairement à la prévisualisation virtuelle, cet essayage confronte le projet aux conditions cliniques réelles et permet d'identifier les ajustements nécessaires avant tout acte irréversible [2,4].

La Figure 6 illustre cette fonction. La comparaison entre la situation initiale et le projet matérialisé en bouche par le mock-up met en évidence, à l'échelle dentaire, des pertes de substance et des disproportions coronaires et, à l'échelle dento-gingivale, une ligne des collets irrégulière. Ces éléments conduisent à associer une prise en charge parodontale à la réhabilitation prothétique.

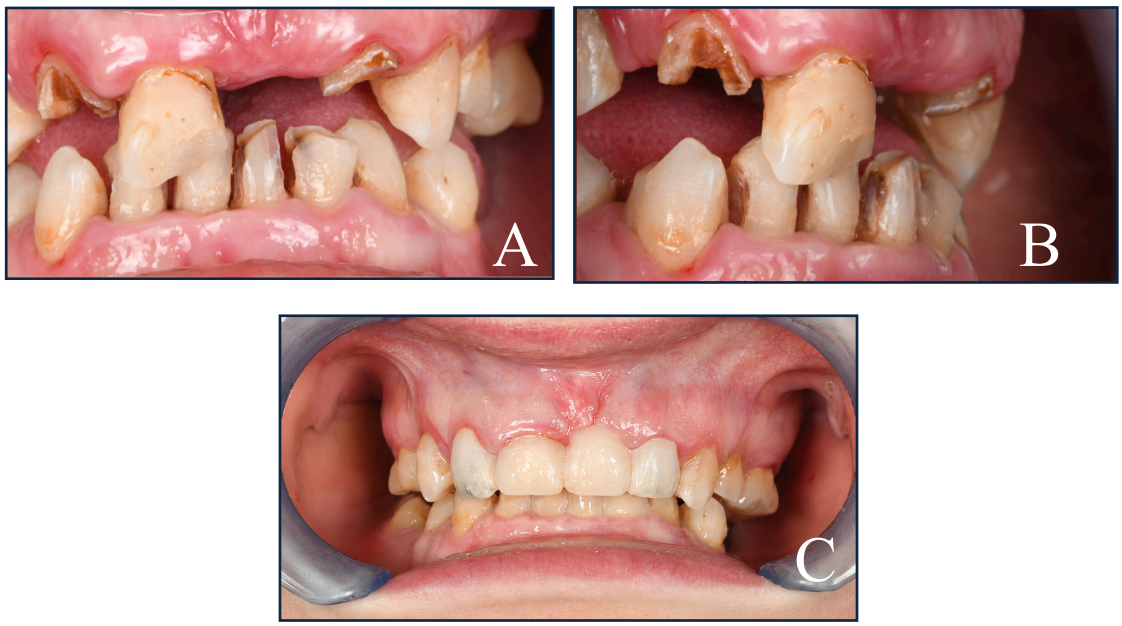


Figure 6 : Mock-up de validation dans une réhabilitation globale avec indication parodontale (courtoisie Dr Abed)
A : vue endobuccale initiale
B : vue endobuccale initiale de profil
C : essayage du mock-up en bouche

L'évaluation esthétique du projet, puis du mock-up, suit une progression séquentielle, de l'analyse faciale (Figure 7) à l'analyse dento-labiale (Figure 8), dento-gingivale et dentaire (Figures 8 et 9) [5,24].

À l'échelle du visage, l'analyse repose sur des repères verticaux et horizontaux. Dans le sens vertical, la racine des cheveux, la ligne bi-ophryaque, le point sous-nasal et le menton délimitent trois étages faciaux - supérieur, moyen et inférieur - dont l'équilibre constitue un repère classique de l'harmonie verticale du visage [27]. Dans le sens horizontal, la ligne bi-pupillaire, perpendiculaire à la ligne médiane, constitue un repère majeur. Les lignes bi-ophryaque et bi-commissurale participent également à l'évaluation de l'orientation générale du sourire dans le cadre facial [23,24]. Ces lignes constituent des repères d'analyse sans imposer un parallélisme absolu entre le plan incisif, la ligne des collets et la ligne bi-pupillaire. L'évaluation porte sur la cohérence globale de leur orientation dans le cadre facial [23].

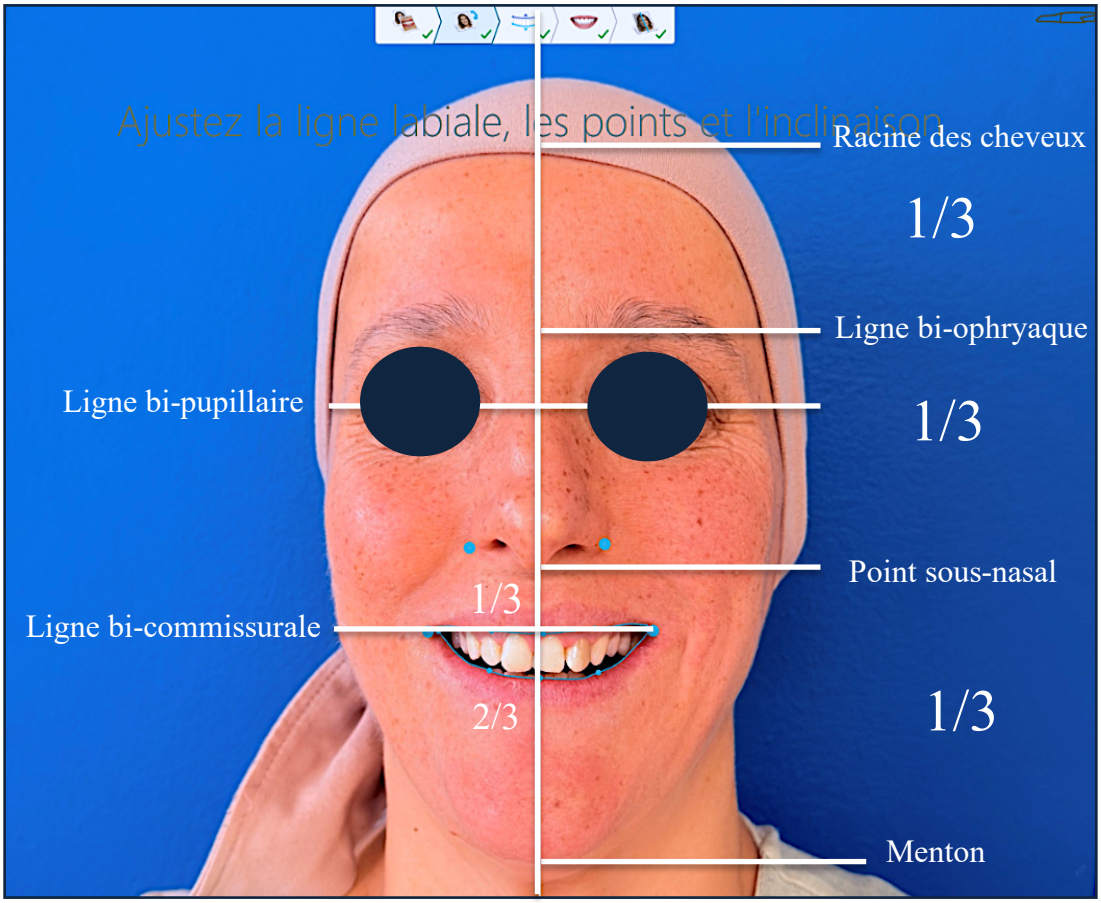


Figure 7 : Analyse esthétique à l'échelle du visage réalisée à l'aide du logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)

À l'échelle du sourire et à l'échelle dento-gingivale (Figure 8 et 9), l'analyse porte sur l'axe inter-incisif, la ligne incisive, les proportions coronaires, les axes dentaires et la ligne des collets [8,24,27]. Ces repères permettent d'apprécier l'organisation du secteur antérieur maxillaire, la configuration des bords libres et la relation de la ligne incisive avec la lèvre inférieure.

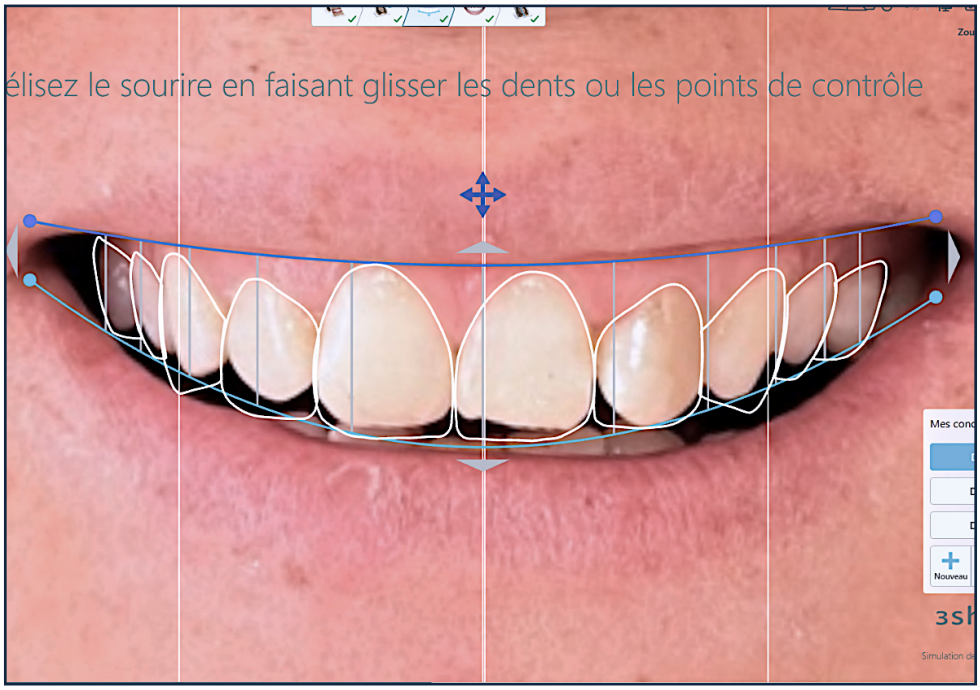


Figure 8 : Analyse esthétique à l'échelle du sourire et dento-gingivale réalisée à l'aide du logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)



Figure 9 : Analyse esthétique à l'échelle dento-gingivale : proportions coronaires relevées cliniquement avant l'élaboration d'un Smile Design (courtoisie Dr Abed)

Sur le plan esthétique, le mock-up matérialise les modifications envisagées des proportions coronaires, de la position des bords libres et de la ligne du sourire [4]. Dans les réhabilitations étendues, le full mock-up permet d'étendre cette évaluation à l'ensemble de l'arcade et de valider globalement le projet esthétique [16].

Sur le plan fonctionnel, le mock-up permet d'évaluer la position du bord incisif lors des tests phonétiques, ainsi que le guidage antérieur, et de rechercher d'éventuelles interférences occlusales lors des mouvements de propulsion et de diduction [4,5]. Lorsqu'il est issu d'un wax-up fonctionnel monté sur articulateur, il permet également de tester une modification de la dimension verticale d'occlusion (DVO) avant les préparations dentaires [5,16].

Dans les réhabilitations étendues avec augmentation marquée de la DVO, une phase transitoire de rodage occlusal peut être envisagée afin d'apprécier l'adaptation fonctionnelle au projet. Cette phase est recommandée lorsque l'augmentation excède 5 mm dans le secteur antérieur et doit être maintenue jusqu'à disparition des douleurs ou des inconforts réversibles. Elle apparaît moins nécessaire pour des augmentations limitées, à condition que les rapports occlusaux soient correctement établis [16].

La validation du projet s'inscrit enfin dans une démarche itérative. Le mock-up est évalué puis ajusté en fonction des observations cliniques et des retours du patient, jusqu'à obtenir un projet jugé satisfaisant avant la poursuite du traitement [2,4].

1.3.2 Fonction de communication

Une réhabilitation esthétique repose sur la collaboration entre le praticien, le patient et le prothésiste. En matérialisant le projet en bouche, le mock-up leur offre une référence clinique commune pour apprécier le résultat envisagé et définir les éventuelles modifications avant le traitement définitif [2,4]. Cette validation clinique en amont sécurise la réalisation des restaurations définitives en limitant les écarts par rapport au projet [2,4,5]. Enfin, le mock-up joue également un rôle motivationnel : il permet au patient de mieux visualiser le résultat et favorise son engagement dans la démarche thérapeutique [2,4,5].

Le Smile Design 2D, élaboré à partir de photographies calibrées (Figure 10), renforce cette fonction de communication. Le patient visualise le projet en amont et peut participer à son ajustement avant la réalisation du wax-up au laboratoire, puis son transfert intra-oral sous forme de mock-up (Figures 11 et 12) [8,20].

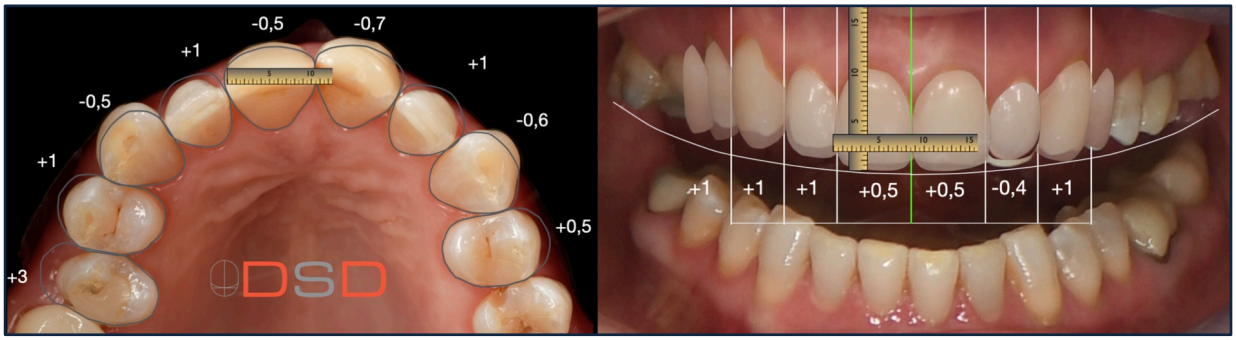


Figure 10 : Analyse esthétique bidimensionnelle et conception du sourire selon les principes DSD® (courtoisie Dr Abed)

Son extension tridimensionnelle prolonge cette logique : une photographie faciale, un scan facial et une empreinte optique peuvent être importés, calibrés et réunis dans un même projet [25]. Le praticien et le prothésiste peuvent ainsi échanger de manière asynchrone à partir des données partagées au sein d'une plateforme interdisciplinaire [28] (Figure 3).

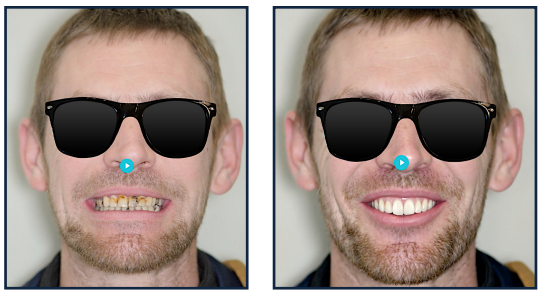


Figure 11 : Prévisualisation dynamique du projet esthétique sur Smilecloud® (courtoisie Dr Abed)



Figure 12 : Mock-up de validation prothétique (courtoisie Dr Abed)

1.3.3 Guide de préparation et référence morphologique

Le mock-up contribue également à la préservation tissulaire lorsqu'il est utilisé comme guide de préparation. En matérialisant sur les dents non préparées le volume des futures restaurations, il permet de calibrer les réductions nécessaires directement à travers le mock-up, selon le principe de l'Aesthetic Pre-evaluative Temporary (APT) [4,13].

La préparation est ainsi guidée par le volume de la future restauration plutôt que par la morphologie dentaire résiduelle, ce qui permet de mieux contrôler la réduction tissulaire (Figure 13) [4,5]. Dans une étude rétrospective portant sur 580 facettes suivies pendant douze ans, 80,5 % des préparations réalisées selon le protocole APT étaient confinées à l'émail [13].

Dans les réhabilitations liées à une usure sévère, le concept de full mock-up étend cette approche à l'ensemble des secteurs antérieurs et postérieurs, sur une ou deux arcades. Il permet de prévisualiser le projet, d'évaluer la nouvelle DVO et de guider les préparations vestibulaires et occlusales [16].

Après validation clinique, les modifications apportées au mock-up sont enregistrées et transmises au laboratoire afin de guider la conception des restaurations définitives [4,5].

Le mock-up assure ainsi une continuité entre le projet validé en bouche et les préparations dentaires qui en découlent [6].



Figure 13 : Technique APT (courtoisie Dr Abed)
A : mock-up esthétique en place
B : réduction amélaire guidée à travers le mock-up (vues latérales)
C : préparations après finitions

2 Flux numérique du mock-up : de l'acquisition des données à la matérialisation clinique

Le flux numérique du mock-up s'organise en trois étapes : l'acquisition des données, la conception du projet, puis sa matérialisation clinique. La Figure 14 illustre leur enchaînement à travers un cas complet. Le mock-up permet alors de valider cliniquement le projet avant de servir de référence aux étapes prothétiques ultérieures, non détaillées ici.

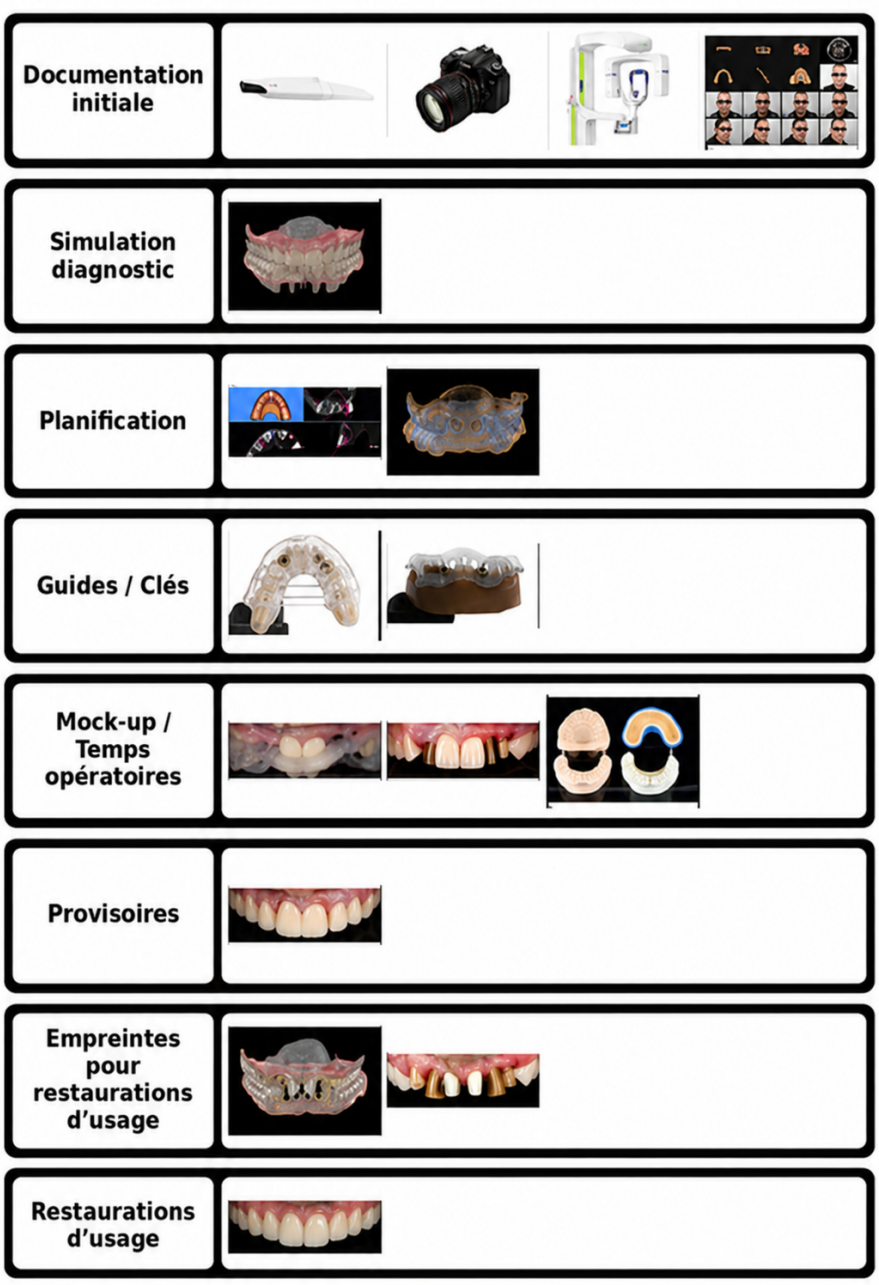


Figure 14 : Flux numérique appliqué à un cas multidisciplinaire : de l'acquisition des données à la réalisation des restaurations définitives (courtoisie Dr Dubois)

2.1 Acquisition des données : construire une base clinique exploitable

L'acquisition des données constitue la première étape du flux numérique. Elle associe la documentation photographique du visage et du sourire à l'empreinte optique des arcades. La qualité de ces données conditionne la conception du projet esthétique et sa matérialisation clinique ultérieure par le mock-up [8,20,29].

2.1.1 Acquisition photographique et calibration

Les premières versions du Smile Design reposaient sur trois vues photographiques principales : le visage avec un sourire large, le visage au repos et l'arcade maxillaire en vue rétractée. Une courte vidéo complétait cette documentation afin d'enregistrer différentes positions du sourire et les attentes du patient [8]. Les photographies servaient ensuite de support au tracé des lignes de référence nécessaires à l'analyse esthétique [8].

Dans le protocole initial, les dimensions réelles provenaient du modèle en plâtre. La longueur d'une incisive centrale était mesurée sur le modèle puis reportée sur l'image afin de calibrer une règle numérique [8] (Figure 15).

Dans les flux numériques intégrés, les photographies sont superposées au modèle numérique 2D issu de l'empreinte optique afin de replacer les surfaces dentaires dans leur contexte facial. Les photographies apportent les repères faciaux et dento-labiaux, tandis que le scan intra-oral fournit une représentation tridimensionnelles des arcades dentaires [30,31].



Figure 15 : Calibration dimensionnelle de la règle numérique à partir d'une incisive centrale, d'après [8]

La fiabilité de l'analyse photographique repose sur la maîtrise des conditions de prise de vue. Une vue strictement orthogonale reste difficile à obtenir et le moindre défaut d'angulation peut modifier les proportions perçues [30]. Une photographie inadéquate risque alors de fausser l'image de référence et d'entraîner une erreur de planification [20]. Certains systèmes proposent des outils de calibration. Dans le Digital Smile System® (DSS®), des lunettes calibrées permettent au logiciel d'aligner automatiquement les clichés, tandis qu'un trépied limite les variations de position de la tête [31].

2.1.2 Empreintes optiques, fiabilité de l'acquisition et intégration des données

L'empreinte optique complète les données photographiques en enregistrant la morphologie tridimensionnelle des arcades dentaires. Les scanners intra-oraux transforment ces acquisitions en un maillage numérique 3D, qui constitue l'équivalent virtuel du modèle d'étude en plâtre. Leur utilisation améliore généralement le confort du patient, permet une visualisation immédiate de l'acquisition et facilite la transmission numérique des données au laboratoire (Figure 16) [29,32].

Les systèmes ouverts autorisent l'exportation des données dans des formats standards, notamment le format STL (Standard Tessellation Language), afin qu'elles puissent être exploitées par différents logiciels compatibles. À l'inverse, les systèmes fermés limitent leur utilisation aux logiciels et aux équipements propres au fabricant [29].

L'exactitude du modèle numérique dépend du scanner, de la stratégie d'acquisition et du raccordement successif des images. Plus la zone scannée est étendue, plus les opérations de raccordement sont nombreuses, ce qui peut accroître l'erreur cumulée [32].

Pour les arcades dentées complètes, les empreintes numériques présentent une exactitude comparable à celle des empreintes à l'alginate [29]. Les situations comprenant des zones édentées, des implants ou des restaurations peuvent également compliquer l'acquisition et le raccordement des images [29,32].

Pour un mock-up antérieur, l'acquisition est généralement limitée au secteur concerné. Le nombre d'opérations de raccordement est donc inférieur à celui requis pour une arcade complète, ce qui réduit le risque d'erreur cumulative sans toutefois l'éliminer [32].



Figure 16 : Empreinte optique de l'arcade maxillaire, réalisée avec le système 3Shape TRIOS 6® (iconographie personnelle)

2.2 Concevoir le projet : quatre degrés d'intégration numérique

La conception numérique permet d'élaborer le projet esthétique. En présence de données 3D, celui-ci est transposé sous la forme d'un wax-up virtuel servant de référence à la réalisation du mock-up.

Selon la nature des données intégrées et la complexité des outils mobilisés, quatre degrés d'intégration peuvent être distingués. Ils correspondent à une progression allant de la planification photographique 2D à la constitution d'un patient virtuel intégrant les données dentaires, faciales, osseuses et fonctionnelles.

Le premier degré repose sur un Smile Design 2D réalisé à partir de photographies calibrées (Figure 17). Une vidéo peut compléter la documentation afin d'enregistrer la dynamique du sourire, mais la simulation du projet repose sur des images fixes [33]. Cette approche permet de construire le projet esthétique selon les repères faciaux et dento-labiaux.

L'analyse reste toutefois bidimensionnelle et ne restitue ni le volume des futures restaurations ni leur intégration tridimensionnelle au visage [30].

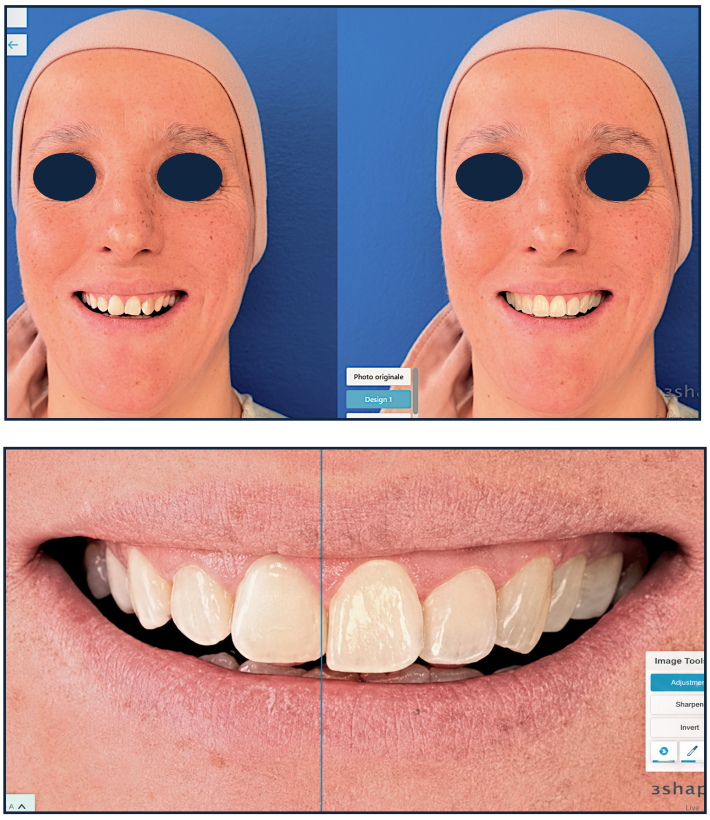


Figure 17 : Simulation 2D sur photographies calibrées, réalisée avec le logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)

Le deuxième degré associe l'empreinte optique aux données photographiques. Leur superposition permet d'intégrer l'analyse esthétique au modèle numérique des arcades et de concevoir un wax-up virtuel [19,25] (Figure 18). Le projet acquiert ainsi une représentation tridimensionnelle. Le repositionnement et la transposition des données constituent toutefois des étapes déterminantes. Un défaut d'alignement ou une perte d'information peut entraîner un écart entre la simulation initiale et le wax-up obtenu [25,30].

Dans un flux externalisé, le laboratoire conçoit le wax-up virtuel puis imprime un modèle 3D, utilisé pour réaliser une clé de transfert. Cette clé est ensuite chargée de résine provisoire et insérée en bouche afin de matérialiser le mock-up. Cette organisation peut allonger le délai de réalisation et nécessite des compétences techniques spécifiques [33].



Figure 18 : Intégration des données 2D et 3D pour la planification esthétique à l'aide du logiciel EXOCAD DentalCAD® (courtoisie Dr Cohen)
A : photographie intra-orale initiale
B : modèle 3D (STL) de l'arcade maxillaire
C : wax-up virtuel 3D guidé par l'analyse photographique

Le troisième degré ajoute le scan facial. Les photographies, le modèle numérique et les données faciales sont alors réunis dans un même environnement logiciel (ex. : EXOCAD® ou Smilecloud®). Leur superposition permet de situer le wax-up virtuel dans le cadre facial tridimensionnel du patient et d'en apprécier l'intégration au visage [25,30]. Cette centralisation des données limite les transferts successifs entre différents supports et les pertes d'information susceptibles de les accompagner [30].

En l'absence d'enregistrement de la cinématique mandibulaire, la restitution de l'occlusion demeure limitée aux données statiques, correspondant aux mouvements d'ouverture et de fermeture, ainsi qu'aux données statistiques issues d'une programmation arbitraire des déterminants postérieurs.

Le quatrième degré correspond à la constitution d'un patient virtuel. Toutes les données précédentes sont superposées afin de réunir les structures dentaires, osseuses et faciales (Figure 19). Lorsque la cinématique mandibulaire est également enregistrée, elle est intégrée à ce modèle via des systèmes tels que Modjaw® ou Zebris JMA®, afin d'orienter la conception occlusale du projet [34].

La fiabilité du patient virtuel dépend à la fois de la qualité de chaque acquisition et de la précision de leur superposition. Une erreur peut ainsi modifier la position relative des structures dentaires, osseuses et faciales et altérer la fidélité du modèle obtenu. Cette approche nécessite donc des équipements dédiés ainsi qu'une maîtrise des logiciels utilisés pour acquérir, aligner et exploiter les différentes données [30,34]. Après sa validation clinique, le projet numérique peut également servir de référence à la conception des restaurations définitives (*copy/paste dentistry*) [25].



Figure 19 : Conception du wax-up virtuel via Blueprint® (Smilecloud®) (courtoisie Dr Abed)

Les rares travaux comparatifs disponibles ne permettent pas d'établir la supériorité des flux les plus intégrés. Dans l'étude de Zotti et al. [35], le mock-up issu d'une planification 2D a obtenu une évaluation esthétique plus favorable que celui conçu selon un flux 3D. Par ailleurs, Chisnoiu et al. [36] n'ont mis en évidence aucune différence significative entre les méthodes analogiques et numériques.

Le Tableau 3 synthétise les données intégrées, les outils mobilisés et les principales limites de chaque degré.

Tableau 3 : Principaux flux numériques de conception du mock-up : du 2D au patient virtuel (illustration personnelle)

Type de flux	Données	Logiciels (Liste non exhaustive)	Limites	Réf.
2D	Photographies calibrées	Keynote®, PowerPoint®, Photoshop®, Smilecloud®, SmileFy®	Absence de volume et d'intégration 3D au visage	[8,24,30]
Mixte 2D-3D	Photographies calibrées + empreinte optique (.stl)	DSD App®, EXOCAD®, 3Shape®, Smilecloud®, SmileFy®	Fiabilité dépendante de la superposition photo/STL ; conception répartie entre plusieurs environnements	[19,25,30,33]
3D	Photographies + empreinte optique (.stl) + CBCT + scan facial, réunis dans un environnement unique	DSD App 3D®, EXOCAD®, 3Shape®, Smilecloud®, SmileFy®	Absence d'enregistrement des rapports dynamiques	[25,37]
Patient virtuel 3D-4D	Photographies calibrées + empreinte optique (.stl) + scan facial + CBCT + cinématique mandibulaire	EXOCAD®, 3Shape®, Modjaw®, Zebris JMA®, SmileFy®	Coût du plateau technique, courbe d'apprentissage, formation des techniciens de laboratoire, compétences nécessaires à l'exploitation des données enregistrées	[34,37,38]

2.3 Matérialiser le projet : techniques de fabrication du mock-up numérique

Une fois le projet virtuel conçu, sa valeur clinique dépend de la fidélité entre le projet de référence et le mock-up fabriqué. Les étapes de moulage, d'impression ou d'usinage peuvent chacune introduire des écarts dimensionnels. Le recours au numérique ne garantit donc pas, à lui seul, l'exactitude de la matérialisation clinique du projet [11,26].

2.3.1 Choix des matériaux : des propriétés adaptées à une fonction

Les résines bis-acryliques (ex. : Structur®, VOCO ; Luxatemp®, DMG) restent largement utilisées pour réaliser des mock-ups moulés, soit à des fins de prévisualisation clinique, soit comme guides de préparation. Elles sont également utilisées dans les protocoles de full mock-up [6,16]. La qualité du transfert dépend toutefois de la rigidité de la clé et de son support, de la pression appliquée pendant la polymérisation et de la gestion des excès de résine [6,39].

Traditionnellement, les clés de transfert sont réalisées en silicone de laboratoire (ex. : ZETALABOR®, Zhermack®) (Figure 20).

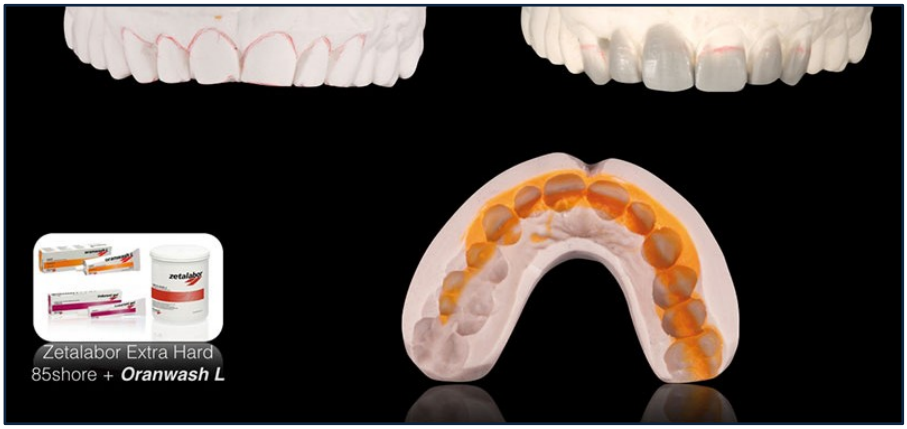


Figure 20 : Clé de transfert réalisée en silicone de laboratoire de haute dureté (ZETALABOR®, Zhermack®) d'après [40]

Une clé en silicone polyvinylsiloxane (PVS), réalisée selon une technique en double mélange, peut également être rigidifiée par un porte-empreinte non rainuré. Ce dispositif facilite son insertion et sa désinsertion tout en assurant un effet compressif homogène (Figure 21).

L'association de la clé en PVS au porte-empreinte semble donner un résultat au moins équivalent à celui obtenu avec une clé en silicone de laboratoire. La rigidité recherchée est donc celle du dispositif complet, et non celle du silicone seul [6,26].

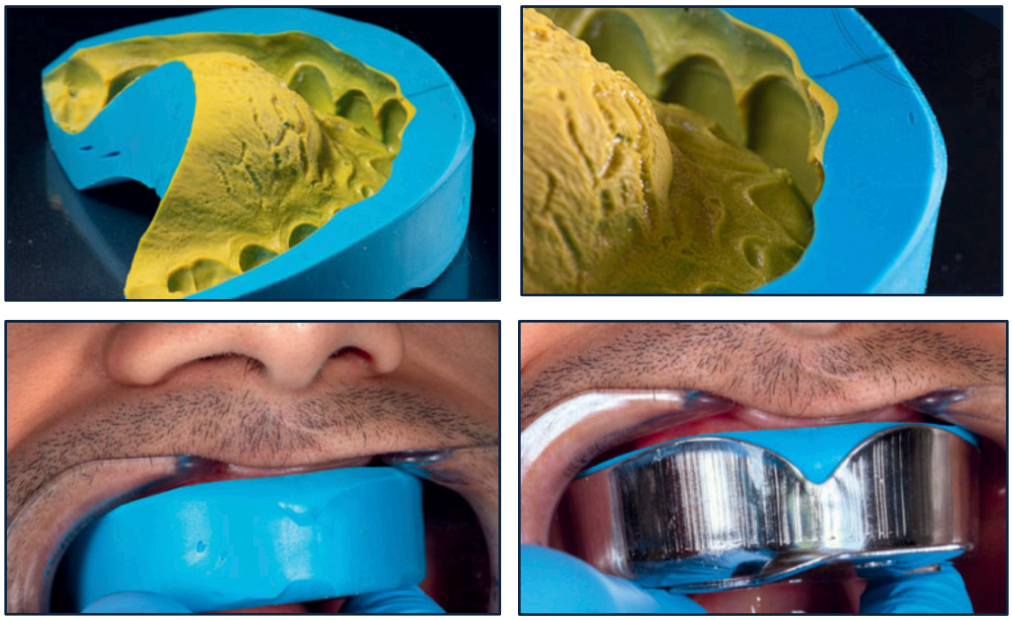


Figure 21 : Clé de transfert réalisée en PVS selon une technique en double mélange, rigidifiée par un porte-empreinte non rainuré, d'après [6]

Les composites fluides très chargés (ex. : G-ænial® Universal Injectable, GC ; Grandioso®, VOCO) sont privilégiés pour les techniques d'injection. Celles-ci nécessitent une clé en silicone transparent (ex. : EXACLEAR®, GC ; Memosil 2®, Kulzer ; Elite Glass Transparent®, Zhermack) rigidifiée par une plaque thermoformée ou un porte-empreinte transparent sans rainures. La transparence du silicone laisse passer la lumière de polymérisation et permet de contrôler visuellement la fusée du composite [18].

À l'inverse, les techniques moulées ou du tampon (« *stamp/molding technique* ») nécessitent un composite suffisamment visqueux pour conserver la morphologie transférée après le retrait de la clé [17]. Un composite microhybride (ex. : Filtek® Z250, 3M) peut répondre à cette exigence.

Les résines photopolymérisables destinées à l'impression 3D (ex. : Premium Teeth Resin®, Formlabs) occupent une place croissante dans le flux numérique. Leur rigidité, leur teinte, leur texture et leur transparence varient selon l'usage clinique recherché [41]. La pièce imprimée peut ainsi constituer directement le mock-up, sous la forme d'une coque en résine essayée sur les dents non préparées [41].

Leur utilisation a longtemps été limitée au mock-up diagnostique, en raison d'une durée de contact muqueux limitée à vingt-quatre heures [41]. Certaines résines sont désormais également indiquées pour la réalisation de restaurations provisoires [42,43].

Ce procédé présente toutefois plusieurs limites. Certaines imprimantes ne permettent pas de fabriquer des pièces d'une épaisseur inférieure à 0,3 mm, ce qui peut entraîner un excès de volume lorsque la situation clinique nécessite une faible épaisseur vestibulaire [41]. Les résines imprimées présentent par ailleurs des propriétés physiques inférieures à celles des résines usinées et conventionnelles [43]. Leurs performances mécaniques dépendent également des paramètres d'impression et du protocole de post-traitement.

À l'inverse, l'usinage d'un bloc de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) (ex. : Telio® CAD LT, Ivoclar) est principalement indiqué pour les temporisations de longue durée, notamment lorsqu'un rétablissement des tables occlusales est nécessaire. Sa densité lui confère une stabilité de teinte et une dureté élevées, adaptées aux phases cliniques prolongées [42].

Le Tableau 4 synthétise les principaux matériaux utilisés pour le mock-up, leurs indications, leurs propriétés et leurs limites, dans les flux analogiques et numériques.

Tableau 4 : Matériaux de fabrication des mock-ups conventionnels et numériques (illustration personnelle)

Type de matériau	Mode de fabrication	Indications cliniques	Propriétés / avantages	Limites / contraintes	Réf.
Composites fluides fortement chargés *(ex. : G-œnial® Universal Injectable, GC ; Grandioso®, VOCO)*	Injection dans une clé en silicone transparent, rigidifiée par une plaque thermoformée ou un porte-empreinte transparent	Transfert clinique du projet esthétique, mock-ups directs guidés par injection	Rhéologie favorable ; reproduction précise ; contrôle visuel de la fusée et photopolymérisation à travers la clé ; ajustements et finitions directes	Nécessité d'une clé transparente, stable et suffisamment rigide ; qualité du transfert, contrôle de l'injection et de la transmission lumineuse	[18]
Composites microhybrides (±réchauffés) *(ex. : Filtek® Z250, 3M)*	Moulage ou technique du tampon (*stamp technique/ molding technique*)	Mock-ups directs guidés par moulage lorsque le matériau doit conserver sa morphologie après retrait de la clé	Stabilité de forme ; maintien de l'anatomie transférée après désinsertion de la clé ; ajustements et finitions directes	Moindre aptitude à l'écoulement ; adaptation plus opérateur-dépendante ; risque de défauts de remplissage ou de déformation en cas de pression ou de retrait inadéquats de la clé	[17]
Résines bis-acryliques *(ex. : Structur®, VOCO ; Luxatemp®, DMG)*		Guides de préparation, mock-up (± longue durée),	Fluidité, facilité d'utilisation, bonne aptitude au polissage	Fragilité, usure excessive, difficile à retravailler	[14]
Résines PMMA photopolymérisables *(ex. : Premium Teeth Resin®, Formlabs)* *(Impression 3D)*	Fabrication additive	Mock-up (± longue durée), restaurations provisoires	Variabilité de rigidité, transparence possible, adaptation fine	Dépendance au post-traitement, biocompatibilité	[42–45]
PMMA usiné *(ex. : Telio® CAD LT, Ivoclar)*	Fabrication soustractive	Mock-up longue durée, restaurations provisoires	Stabilité de teinte, dureté et résilience élevées	Limites d'usinage	[42,43]

2.3.2 Fabrication additive : technologies et paramètres

La fabrication additive repose sur la superposition de couches successives définies à partir d'un fichier STL. Les principales technologies utilisées pour les résines photopolymérisables sont la stéréolithographie (Stereolithography Apparatus, SLA) et le traitement numérique de la lumière (Digital Light Processing, DLP).

La SLA polymérise successivement chaque section par le balayage d'un faisceau laser, tandis que le DLP expose simultanément l'ensemble d'une couche par projection lumineuse (Figure 22) [22,44].

Le procédé PolyJet repose, quant à lui, sur la projection sélective de gouttelettes de résine, immédiatement polymérisées par rayonnement ultraviolet (Figure 23). Il reste principalement réservé au laboratoire, son coût et ses contraintes d'installation le rendant moins accessible au cabinet [44].

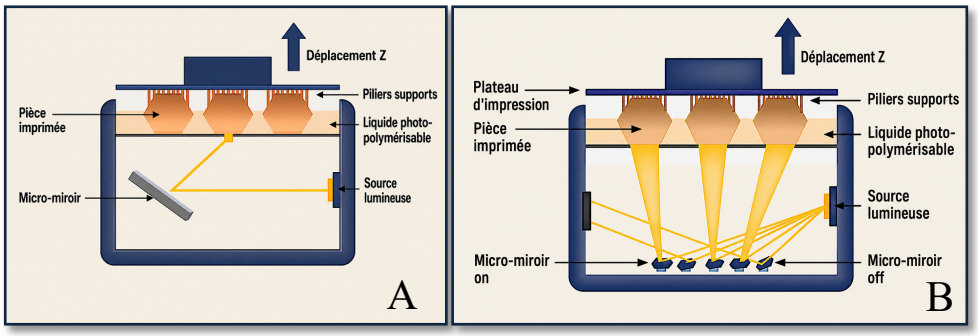


Figure 22 : Principe de fonctionnement des technologies d'impression 3D. A : SLA et B : DLP, d'après [44]

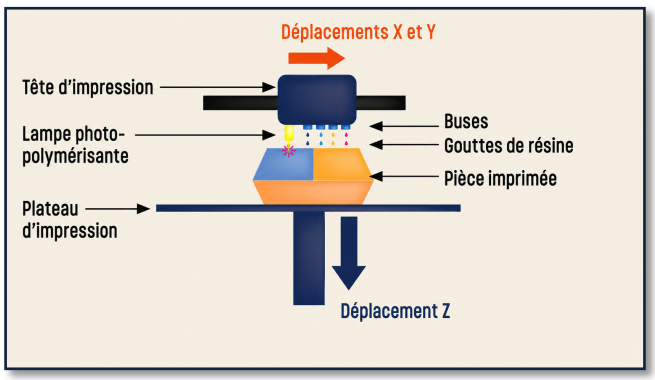


Figure 23 : Principe de fonctionnement du procédé d'impression PolyJet, d'après [44]

Ce mode de fabrication comprend classiquement quatre étapes : l'acquisition des données, la CAO, l'impression 3D (FAO) puis le post-traitement [22,44]. La qualité de la pièce obtenue dépend de plusieurs paramètres, notamment de son orientation sur le plateau, de la position des supports et des conditions de post-polymérisation, qui peuvent influencer son exactitude dimensionnelle et ses propriétés mécaniques [22,43,46].

Pour le mock-up, l'orientation de la pièce et la position des supports sont déterminantes. Des supports placés trop près des bords peuvent déformer la coque lors de leur retrait [46]. Ils doivent donc être regroupés sur les faces palatines ou linguales, en préservant l'intrados et la face vestibulaire, afin de ne pas compromettre l'insertion de la pièce ni son évaluation esthétique [26].

Le choix du matériau et le respect du protocole de post-traitement conditionnent également la biocompatibilité du dispositif imprimé [43–45]. La maîtrise de l'ensemble de ces paramètres permet ainsi d'obtenir des pièces adaptées à différents usages cliniques, notamment les mock-ups (Figure 24), les gouttières occlusales et les guides chirurgicaux [47].



Figure 24 : Mock-up imprimé par stéréolithographie (SLA) : de la conception numérique à la validation clinique, d'après [47]

2.3.3 Fabrication soustractive : technique, indications et limites

La fabrication soustractive du mock-up repose sur l'usinage d'un bloc de PMMA à partir du projet numérique [19]. En supprimant les étapes manuelles de duplication et de moulage, ce procédé limite une partie de la variabilité liée à l'opérateur [7]. Les études comparatives restent toutefois hétérogènes et ne permettent pas d'établir un gain systématique d'exactitude par rapport aux autres techniques de fabrication [7,21,26].

L'usinage présente également plusieurs contraintes techniques et économiques. Il nécessite un investissement initial ainsi que des frais de laboratoire plus élevés [26], entraîne une perte importante de matériau et ne permet pas de reproduire les détails dont les dimensions sont inférieures au diamètre de la fraise [41].

Sur le plan clinique, la rigidité du mock-up usiné peut compliquer son insertion et son repositionnement, en particulier lorsqu'il est réalisé en une seule pièce. L'existence d'un axe d'insertion unique et de contre-dépouilles au niveau des embrasures ou des zones interproximales peut empêcher son insertion passive. Une modification de la forme ou un ajustage de la pièce peut alors être nécessaire, au risque d'altérer sa conformité au projet numérique [26].

Lorsque sa conception permet une insertion passive, le mock-up peut être essayé en bouche puis utilisé comme guide pour une préparation minimalement invasive [13,19] (Figure 25).



Figure 25 : Flux CFAO : wax-up virtuel, mock-up en PMMA et restaurations céramiques d'usage, d'après [19]

3 Illustrations cliniques : trois degrés d'intégration numérique

Les trois situations présentées dans cette partie n'ont pas pour objectif de comparer le flux numérique au flux analogique ni de hiérarchiser les protocoles. Elles illustrent les modifications apportées à la conception, au transfert et à la validation du projet esthétique selon différents degrés d'intégration numérique. Le degré le plus simple, fondé sur une prévisualisation 2D sans intégration de données 3D, n'est pas présenté comme un cas distinct, car il constitue principalement un outil de planification et de communication et ne permet pas, à lui seul, la conception et la matérialisation d'un mock-up.

Ces cas sont de nature différente. Le premier est issu de la pratique personnelle, tandis que les deux autres sont tirés de la littérature. Le premier associe une conception numérique à un transfert analogique. Le deuxième réunit la conception, la fabrication et l'essayage au fauteuil en réduisant les étapes intermédiaires. Le troisième élargit la planification aux paramètres occlusaux, fonctionnels et chirurgicaux grâce au patient virtuel dynamique.

3.1 Cas 1 : flux mixte 2D-3D et transfert analogique

Situation clinique et indication

Ce premier cas, issu de la pratique clinique personnelle, porte sur une demande esthétique limitée au secteur antérieur. La patiente n'était pas satisfaite de l'esthétique de son sourire. L'examen clinique a mis en évidence une restauration ancienne en résine composite dyschromiée sur l'incisive latérale maxillaire gauche (22), ainsi qu'une asymétrie de taille entre les incisives centrales maxillaires (11 et 21) (Figure 26).

La demande était conservatrice et visait à améliorer l'harmonie du secteur antérieur sans préparation dentaire. Le projet devait être présenté à la patiente, puis validé en bouche au moyen d'un mock-up.

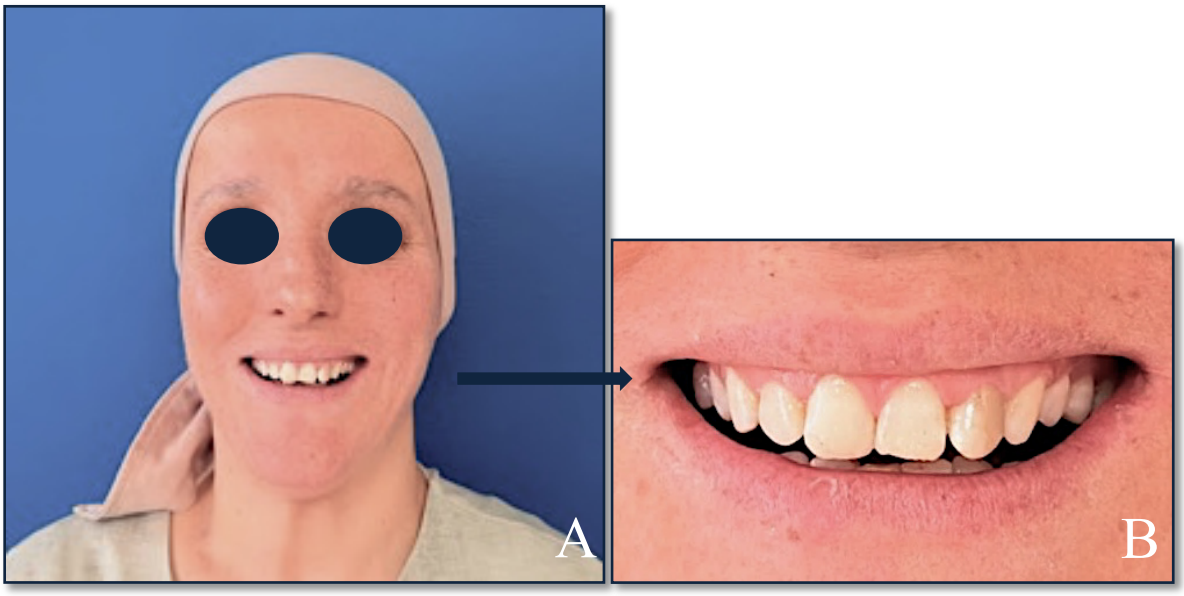


Figure 26 : Situation clinique initiale
A : vue de face et B : vue rapprochée
du sourire (iconographie personnelle)

Données acquises et degré d'intégration

La planification a été réalisée à partir de photographies cliniques du visage et du sourire, complétées par une empreinte optique de l'arcade maxillaire (3Shape TRIOS 6®).

Les photographies ont été utilisées pour réaliser une analyse esthétique (Figure 27) dans le module Smile Design du logiciel 3Shape TRIOS®. Cette analyse a permis d'élaborer une simulation 2D du sourire à partir des repères faciaux et dento-labiaux (Figure 28).

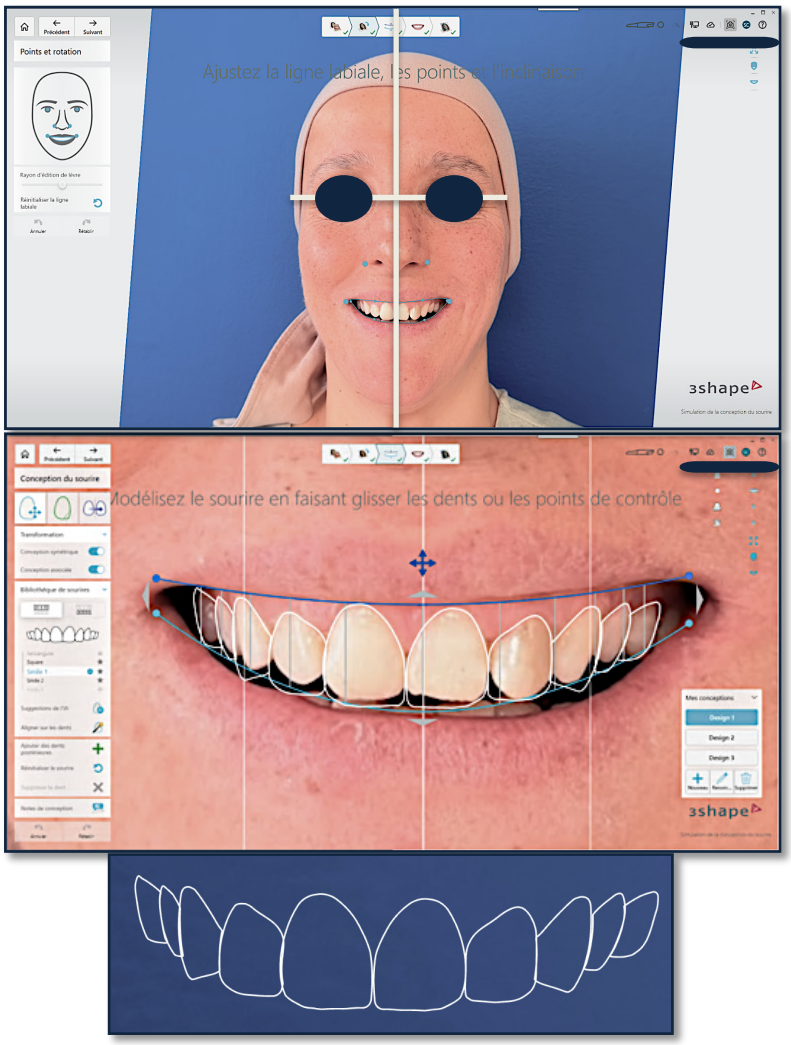


Figure 27 : Analyse faciale et planification esthétique avec 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)

Conception et matérialisation du projet

La simulation 2D (Figure 28), les photographies cliniques et le fichier STL issu de l'empreinte optique ont ensuite été transmis au laboratoire. Le prothésiste s'est appuyé sur ces données pour transposer le projet en trois dimensions et concevoir le wax-up. Un modèle physique intégrant le wax-up a ensuite été fabriqué par impression 3D (Figure 29).



Figure 28 : Simulation du projet esthétique proposée à la patiente (iconographie personnelle)



Figure 29 : Wax-up diagnostique issu de la simulation 2D imprimé en 3D pour la réalisation de la clé du mock-up (iconographie personnelle)



Figure 30 : Essayage clinique du mock-up en bouche (iconographie personnelle)

Réalisation du mock-up et validation clinique

Une clé en silicone double mélange a été réalisée au cabinet sur le modèle imprimé, puis chargée de résine bis-acrylique (Structur® A2, VOCO), et positionnée sur les dents non préparées. Après polymérisation et retrait de la clé, le mock-up a été évalué au contexte dento-labial et facial réel de la patiente. Cet essayage avait pour objectif la validation esthétique et phonétique du projet (Figure 30).

Apport spécifique

Ce cas illustre le deuxième degré d'intégration numérique : la simulation 2D et l'empreinte optique sont associées pour guider la conception du wax-up, tandis que le transfert intra-oral reste analogique. Le numérique structure la conception et les échanges, mais seule la matérialisation du projet par le mock-up permet d'en apprécier l'intégration clinique.

Limites et enseignement clinique

Entre la simulation 2D et le mock-up clinique, plusieurs étapes peuvent introduire un écart. La proposition esthétique doit d'abord être interprétée puis transposée en trois dimensions par le prothésiste. La réalisation de la clé en silicone et le transfert intra-oral constituent ensuite des étapes analogiques susceptibles d'altérer la fidélité entre le projet numérique et le mock-up obtenu.

3.2 Cas 2 : conception 3D et restauration d'essai au fauteuil

Principe et indication du protocole

Le cas précédent associait une conception numérique à un transfert analogique par modèle imprimé, clé en silicone et résine bis-acrylique. Le protocole décrit par Coachman et al. [25] réduit ces étapes en réunissant la planification, la fabrication des coques en résine et leur essayage clinique au cours d'une même séance.

L'article ne décrit pas une situation clinique détaillée, mais présente une technique destinée aux projets esthétiques antérieurs compatibles avec une approche additive. Elle n'est pas adaptée aux patients présentant un surplomb ou un recouvrement important.

Données acquises et degré d'intégration

La planification associe une photographie de face ainsi qu'une vidéo du sourire, un scan facial et un scan intra-oral maxillaire. Ces données sont importées et réunies dans la DSD App 3D® (Figure 31). Le scan facial peut également être acquis directement dans l'application grâce à son intégration avec Bellus 3D®.

Ce protocole correspond au troisième degré d'intégration numérique. Les données 2D et 3D sont réunies et recalées dans une même application, sans export vers un logiciel de CAO de laboratoire.

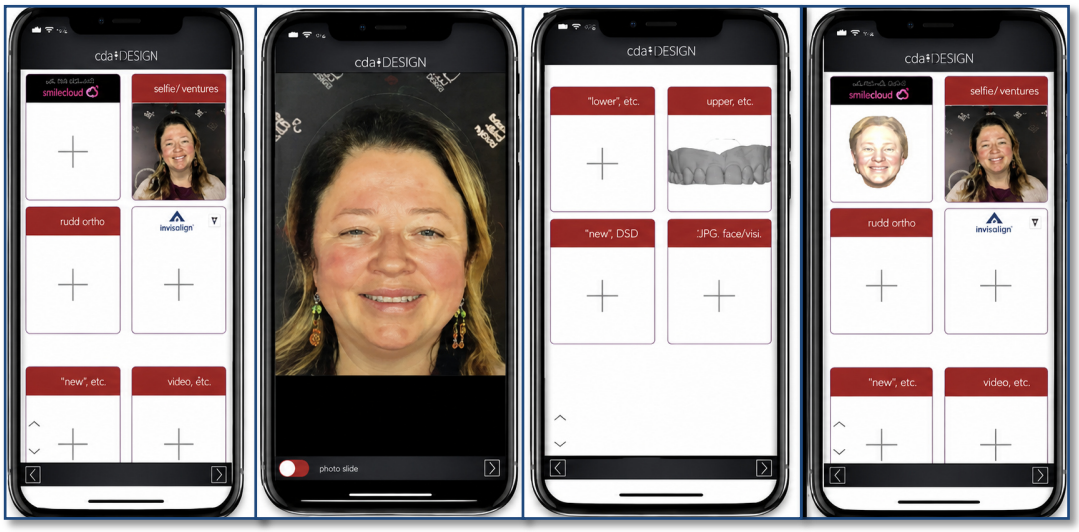


Figure 31 : Acquisition des données avec DSD App 3D®, d'après [25]

Conception du projet

L'application génère une première simulation 2D du sourire, ajustée à l'aide d'une bibliothèque de formes dentaires. Le projet peut être présenté à la patiente en comparaison avec la situation initiale (Figure 32).

Le scan facial et le scan intra-oral sont réunis et superposés afin de concevoir le wax-up virtuel (Figure 33) en tenant compte du visage. La morphologie dentaire est ajustée en trois dimensions, puis un fichier STL correspondant aux coques vestibulaires est exporté vers l'imprimante 3D.



Figure 32 : Simulation 2D et intégration faciale du projet, d'après [25]



Figure 33 : Conception du wax-up virtuel, d'après [25]

Fabrication et restauration d'essai

Les coques sont fabriquées au fauteuil par SLA (Figure 34), puis nettoyées et post-polymérisées. Elles sont ensuite insérées en bouche avec du composite fluide photopolymérisé. Ces coques imprimées constituent une restauration d'essai clinique, assimilée ici au mock-up en raison de sa fonction de prévisualisation et d'évaluation du projet.



Figure 34 : Conception des coques vestibulaires et fabrication par impression 3D au fauteuil, d'après [25]

Apport spécifique

Ce protocole évite ainsi l'impression d'un modèle complet, la réalisation d'une clé en silicone et l'utilisation d'une résine bis-acrylique. L'intégration des données 2D et 3D dans une même application et la fabrication directe des coques en résine au fauteuil réduisent les transferts de fichiers et les étapes analogiques, sans supprimer les étapes d'impression, de post-traitement et d'insertion clinique.

Les auteurs estiment la durée totale du flux au fauteuil à 70,5 minutes, contre 105 minutes pour un flux externalisé en deux séances. Ce gain tient surtout à l'automatisation de la simulation 2D, à l'intégration des fichiers dans une même application et à la simplification du transfert clinique. Il s'agit toutefois d'estimations fournies par les auteurs et non de mesures comparatives.

Limites et enseignement clinique

La principale limite du protocole est l'absence d'intégration de l'arcade mandibulaire. La version de l'application décrite ne permet pas d'importer son fichier STL pour analyser l'occlusion, ce qui limite son utilisation pour les réhabilitations occlusales. La technique reste également réservée aux situations compatibles avec une approche additive et n'est pas adaptée en présence d'un surplomb horizontal ou d'un recouvrement vertical important.

Enfin, l'article est une description technique. Aucun écart n'a été mesuré entre le projet numérique, les coques imprimées et la restauration d'essai obtenue. Le protocole démontre donc la faisabilité d'un flux intégré au fauteuil, mais pas sa supériorité en matière de fidélité ou de résultat clinique. La réduction des étapes analogiques de transfert améliore la continuité du flux, mais ne dispense pas de matérialiser le projet en bouche et n'élimine pas les sources d'écart liées à l'impression et au transfert clinique.

Indépendamment du protocole présenté, la qualité des données faciales dépend du dispositif et des conditions d'acquisition. Les performances varient selon le système utilisé et la zone du visage analysée [48–50].

Les scanners faciaux statiques, comme le RAYFace®, présentent de bonnes performances pour les mesures faciales. Les scanners portables et certaines applications mobiles peuvent également fournir des données cliniquement acceptables pour la planification esthétique. Le choix du dispositif dépend donc de l'indication clinique et de la fidélité nécessaire au projet [48–50].

3.3 Cas 3 : planification intégrée par patient virtuel dynamique

Situation clinique et indication

Le protocole rapporté par Yue et al. [34] associe la planification esthétique à l'analyse de l'occlusion et de la cinématique mandibulaire. Contrairement aux deux cas précédents, il ne comporte pas d'essayage intra-oral du projet avant le traitement. La proposition est d'abord présentée et évaluée à l'aide du patient virtuel.

L'examen clinique a mis en évidence une inflammation gingivale du secteur antérieur maxillaire et la présence de quatre anciennes couronnes céramiques sur les incisives maxillaires. La patiente rapportait par ailleurs une ouverture progressive de son diastème et exprimait une insatisfaction esthétique de son sourire (Figure 35).

Une prise en charge parodontale préalable a été réalisée afin de stabiliser les tissus et d'évaluer la position des anciennes limites prothétiques par rapport à l'attache supra-crestale.



Figure 35 : Situation clinique initiale, d'après [34]

Données acquises et degré d'intégration

La planification a associé un CBCT (Giano HR®, NewTom), des scans intra-oraux des deux arcades (TRIOS 3®) complétés par un scan vestibulaire en occlusion d'intercuspidie maximale (OIM), des scans faciaux (Dental Pro® Bellus3D) réalisés au repos, au sourire et au rire, ainsi qu'un enregistrement de la cinématique mandibulaire par axiographie numérique (JMAnalyser+®, zebris).

L'ensemble des données dentaires, osseuses et faciales a été intégré dans le logiciel EXOCAD dentalCAD®, tandis que la cinématique mandibulaire enregistrée avec le système JMAnalyser+® a été analysée à l'aide du logiciel WINJAW+®. Toutes ces informations ont permis de constituer un patient virtuel dynamique (Figure 36). Ce protocole correspond ainsi au quatrième degré d'intégration numérique.

L'analyse axiographique a mis en évidence des trajets de propulsion et de diduction réguliers et continus. Le schéma occlusal initial a été jugé stable et repris comme référence pour la conception des nouvelles restaurations.

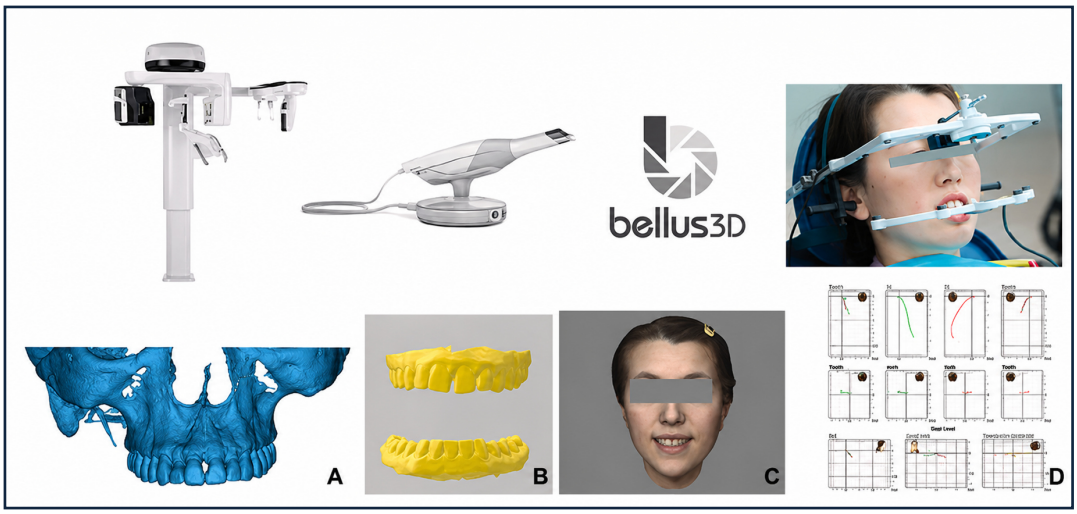


Figure 36 : Données acquises pour la constitution du patient virtuel dynamique, d'après [34]

Conception et présentation du projet

La morphologie des nouvelles restaurations a été définie à partir de la vue faciale et de la position des lèvres. Les contacts occlusaux, le guidage antérieur et la morphologie des faces palatines ont ensuite été ajustés à partir des données issues de l'enregistrement axiographique et exploitées sur l'articulateur virtuel (Figure 37).

Le projet esthétique et fonctionnel a été présenté à la patiente sous la forme d'une simulation intégrée au patient virtuel, avant la dépose des anciennes restaurations.



Figure 37 : Conception numérique du modèle 3D et réalisation de la clé de transfert, d'après [34]

Restaurations provisoires et guide chirurgical

À partir du projet conçu sur le patient virtuel, les restaurations d'essai ont été fabriquées par impression 3D (UltraCraft A3D®, HeyGears). Une empreinte physique de ces pièces a ensuite été réalisée et utilisée comme clé de transfert. Après la dépose des anciennes restaurations, cette clé, chargée en résine bis-acrylique (PROTEMP 4®, 3M ESPE), a permis de confectionner les premières restaurations provisoires.

Une chirurgie d'élongation coronaire a ensuite été conduite à l'aide d'un guide chirurgical conçu à partir du même projet numérique et également imprimé en 3D (Figure 38). Après l'intervention, la reprise des préparations dentaires et le renouvellement des restaurations provisoires ont permis de modifier progressivement les profils d'émergence et d'accompagner la cicatrisation gingivale.

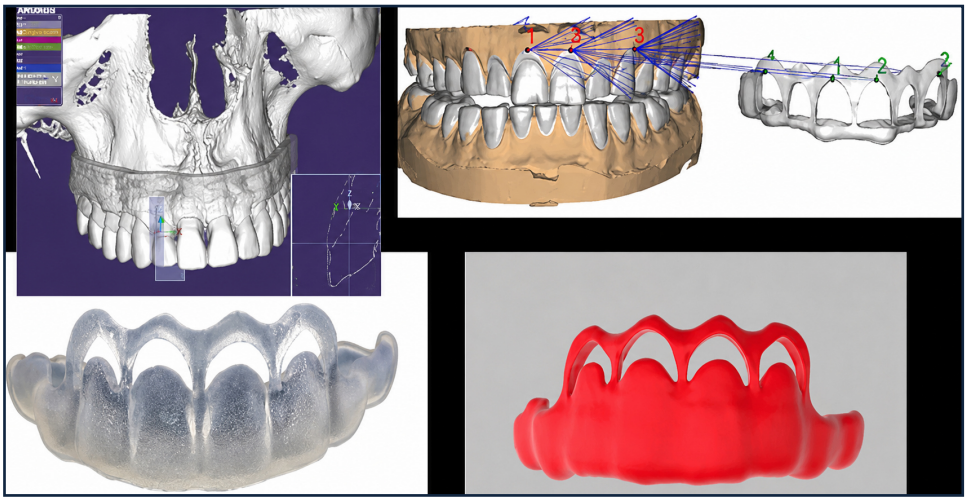


Figure 38 : Conception numérique et réalisation par impression 3D du guide chirurgical, d'après [34]

Suivi et restaurations d'usage

Après neuf mois, les deux arcades ont été numérisées et les mouvements mandibulaires ont été enregistrés de nouveau. Les données obtenues ont été comparées au projet initial avant la fabrication des restaurations d'usage.

Après leur pose, l'analyse axiographique a montré une bonne concordance entre les nouveaux tracés de propulsion et de diduction et ceux enregistrés initialement. L'occlusion est restée stable et la patiente était satisfaite du résultat esthétique (Figure 39).

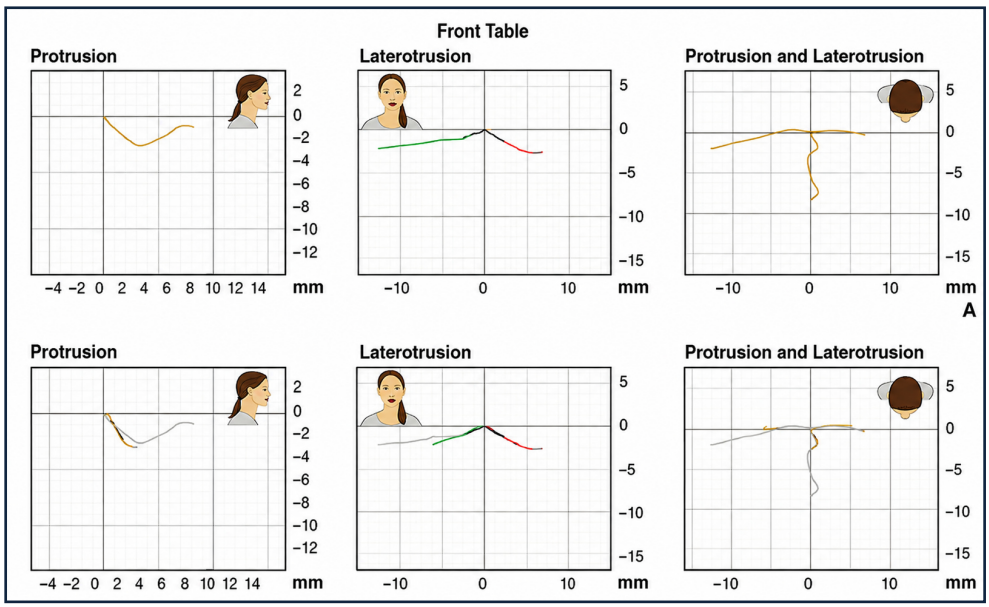


Figure 39 : Tracés incisifs en propulsion et diduction enregistrés par l'axiographe virtuel après la pose des restaurations d'usage, d'après [34]

Apport spécifique

Ce protocole utilise un même référentiel numérique pour coordonner la conception esthétique et occlusale des restaurations ainsi que la planification de la chirurgie d'élongation coronaire. Le patient virtuel permet ainsi d'élargir l'analyse à l'occlusion dynamique et aux rapports entre les structures dentaires, osseuses, gingivales et faciales.

La matérialisation clinique du projet comporte néanmoins une étape analogique : après l'impression du modèle intégrant le wax-up, une clé de transfert est confectionnée sur celui-ci puis utilisée pour réaliser les restaurations provisoires.

Limites et enseignement clinique

La mise en œuvre de ce protocole nécessite un CBCT, un scanner intra-oral, un scanner facial, un système d'axiographie numérique et une imprimante 3D. Son coût, la multiplicité des équipements et les compétences requises peuvent limiter son utilisation en pratique courante.

L'absence d'essayage intra-oral avant le traitement ne permet pas de confronter immédiatement le projet aux conditions cliniques réelles. Cette évaluation n'intervient qu'au stade des restaurations provisoires.

3.4 Ce que l'enchaînement des trois cas met en évidence

Le troisième protocole présente le degré d'intégration numérique le plus élevé et élargit la planification à l'esthétique, à l'occlusion dynamique et à la chirurgie parodontale. La réalisation des restaurations provisoires conserve toutefois une étape analogique. L'étendue de la planification et la continuité du transfert constituent donc deux propriétés distinctes, qui ne sont pas nécessairement maximisées au sein d'un même flux de travail.

Ces trois illustrations cliniques ne permettent pas de mesurer précisément cette dissociation entre l'étendue de la planification et la continuité du transfert. Elles montrent néanmoins qu'un degré d'intégration numérique plus élevé ne s'accompagne pas systématiquement d'une amélioration simultanée de la prévisibilité, de la validation clinique et de la transférabilité du projet.

La place du mock-up diffère également selon les protocoles. Dans les deux premiers cas, il matérialise le projet en bouche et permet son évaluation clinique avant le traitement. Le troisième protocole ne comporte pas de mock-up au sens strict. La présentation initiale du projet repose sur le patient virtuel, tandis que son évaluation en bouche n'intervient qu'au stade des restaurations provisoires.

Ce qui demeure constant n'est donc pas le support utilisé, mais la fonction recherchée : confronter le projet au contexte clinique réel avant la réalisation d'un acte irréversible. Dans les deux premiers protocoles, cette fonction est principalement assurée par le mock-up. Dans le troisième, elle est répartie entre le patient virtuel, l'axiographie virtuelle et les restaurations provisoires. Le Tableau 5 synthétise ces différences.

Tableau 5 : Synthèse des trois cas cliniques et de leur degré d'intégration numérique (illustration personnelle)

	Cas 1 **Pratique personnelle**	**Cas 2** **D'après *Coachman et al.* [25]**	**Cas 3** **D'après *Yue et al.* [34]**
Type de flux	Flux mixte 2D-3D, transfert analogique	Flux 2D-3D intégré au fauteuil	Patient virtuel dynamique
Indication	Cas esthétique antérieur simple et conservateur	Cas antérieurs additifs	Cas prothétique complexe avec chirurgie et analyse occlusale
Données acquises	Photographies, empreintes optiques	Photographie, vidéo, scan facial et empreinte optique du maxillaire	CBCT, empreintes optiques, scans faciaux et axiographie
Matérialisation	Wax-up sur modèle imprimé, puis mock-up en résine bis-acrylique	Coques imprimées (SLA) au fauteuil	Modèle imprimé, empreinte pour clé de transfert et guide chirurgical
Validation clinique	Esthétique et phonétique	Esthétique ± phonétique	Virtuelle, puis clinique et axiographique
Transfert du projet	Analogique	Direct au fauteuil	Numérique et analogique
Apport principal	Structure le projet et facilite la communication	Réduit les étapes de transfert	Coordonne la planification : esthétique, chirurgicale, occlusale
Limites principales	Écarts possibles lors du transfert analogique	Intégration occlusale absente ; indication limitée aux cas additifs ; fidélité non mesurée	Coût et plateau technique ; reproductibilité non établie

4 Discussion

4.1 Ce que le numérique change et ce qu'il ne change pas

La prévisibilité d'un mock-up issu d'un flux numérique ne dépend pas d'un outil isolé, mais de la maîtrise de l'ensemble de la chaîne opératoire, depuis l'acquisition des données jusqu'à la matérialisation clinique du projet. Le numérique ne supprime pas les sources d'erreur. Il les déplace des étapes conventionnelles d'empreinte, de réalisation du modèle et de transfert vers l'acquisition, la superposition des fichiers, la conception virtuelle et la fabrication [19,22].

Cette évolution impose de distinguer la fidélité technique de la pertinence clinique. Un mock-up peut reproduire fidèlement le projet numérique sans que celui-ci soit adapté aux conditions cliniques réelles. À l'inverse, une planification pertinente peut être altérée lors de sa fabrication ou de son transfert en bouche. La qualité du résultat dépend donc à la fois de l'exactitude de la matérialisation et de la validité du projet initial.

Cette distinction est particulièrement importante lorsque le mock-up est utilisé comme guide de préparation. Un écart entre le projet de référence et sa reproduction clinique peut modifier l'épaisseur des réductions et entraîner une perte tissulaire excessive. Or, les différents procédés de fabrication présentent tous des écarts par rapport au projet initial [6,26,39]. Ce même écart, une fois transposé au guide de préparation, se traduit par une réduction tissulaire plus ou moins fidèle au projet initial.

L'évaluation intra-orale conserve, dans ce contexte, une place déterminante. Elle permet de confronter le projet aux rapports dento-labiaux, à la phonation, à l'occlusion et à la dynamique du sourire [33]. Dans l'étude de Cattoni et al. [19], menée auprès de 28 patients, 85,7 % ont jugé l'essayage du mock-up usiné très efficace et 14,3 % efficace. Ces résultats confirment l'intérêt de cet essayage comme outil de validation par le patient, sans permettre toutefois de conclure à une supériorité clinique du flux numérique, compte tenu du faible effectif et de l'absence de comparaison directe avec d'autres protocoles.

L'apport du numérique réside ainsi principalement dans la continuité qu'il peut établir entre la conception, la fabrication et l'évaluation du projet.

4.2 Intérêt réel pour l'omnipraticien : indications et choix du flux

Le choix d'un flux numérique doit être proportionné à la complexité du cas, aux informations nécessaires à la planification et au niveau de maîtrise du praticien. Les bénéfices attendus ne sont ni constants ni automatiques et ne justifient pas le recours systématique aux protocoles les plus avancés [10]. Le niveau de preuve relatif aux flux entièrement numériques reste par ailleurs limité.

Dans une situation esthétique antérieure simple, un flux mixte 2D-3D avec transfert analogique peut suffire à élaborer, présenter et valider le projet. L'ajout d'un scan facial, d'une fabrication au fauteuil ou d'un patient virtuel ne présente un intérêt que s'il apporte une information susceptible de modifier la conception ou la conduite du traitement.

Le flux intégré au fauteuil devient pertinent lorsque l'objectif est de réduire les étapes analogiques intermédiaires entre la conception et l'essayage clinique [25]. Il peut faciliter les modifications du projet et raccourcir le délai de fabrication. Son efficacité demeure néanmoins dépendante de la qualité de l'impression, du post-traitement et de l'insertion des restaurations d'essai.

Le patient virtuel dynamique répond à des indications plus complexes, notamment lorsque la planification doit intégrer l'occlusion, la cinématique mandibulaire ou une intervention chirurgicale [34]. L'association des données dentaires, faciales, osseuses et fonctionnelles peut alors améliorer la coordination du traitement, sans que cet avantage se traduise nécessairement par un résultat esthétique supérieur à celui d'un flux simple.

Le niveau de compétence de l'opérateur constitue enfin un facteur déterminant. La multiplication des acquisitions, des logiciels et des conversions de fichiers augmente les exigences techniques du protocole. Un flux avancé insuffisamment maîtrisé peut ainsi perdre le bénéfice attendu et introduire de nouvelles sources de variabilité.

Pour l'omnipraticien, le choix doit donc être fondé sur l'utilité clinique des données recueillies. Le protocole le plus pertinent n'est pas nécessairement le plus complet, mais celui qui répond aux objectifs du traitement avec un niveau de complexité justifié.

4.3 Coût, accessibilité et stratégie d'intégration en pratique courante

La pertinence du numérique doit également être appréciée au regard de ses contraintes économiques et organisationnelles. Le coût comprend l'investissement initial dans le matériel et les logiciels, mais aussi la maintenance, les mises à jour et la formation [51]. Dans une enquête menée auprès de 1 238 dentistes suisses, 49 % estimaient que l'investissement dans les technologies numériques était trop élevé au regard des bénéfices obtenus [52].

Le gain de temps doit lui aussi être interprété avec prudence. La revue de Bessadet et al. [53] rapporte une réduction du temps consacré aux étapes de laboratoire, sans différence pour l'évaluation clinique et les ajustements au fauteuil. Les données disponibles restent toutefois insuffisantes pour déterminer si ce gain de temps se traduit par une amélioration du rapport coût-efficacité du flux numérique.

La courbe d'apprentissage concerne l'empreinte optique [54], mais également les logiciels de conception, la superposition des données et les échanges entre les différentes plateformes [51]. L'intérêt économique d'un équipement dépend ainsi de sa fréquence d'utilisation, de son intégration dans plusieurs domaines cliniques et de la capacité du cabinet à en maîtriser l'ensemble du flux.

L'intégration du numérique ne doit pas être pensée comme une accumulation d'équipements. Elle doit répondre aux usages réels du cabinet. L'empreinte optique peut être facilement intégrée lorsqu'elle est déjà utilisée pour d'autres indications restauratrices et prothétiques, et non uniquement pour la réalisation des mock-ups [29].

L'acquisition d'une imprimante 3D nécessite davantage de recul. Son intérêt dépend de la fréquence d'utilisation, de l'organisation du cabinet et de la maîtrise des différentes étapes de fabrication, depuis la préparation des fichiers jusqu'au post-traitement [44,47]. Lorsque ces conditions ne sont pas réunies, la fabrication peut être confiée au laboratoire plutôt que d'imposer l'achat d'un équipement sous-exploité.

Le numérique améliore par ailleurs la traçabilité des différentes étapes de la planification [25]. Cet avantage suppose toutefois une gestion rigoureuse des fichiers et le respect des exigences relatives au consentement du patient, à la confidentialité, à la sécurité des données et à la tenue du dossier clinique [55].

La prévisualisation doit enfin être présentée comme une proposition thérapeutique et non comme la reproduction certaine du résultat définitif. Une simulation trop idéaliste peut créer des attentes irréalistes [35]. La validation du mock-up doit donc s'accompagner d'une information claire sur les limites du projet et sur les écarts susceptibles de survenir au cours du traitement.

L'arbre décisionnel ci-dessous traduit cette logique en trois étapes : identifier l'indication clinique, vérifier les moyens et la maîtrise disponibles, puis sélectionner le flux correspondant (Figure 40). Le recours au numérique n'est pertinent que lorsque chaque outil mobilisé contribue directement à la planification, à la validation ou au transfert du projet.

Choix du degré d'intégration numérique

Étape 1 : identifier l'indication clinique

Esthétique	Esthétique + fabrication et essayage au fauteuil	Esthétique + analyse occlusale et fonctionnelle
Secteur antérieur, objectif essentiellement esthétique	Réduction des étapes intermédiaires entre la conception et l'essayage clinique	Intégration de l'occlusion et de la fonction ± planification chirurgicale

Étape 2 : vérifier les objectifs, les moyens et la maîtrise

✓ Esthétique antérieure prédominante ✓ Communication avec le patient ✓ Empreinte optique et fabrication externalisée ✗ **Intégration occlusale avancée**	✓ Besoin d'un essayage rapide et de modifications au fauteuil ✓ Scan intra-oral et scan facial utiles à la planification ✓ Impression 3D au fauteuil ✓ Maîtrise logicielle et volume d'activité suffisants ✗ **Surplomb ou recouvrement importants** ✗ **Réhabilitation occlusale ou chirurgicale**	✓ Paramètres occlusaux ou fonctionnels à intégrer à la planification ✓ Prise en compte de la cinématique mandibulaire ✓ Planification chirurgicale éventuelle ✓ Plateau technique avancé et maîtrise de l'intégration des données

Étape 3 : sélectionner le flux numérique adapté

Flux 1	Flux 2	Flux 3
Flux mixte 2D-3D avec transfert analogique **Outils mobilisés** · Photographies cliniques calibrées, analyse 2D · Empreinte optique et wax-up numérique · Modèle imprimé intégrant le wax-up · Clé en silicone et résine bis-acrylique **Prévisualisation et validation clinique**	**Flux 2D-3D intégré au fauteuil** **Outils mobilisés** · Photographie et vidéo du sourire · Scan facial et scan intra-oral · Coques imprimées au fauteuil · Fixation au composite fluide **Fabrication et essayage au fauteuil**	**Patient virtuel dynamique** **Outils mobilisés** · CBCT · Scans intra-oraux des deux arcades · Scans faciaux · Axiographie numérique · Articulateur virtuel · imprimante 3D **Matérialisation clinique** · Modèle imprimé pour la réalisation de la clé de transfert · Guide chirurgical **Planification intégrée** Esthétique, chirurgie et occlusion
Communication et validation *Validation esthétique et phonétique* *Transfert analogique par clé en silicone*	**Validation esthétique intra-orale** *Réduction des étapes analogiques intermédiaires* *Modifications possibles au fauteuil*	**Validation progressive du projet** *Évaluation virtuelle initiale* *Évaluation clinique* *Contrôle axiographique*

Figure 40 : Arbre décisionnel guidant le choix du flux numérique pour la réalisation du mock-up (illustration personnelle)

5 Perspectives

Trois évolutions prolongent aujourd'hui le développement du flux numérique : l'intelligence artificielle (IA), la réalité augmentée et le patient virtuel dynamique. Elles enrichissent la planification, sans remplacer la validation intra-orale du projet [9].

L'IA peut automatiser la détection de certains repères faciaux et proposer une première conception du sourire. Cette proposition sert de support à la planification et à la communication avec le patient, mais doit être analysée, adaptée et validée par le praticien en fonction des données cliniques [56,57].

La réalité augmentée permet de superposer le projet numérique à l'image du patient. Cette prévisualisation peut faciliter la communication, mais son utilisation en dentisterie reste encore peu documentée et ne se substitue pas à l'essayage clinique du mock-up [58].

Le patient virtuel dynamique permet de regrouper les données dentaires, faciales, osseuses et axiographiques dans une même planification. Il améliore la coordination entre les étapes esthétique, occlusale et chirurgicale, mais son utilisation reste complexe et dépend de la compatibilité entre les systèmes [34,38].

Les progrès concernent également les matériaux et les procédés de fabrication additive. Lorsqu'un mock-up est imprimé, sa fidélité dépend du matériau utilisé, des paramètres de fabrication et du post-traitement. Ce mode de fabrication n'est donc pas systématiquement plus fidèle qu'un transfert analogique [11]. Il peut toutefois être utilisé pour produire des supports rigides associés à une clé en silicone afin d'améliorer le transfert [39].

Enfin, la diffusion de ces évolutions dépendra de leur appropriation par les praticiens. Leur maîtrise nécessite une formation théorique et pratique structurée, ainsi qu'un apprentissage qui se poursuit au-delà des premières utilisations [51,54]. L'acquisition des compétences doit donc être progressive et adaptée au degré de flux choisi.

Conclusion

Le mock-up reste une étape centrale de la planification esthétique. En matérialisant le projet dans les conditions cliniques réelles, il permet d'en apprécier l'intégration esthétique, fonctionnelle et phonétique, tout en associant le patient à sa validation avant toute intervention irréversible.

Le numérique renouvelle les modalités de conception, de transmission et de matérialisation du projet, mais il déplace les sources d'erreur plus qu'il ne les supprime : la qualité du résultat dépend toujours de la maîtrise de l'ensemble du flux, de l'acquisition à l'essayage intra-oral.

Ce constat invite à ne pas confondre degré d'intégration numérique et qualité clinique du projet : un flux plus complet n'apporte un bénéfice réel que si les données recueillies changent la décision thérapeutique. C'est cette utilité clinique, plus que le niveau d'équipement, qui doit guider le choix du praticien.

Cette revue narrative ne permet pas d'établir une hiérarchie formelle entre les protocoles, faute d'études comparant directement l'écart entre projet numérique, matérialisation clinique et résultat définitif. Des essais contrôlés mesurant cet écart, ainsi que le rapport coût-bénéfice de chaque degré d'intégration, permettraient de transformer ces données descriptives en véritables critères de décision.

Le numérique ne se substitue donc ni au raisonnement clinique ni à la validation en bouche. Il constitue un ensemble d'outils dont la pertinence dépend de leur capacité à servir le projet thérapeutique et, avant tout, le patient.

Références

[1] Dragusha R, Ibraimi D. Mock-up: an aid in the different steps in aesthetic dental treatment. Eur Sci J. 2016;12(6):307–315.

[2] Reshad M, Cascione D, Magne P. Diagnostic mock-ups as an objective tool for predictable outcomes with porcelain laminate veneers in esthetically demanding patients: a clinical report. J Prosthet Dent. 2008;99(5):333–339.

[3] Tirlet G, Attal JP. Le gradient thérapeutique : un concept médical pour les traitements esthétiques. Inf Dent. 2009;91(41-42):2561–2568.

[4] Simon H, Magne P. Clinically based diagnostic wax-up for optimal esthetics: the diagnostic mock-up. J Calif Dent Assoc. 2008;36(5):355–362.

[5] Sánchez Heinsohn JP, Mahn Arteaga E, Jorquera Rivera G, et al. Mock-up: an old tool renewed. J Clin Res Dent. 2018;1(1):1–5.

[6] Etienne O, Nguyen T. Esthetic mock-ups: a clinical study of reproducibility. Int J Esthet Dent. 2021;16(3):310–323.

[7] Cattoni F, Teté G, Calloni AM, et al. Milled versus moulded mock-ups based on the superimposition of 3D meshes from digital oral impressions: a comparative in vitro study in the aesthetic area. BMC Oral Health. 2019;19(1):230.

[8] Coachman C, Calamita M. Digital smile design: a tool for treatment planning and communication in esthetic dentistry. Quintessence Dent Technol. 2012;35:103–111.

[9] Blatz MB, Chiche G, Bahat O, et al. Evolution of aesthetic dentistry. J Dent Res. 2019;98(12):1294–1304.

[10] Joda T, Zarone F, Ferrari M. The complete digital workflow in fixed prosthodontics: a systematic review. BMC Oral Health. 2017;17(1):124.

[11] Falahchai M, Ezzati M, Hendi A. Comparison of trueness of digitally- and conventionally-fabricated mockups. Clin Exp Dent Res. 2026;12(1):e70307.

[12] Jain A, Bhushan P, Mahato M, et al. The recent use, patient satisfaction, and advancement in digital smile designing: a systematic review. Cureus. 2024;16(6):e62459.

[13] Gurel G, Morimoto S, Calamita MA, et al. Clinical performance of porcelain laminate veneers: outcomes of the aesthetic pre-evaluative temporary technique. Int J Periodontics Restorative Dent. 2012;32(6):625–635.

[14] McLaren EA. Bonded functional esthetic prototype: an alternative pre-treatment mock-up technique and cost-effective medium-term esthetic solution. Compend Contin Educ Dent. 2013;34(8):596–607.

[15] Vailati F, Belser UC. Full-mouth adhesive rehabilitation of a severely eroded dentition: the three-step technique. Part 1. Eur J Esthet Dent. 2008;3(1):30–44.

[16] Koubi S, Gurel G, Margossian P, et al. A simplified approach for restoration of worn dentition using the full mock-up concept: clinical case reports. Int J Periodontics Restorative Dent. 2018;38(2):189–197.

[17] Perrin P, Zimmerli B, Jacky D, et al. The stamp technique for direct composite restoration. Schweiz Monatsschr Zahnmed. 2013;123(2):111–129.

[18] Spadoni D, Valeri C, Quinzi V, et al. Advancing orthodontic aesthetics: exploring the potential of injectable composite resin techniques for enhanced smile transformations. Dent J (Basel). 2025;13(1):18.

[19] Cattoni F, Mastrangelo F, Gherlone EF, et al. A new total digital smile planning technique (3D-DSP) to fabricate CAD/CAM mockups for esthetic crowns and veneers. Int J Dent. 2016;2016:6282587.

[20] Garcia PP, da Costa RG, Calgaro M, et al. Digital smile design and mock-up technique for esthetic treatment planning with porcelain laminate veneers. J Conserv Dent. 2018;21(4):455–458.

[21] Allam S, Morsi T, Taha D. Comparison of dental mock-ups manufactured by different techniques: molded and milled. An in vitro study. Ain Shams Dent J. 2023;30(2):22–26.

[22] Revilla-León M, Özcan M. Additive manufacturing technologies used for processing polymers: current status and potential application in prosthetic dentistry. J Prosthodont. 2019;28(2):146–158.

[23] Chiche GJ, Pinault A. Esthetics of anterior fixed prosthodontics. Chicago: Quintessence Publishing; 1994.

[24] Omar D, Duarte C. The application of parameters for comprehensive smile esthetics by digital smile design programs: a review of the literature. Saudi Dent J. 2018;30(1):7–12.

[25] Coachman C, Georg R, Bohner L, et al. Chairside 3D digital design and trial restoration workflow. J Prosthet Dent. 2020;124(5):514–520.

[26] Koh YS, Naidoo N, Petridis H. Comparisons of analog and digital methods to produce an accurate trial restoration. J Prosthet Dent. 2025;133(2):513–522.

[27] Bhuvaneswaran M. Principles of smile design. J Conserv Dent. 2010;13(4):225–232.

[28] Coachman C, Paravina RD. Digitally enhanced esthetic dentistry: from treatment planning to quality control [editorial]. J Esthet Restor Dent. 2016;28 Suppl 1:S3–S4.

[29] Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, et al. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. BMC Oral Health. 2017;17(1):149.

[30] Pascali C, Gout JC, Bergeron C. Analyse du sourire et planification : intérêt des outils informatiques. Inf Dent. 2024;(41-42):28–36.

[31] Sanchez-Lara A, Chochlidakis KM, Lampraki E, et al. Comprehensive digital approach with the Digital Smile System: a clinical report. J Prosthet Dent. 2019;121(6):871–875.

[32] Kong L, Li Y, Liu Z. Digital versus conventional full-arch impressions in linear and 3D accuracy: a systematic review and meta-analysis of in vivo studies. Clin Oral Investig. 2022;26(9):5625–5642.

[33] Coachman C, Calamita MA, Sesma N. Dynamic documentation of the smile and the 2D/3D Digital Smile Design process. Int J Periodontics Restorative Dent. 2017;37(2):183–193.

[34] Yue Z, Luo Z, Hou J, et al. Application of 3D digital smile design based on virtual articulation analysis in esthetic dentistry: a technique. J Prosthet Dent. 2025;133(1):24–30.

[35] Zotti F, Marchesini F, Lanzaretti G, et al. Traditional, 2D and 3D workflows: what is better for aesthetic rehabilitation of superior anterior teeth? Appl Sci. 2023;13(10):6205.

[36] Chisnoiu AM, Staicu AC, Kui A, et al. Smile design and treatment planning: conventional versus digital. A pilot study. J Pers Med. 2023;13(7):1028.

[37] Lee JD, Nguyen O, Lin YC, et al. Facial scanners in dentistry: an overview. Prosthesis. 2022;4(4):664–678.

[38] Mangano C, Luongo F, Migliario M, et al. Combining intraoral scans, cone beam computed tomography and face scans: the virtual patient. J Craniofac Surg. 2018;29(8):2241–2246.

[39] Ntovas P, Ladia O, Barmak AB, et al. Impact of material and silicone index support using additively manufactured trays on the reproducibility of diagnostic trial restorations (mock-up): a comparative in vitro study. J Dent. 2025;162:106013.

[40] Crescenzo H, Crescenzo D. Les clefs de contrôle. Partie 1. Inf Dent. 2019;(10):28–30.

[41] Sancho-Puchades M, Fehmer V, Hämmerle CH, et al. Advanced smile diagnostics using CAD/CAM mock-ups. Int J Esthet Dent. 2015;10(3):374–391.

[42] Jain S, Sayed ME, Shetty M, et al. Physical and mechanical properties of 3D-printed provisional crowns and fixed dental prosthesis resins compared with CAD/CAM-milled and conventional provisional resins: a systematic review and meta-analysis. Polymers (Basel). 2022;14(13):2691.

[43] Alzahrani SJ, Hajjaj MS, Azhari AA, et al. Mechanical properties of three-dimensional printed provisional resin materials for crown and fixed dental prosthesis: a systematic review. Bioengineering (Basel). 2023;10(6):663.

[44] Denis C, Delé S, Dehurtevent M. L'impression 3D dans le quotidien du chirurgien-dentiste. Réal Clin. 2024;35(2):20–27.

[45] Prakash J, Shenoy M, Alhasmi A, et al. Biocompatibility of 3D-printed dental resins: a systematic review. Cureus. 2024;16(1):e51721.

[46] Anghel-Lorinți A, Faur A, Rotar RN, et al. Trueness and internal fit of 3D-printed provisional veneers: an in vitro comparative study. Bioengineering (Basel). 2024;11(12):1204.

[47] Sastre T. L'impression 3D chairside : applications et perspectives. Réal Clin. 2022;33(3):35–42.

[48] Alves RV, Francisco H, Pinto AC, et al. Facial landmarks determination with different digital scanners: an in vivo study. J Clin Med. 2026;15(4):1500.

[49] Hoang V, Nguyen TH, Doan TNU, et al. Evaluation of trueness and precision in extraoral 3D facial scanning systems using a 3D-printed head model: an in vitro study. J Clin Med. 2025;14(23):8384.

[50] Cho RY, Byun SH, Yi SM, et al. Comparative analysis of three facial scanners for creating digital twins by focusing on the difference in scanning method. Bioengineering (Basel). 2023;10(5):545.

[51] Dimitrova M. The role of digital innovations in shaping contemporary fixed prosthodontics: a narrative review. Oral. 2025;5(4):84.

[52] Mühlemann S, Sandrini G, Ioannidis A, et al. The use of digital technologies in dental practices in Switzerland: a cross-sectional survey. Swiss Dent J. 2019;129(9):700–707.

[53] Bessadet M, Drancourt N, El Osta N. Time efficiency and cost analysis between digital and conventional workflows for the fabrication of fixed dental prostheses: a systematic review. J Prosthet Dent. 2025;133(1):71–84.

[54] Róth I, Czigola A, Joós-Kovács GL, et al. Learning curve of digital intraoral scanning: an in vivo study. BMC Oral Health. 2020;20(1):287.

[55] Mariño RJ, Zaror C. Legal issues in digital oral health: a scoping review. BMC Health Serv Res. 2024;24(1):6.

[56] Ceylan G, Özel GS, Memişoglu G, et al. Evaluating the facial esthetic outcomes of digital smile designs generated by artificial intelligence and dental professionals. Appl Sci. 2023;13(15):9001.

[57] Buduru S, Cofar F, Mesaroș A, et al. Perceptions in digital smile design: assessing laypeople's and dental professionals' preferences using an artificial-intelligence-based application. Dent J (Basel). 2024;12(4):104.

[58] Puleio F, Tosco V, Pirri R, et al. Augmented reality in dentistry: enhancing precision in clinical procedures. A systematic review. Clin Pract. 2024;14(6):2267–2283.

Liste des tables

Tableau 1 : Typologie et caractéristiques cliniques du mock-up en dentisterie contemporaine (illustration personnelle) 17

Tableau 2 : Principales techniques de réalisation du mock-up : principes, matériaux, avantages et limites (illustration personnelle)..... 19

Tableau 3 : Principaux flux numériques de conception du mock-up : du 2D au patient virtuel (illustration personnelle)..... 37

Tableau 4 : Matériaux de fabrication des mock-ups conventionnels et numériques (illustration personnelle) 41

Tableau 5 : Synthèse des trois cas cliniques et de leur degré d'intégration numérique (illustration personnelle) 60

Liste des figures

Figure 1 : Wax-up diagnostique sur modèle analogique (courtoisie Dr Bechrouri)..... 15

Figure 2 : Clé de transfert en silicone de laboratoire, réalisée en double mélange et wax-up sur modèle imprimé en 3D (courtoisie Dr Dupont)..... 16

Figure 3 : Bibliothèque de données centralisées sur le logiciel Smilecloud® (courtoisie Dr Abed)..... 21

Figure 4 : Évolutions chronologiques et place du mock-up dans le flux numérique (illustration personnelle)..... 22

Figure 5 : Superposition des fichiers d'empreintes optiques et coupes correspondantes, enregistrés aux différentes étapes de la réhabilitation : situation initiale en jaune ; préparations dentaires en bleu ; projet prothétique issu du wax-up virtuel en violet (courtoisie Dr Abed)..... 23

Figure 6 : Mock-up de validation dans une réhabilitation globale avec indication parodontale (courtoisie Dr Abed) A : vue endobuccale initiale B : vue endobuccale initiale de profil C : essayage du mock-up en bouche 24

Figure 7 : Analyse esthétique à l'échelle du visage réalisée à l'aide du logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)..... 25

Figure 8 : Analyse esthétique à l'échelle du sourire et dento-gingivale réalisée à l'aide du logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle)..... 26

Figure 9 : Analyse esthétique à l'échelle dento-gingivale : proportions coronaires relevées cliniquement avant l'élaboration d'un Smile Design (courtoisie Dr Abed) 26

Figure 10 : Analyse esthétique bidimensionnelle et conception du sourire selon les principes DSD® (courtoisie Dr Abed)..... 28

Figure 11 : Prévisualisation dynamique du projet esthétique sur Smilecloud® (courtoisie Dr Abed)..... 28

Figure 12 : Mock-up de validation prothétique (courtoisie Dr Abed)..... 28

Figure 13 : Technique APT (courtoisie Dr Abed) A : mock-up esthétique en place B : réduction amélaire guidée à travers le mock-up (vues latérales) C : préparations après finitions..... 29

Figure 14 : Flux numérique appliqué à un cas multidisciplinaire : de l'acquisition des données à la réalisation des restaurations définitives (courtoisie Dr Dubois) 30

Figure 15 : Calibration dimensionnelle de la règle numérique à partir d'une incisive centrale, d'après [8] 31

Figure 16 : Empreinte optique de l'arcade maxillaire, réalisée avec le système 3Shape TRIOS 6® (iconographie personnelle) 33

Figure 17 : Simulation 2D sur photographies calibrées, réalisée avec le logiciel 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle) 34

Figure 18 : Intégration des données 2D et 3D pour la planification esthétique à l'aide du logiciel EXOCAD DentalCAD® (courtoisie Dr Cohen) A : photographie intra-orale initiale B : modèle 3D (STL) de l'arcade maxillaire C : wax-up virtuel 3D guidé par l'analyse photographique 35

Figure 19 : Conception du wax-up virtuel via Blueprint® (Smilecloud®) (courtoisie Dr Abed) 36

Figure 20 : Clé de transfert réalisée en silicone de laboratoire de haute dureté (ZETALABOR®, Zhermack®) d'après [40] 38

Figure 21 : Clé de transfert réalisée en PVS selon une technique en double mélange, rigidifiée par un porte-empreinte non rainuré, d'après [6] 39

Figure 22 : Principe de fonctionnement des technologies d'impression 3D. A : SLA et B : DLP, d'après [44] 42

Figure 23 : Principe de fonctionnement du procédé d'impression PolyJet, d'après [44] 42

Figure 24 : Mock-up imprimé par stéréolithographie (SLA) : de la conception numérique à la validation clinique, d'après [47] 43

Figure 25 : Flux CFAO : wax-up virtuel, mock-up en PMMA et restaurations céramiques d'usage, d'après [19] 44

Figure 26 : Situation clinique initiale A : vue de face et B : vue rapprochée du sourire (iconographie personnelle) 46

Figure 27 : Analyse faciale et planification esthétique avec 3Shape Smile Design® (iconographie personnelle) 47

Figure 28 : Simulation du projet esthétique proposée à la patiente (iconographie personnelle)..... 48

Figure 29 : Wax-up diagnostique issu de la simulation 2D imprimé en 3D pour la réalisation de la clé du mock-up (iconographie personnelle) 48

Figure 30 : Essayage clinique du mock-up en bouche (iconographie personnelle)..... 49

Figure 31 : Acquisition des données avec DSD App 3D®, d'après [25] 50

Figure 32 : Simulation 2D et intégration faciale du projet, d'après [25]..... 51

Figure 33 : Conception du wax-up virtuel, d'après [25]..... 51

Figure 34 : Conception des coques vestibulaires et fabrication par impression 3D au fauteuil, d'après [25]..... 52

Figure 35 : Situation clinique initiale, d'après [34]..... 54

Figure 36 : Données acquises pour la constitution du patient virtuel dynamique, d'après [34]..... 55

Figure 37 : Conception numérique du modèle 3D et réalisation de la clé de transfert, d'après [34]..... 56

Figure 38 : Conception numérique et réalisation par impression 3D du guide chirurgical, d'après [34]..... 57

Figure 39 : Tracés incisifs en propulsion et diduction enregistrés par l'axiographe virtuel après la pose des restaurations d'usage, d'après [34] 57

Figure 40 : Arbre décisionnel guidant le choix du flux numérique pour la réalisation du mock-up (illustration personnelle)..... 65

Thèse d'exercice : Chir. Dent. : Lille : Année 2026

Le mock-up à l'ère du numérique : vers une planification esthétique plus prévisible, validable et transférable / **Imane Karrat**. - p. (76) : ill. (45) ; réf. (58).

Domaines : Esthétique ; Prothèses

Mots clés libres : mock-up, flux numérique, CFAO, Digital Smile Design, prévisibilité, validation clinique, transfert clinique, patient virtuel.

Résumé de la thèse en français

En dentisterie, l'écart entre le résultat attendu par le patient et le résultat obtenu reste une source fréquente d'insatisfaction. En matérialisant temporairement le projet directement en bouche, le mock-up permet d'en apprécier l'intégration clinique et d'associer le patient à sa validation avant toute intervention irréversible. Le développement de l'empreinte optique, de la planification assistée par ordinateur et des procédés de fabrication additive ou soustractive a modifié les modalités de conception, de transmission et de matérialisation du projet esthétique, sans en changer la finalité. Fondé sur une revue narrative de la littérature, ce travail précise la place du mock-up dans la démarche thérapeutique contemporaine, décrit les principaux flux numériques et analyse leur influence sur la prévisibilité, la validation clinique et la fidélité du transfert. Trois situations cliniques illustrent différents degrés d'intégration numérique, du flux mixte 2D-3D au patient virtuel dynamique. Les données disponibles montrent que le numérique facilite la centralisation, la modification, la conservation et le partage des informations, et peut améliorer la continuité entre les différentes étapes du traitement. Il ne garantit toutefois ni la fidélité de la matérialisation clinique ni la pertinence du projet initial. L'étendue de la planification et la continuité du transfert constituent ainsi deux dimensions distinctes, qui ne sont pas nécessairement maximisées au sein d'un même protocole. Le mock-up reste donc un support essentiel de validation clinique, de communication et de guidage des préparations. Ce n'est donc pas la complexité du cas seule qui justifie un flux numérique avancé, mais la capacité réelle à en exploiter les données jusqu'au bout du traitement.

JURY :

Président : Monsieur le Professeur Kevimy AGOSSA

Assesseurs : Monsieur le Docteur Corentin DENIS

Monsieur le Docteur Xavier COUTEL

Monsieur le Docteur Adam ABED