

UNIVERSITE DE TOULOUSE
FACULTE DE SANTE – DEPARTEMENT D'ODONTOLOGIE

ANNEE 2025

2025 TOU3 3009

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Mehdi ZOUAOUI

le 20 Février 2025

**L'essor du jumeau numérique dans la planification
prothétique : enjeux et opportunités**

Directeur de thèse : Pr Florent DESTRUHAUT

JURY

Président :	Pr Philippe POMAR
1er assesseur :	Pr Florent DESTRUHAUT
2ème assesseur :	Dr Charlotte THOMAS
3ème assesseur :	Dr Julien DELRIEU
Invité :	Dr Constance CUNY



UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Faculté de santé

Faculté de santé
Département d'Odontologie

DIRECTION

Doyen de la Faculté de Santé
M. Philippe POMAR

Vice Doyenne de la Faculté de Santé
Directrice du Département d'Odontologie
Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

Directeurs Adjoint(s)
Mme Sarah COUSTY
M. Florent DESTRUHAUT

Directrice Administrative
Mme Muriel VERDAGUER

Présidente du Comité Scientifique
Mme Cathy NABET

1-10 NORARIAT

Doyens honoraires
M. Jean LAGARRIGUE
M. Jean-Philippe LODTER⁺
M. Gérard PALOUDIER
M. Michel SIXOU
M. Henri SOULET

Chargés de mission
M. Karim NASR (*Innovation Pédagogique*)
M. Olivier HAMEL (*Maillage Territorial*)
M. Franck DIEMER (*Formation Continue*)
M. Philippe KEMOUN (*stratégie Immobilière*)
M. Paul MONSARRAT (*Intelligence Artificielle*)

-# PERSONNEL ENSEIGNANT

Section CNU 56: Développement, Croissance et Prévention

56.01 ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE et ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE (Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER)

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

Professeurs d'Université : Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER M. Frédéric VAYSSE, Mme Marie- Cécile VALERA
Maître de Conférence : M. Mathieu MARTY
Assistants : M. Robin BENETAH
Adjoint(s) d'Enseignement : M. Sébastien DOMINE, M. Mathieu TESTE, M. Daniel BANDON

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Maîtres de Conférences : M. Pascal BARON M. Maxime ROTENBERG
Assistants : Mme Carole VARGAS JOULIA, Mme Chahrazed BELAÏLI, Mme Véronique POINSOTTE
Adjoint(s) d'Enseignement : Mme. Isabelle ARAGON, M. Vincent VIDAL-ROSSET, Mme Hasnaa KHALBD

56.02 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE (Mme Géromine FOURNIER)

Professeurs d'Université : M. Michel SIXOU, Mme Catherine NABET, M. Olivier HAMEL, M. Jean-Joël VERGNES
Maîtres de Conférences : Mme Géromine FOURNIER
Assistants : M. Nicolas DRITSCH
Adjoint(s) d'Enseignement : M. Alain DURAND, Mlle. Sacha BARON, M. Romail L. AGARD, M. Jean-Philippe GATIIGNOL
Mme Carole KANJ, Mme Mylène VINCENI-BERTHOUMIEUX, M. Christophe BBDOS

Section CNU 57: Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

57.01 CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE (M. Philippe KEMOUN)

PARODONTOLOGIE

Professeur, d'Université : Mme Sara LAURENCIN-DALICIEUX
Maîtres de Conférences : Mme Alexia VINEL, Mme. Charlotte THOMAS
Assistants : M. Antoine ALHALABI, M. Pierre JEHLE
Adjoint(s) d'Enseignement : M. Loïc CALVO, M. Antoine SANCIER, M. Ronan BARRE, Mme Myriam KADDECH,
M. Mathieu RIMBERT, M. Jeffrey DURAN

CHIRURGIE ORALE

Professeur d'Université: Mme Sarah COUSTY
Maitres de Conférences: M. Philippe CIMPAN, M. Bruno COURTOIS, M. Antoine DUBUC.
Assistants: Mme Jessica CHALOU
Adjoints d'Enseignement: M. Gabriel JUXPOINT, M. Arnaud L'HOMMIE, Mme Marie-Pierre LABADIE, M. Jérôme SPIELFRANQUE, M. Clément CAMBRONNIE

BIOLOGIE ORALE

Professeurs d'Université: M. Philippe LEMOUNI, M. Vincent BILASOO-BAQUE
Maitres de Conférences: M. Pierre-Pascal POULET, M. Matthieu MINTY
Assistants: Mme Chiara OEOCHIN-AUIE, RTON1, M. Maxime LUIS, Mme Valentine BAYLE1 GALY-CASSIT, M. Sylvie LE
Adjoints d'Enseignement: M. Mathieu FRANC, M. Hugo BARRAGUE, Mme Inessa MOFEIEVA-JOSSINET

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHÈSES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX (M Paul MONSARRAT)

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeurs d'Université: M. Franck DIEMER, Mme Delphine MARH-COMTESSE
Maitres de Conférences: M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN,
Assistants: M. Vincent SUAREZ, M. Lorris BOIVIN, M. Thibault DECPIMPS, Mme Emma STURARO, Mme Anouk IFESQUET
Assistante Associée: Mme Lucie RAPP
Adjoints d'Enseignement: M. Eric BALGUERIE, M. Jean-Philippe MAWET, M. Rami HAMPIN, M. Romain DUCASSE, Mme Marion CASTAING-FOURIER

PROTHÈSES

Professeurs d'Université: M. Philippe POMAA, M. Florent DESTRUHAUT,
Maitres de Conférences: M. Antoine GALJIBOURG, M. Julien DELRIEU
Assistants: Mme Malnilde HOURSET, Mme Constance CUNY, M. Paul POULET, Mme Aurélie BBRNIEDIE, M. Cécile CAZAJUS
Adjoints d'Enseignement: M. Christophe GHRENASSIA, Mme Marie-Hélène ILACOSTE-IFERRE, M. Olivier LEGAG, M. Luc RAYNALDY, M. Jean-Claude COMBADAZOU, M. Bertrand ARCAUTE, M. Fabien LEMAGNER, M. Eric SLYOM, M. Michel KNAFO, M. Victor EMONET DBNAND, M. Thierry DENIS, M. Thibault VAGUE, M. Antonin HENNEQUJIN, M. Bertrand CHAMPION, M. Julien ROZENZWEIG

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX

Professeur d'Université: Mr Paul MONSARRAT
Maitres de Conférences: Mme Sabine JONIOI, M. Karim NASR, M. Thibault CPINCEIJL,
Assistants: M. Olivier DENY, Mme Laura PASCALIN, Mme Alison I'ROSPER, Mme Luna DESN01
Adjoints d'Enseignement: Mme Sylvie MAGNE, M. Thierry VERGÉ, M. Damien OSTROWSKI

Mise à jour pour le 01 Février 2025

Remerciements

À la vie pour cette aventure quelque peu longue et sinueuse mais surtout profondément enrichissante.

À ma famille, qui a été une source inépuisable de force et de motivation.

À ma mère, ma plus grande supportrice depuis le premier jour. Tu as toujours été et tu es une lumière dans mon quotidien, une force calme et inébranlable. Je te dédie ma réussite présente et futur.

À ma grand-mère, dont les enseignements et l'amour continuent de m'accompagner chaque jour.

À ma bien aimé. À ma petite sœur chérie. À mon Gheyu.

Enfin, à mes amis, mes collègues et à toutes les rencontres qui ont marqué ce parcours. Votre soutien et vos encouragements ont été précieux. Merci à vous tous.

A notre président du jury

Monsieur le Professeur **Philippe POMAR**

- Professeur des Universités-Praticien des Hôpitaux.
- Spécialiste Qualifié en Médecine Bucco-Dentaire et Prothèse Maxillo-Faciale.
- Doyen de la Faculté de Santé de Toulouse.
- Doyen Honoraire de l'Ancienne Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse.
- Colonel de Réserve du Service de Santé des Armées (CDC-RC).
- Commandeur dans l'Ordre des Palmes Académiques.

Nous vous remercions sincèrement d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse. Nous nous souviendrons de votre écoute et de votre disponibilité. Nous vous remercions pour la bienveillance dont vous avez toujours fait preuve. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de notre profond respect.

A notre directeur de thèse

Monsieur le Professeur **Florent DESTRUHAUT**

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Directeur adjoint du département d'Odontologie de la Faculté de Santé de l'Université de Toulouse III Paul Sabatier
- Habilitation à Diriger des recherches
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Spécialiste Qualifié « Médecine Bucco-Dentaire »
- Docteur de l'École des Hautes Études en Sciences Sociales en Anthropologie sociale et historique,
- Certificat d'Études Supérieures en Prothèse Maxillo-Faciale,
- Certificat d'Études Supérieures en Prothèse Conjointe,
- Diplôme Universitaire de Prothèse Complète Clinique de Paris V,
- Diplôme universitaire d'approches innovantes en recherche de TOULOUSE III
- Responsable du diplôme universitaire d'occlusodontologie et de réhabilitation de l'appareil manducateur
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous avez fait d'avoir accepté de diriger cette thèse. Nous vous remercions pour vos enseignements. Votre bienveillance, pédagogie et exemplarité, sont une source d'inspiration profonde. Nous espérons que ce travail sera à la hauteur de vos attentes, veuillez y trouver l'expression de notre profond respect et de notre gratitude.

A notre Jury

Madame le Docteur **Charlotte THOMAS**

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
 - Docteur en Chirurgie Dentaire,
 - Docteur de l'Université Paul Sabatier
 - Ancienne interne des Hôpitaux de Toulouse
- Spécialiste qualifié en Médecine Bucco-Dentaire (DES MBD)
Diplôme Universitaire de Parodontologie
Diplôme Universitaire de Conception Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO)
en odontologie
Lauréate de l'Université Paul Sabatier.

Nous vous remercions très chaleureusement d'avoir accepté de participer à notre jury de thèse. Nous vous remercions pour la qualité de vos enseignements. Veuillez trouver ici le témoignage de notre plus grande gratitude.

A notre Jury

Monsieur le Docteur **Julien DELRIEU**

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- CES de Prothèse Fixée
- Diplôme Universitaire de CFAO
- Diplôme Universitaire d'Approche Innovante en Recherche
- Vice-président de la Commission Bien-Être des Etudiants de la Faculté de Santé
- Vice-président de l'Université Toulouse III délégué à l'Egalité, l'Inclusion et la Diversité

Nous vous remercions très chaleureusement d'avoir accepté de participer à notre jury de thèse. Nous vous remercions pour la qualité de votre encadrement clinique. Veuillez trouver ici le témoignage de notre plus grande gratitude.

A notre Jury

Madame le Docteur **Constance CUNY**

- Assistante Hospitalo-universitaire d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Spécialiste qualifiée en Médecine Bucco-Dentaire
- D.U Occlusodontologie et Réhabilitation de l'appareil manducateur

Nous vous remercions très chaleureusement d'avoir accepté de participer à notre jury de thèse. Nous vous remercions pour votre réactivité et bienveillance. Veuillez trouver ici le témoignage de notre plus grande gratitude.

Table des matières

Introduction	12
I Fondement théorique du jumeau numérique	12
1.1 Définition	14
1.2 Histoire	15
II Applications transversales du jumeau numérique de planification	16
2.1 Le jumeau numérique en ingénierie (exemple de l'industrie automobile)	17
2.2 Le jumeau numérique en santé	21
III Le jumeau numérique dans la planification en odontologie prothétique	23
3.1 La planification prothétique	24
3.2 Données d'entrée pour la création d'un jumeau numérique	25
3.2.1 Empreinte optique.....	26
3.2.1.1 Scanner de bureau.....	26
3.2.1.2 Camera d'empreinte optique intra-orale ou scanner intraoral (IOS)	28
3.2.2 Photographie en deux dimensions (2D)	34
3.2.3 Scanner facial	36
3.2.4 Cone beam.....	38
3.2.5 Traqueurs de la position mandibulaire	41
3.2.5.1 Le Modjaw (dispositif et logiciel).....	42
3.2.6 Autres données d'entrée	49
3.2.6.1 Logiciels métiers	49
3.2.6.2 Radiographie et diagnostic par intelligence artificielle	50
3.2.6.3 Électromyographie (EMG).....	52
IV Perspectives technologiques et enjeux éthiques	55
4.1 Perspectives technologiques	55
4.2 Enjeux éthiques	57
Conclusion	60
Bibliographie	61
Table des figures	68
Annexes	69

Introduction

La planification prothétique s'apparente à une symphonie, où le chirurgien-dentiste endosse le rôle de chef d'orchestre, de compositeur et de musicien. Il doit sélectionner les instruments adaptés au soliste qu'est le patient, les maîtriser pour accompagner celui-ci avec précision, tout en lui enseignant le tempo et les gestes nécessaires pour une utilisation optimale. En toile de fond, le laboratoire de prothèse fait partie de l'orchestre, apportant son soutien technique à la création de cette œuvre sur mesure, qui vise à produire une harmonie parfaite. Elle a pour objectif de restaurer et améliorer la globalité de la santé du patient. Cette démarche nécessite pédagogie, exigence analytique, communication et subtilité décisionnelle, pour recréer un sourire alliant biologie, fonctionnalité et esthétique. Une telle entreprise requiert une compréhension approfondie des besoins individuels de chaque patient, ainsi qu'une anticipation précise des résultats des traitements proposés.

L'intégration des outils numériques dans notre profession s'est d'abord démocratisée par l'empreinte optique et la conception fabrication assistée par ordinateur (CFAO) dont le champ d'application thérapeutique restait quelque peu cloisonné. Aujourd'hui grâce à l'évolution des technologies et de l'importance des outils numériques à notre disposition, le champ d'application s'élargit et transcende les frontières du possible, notamment par la possibilité de préfiguration d'un jumeau numérique du patient au cours de la prise en charge thérapeutique. La technologie du jumeau numérique semble constituer un outil précieux pour mettre en œuvre la planification prothétique dans la quête des objectifs cités précédemment tout en offrant une perspective d'évolution notable. En effet, ces avancées ont le potentiel d'améliorer l'interaction avec les patients et le laboratoire de prothèse ; elles apportent un regard nouveau sur la mise en œuvre du projet thérapeutique et transforment peu à peu nos pratiques professionnelles. Par ailleurs, le jumeau numérique bénéficiera des avancées en termes d'intelligence artificielle, ce qui modifiera en profondeur le modèle de soins.



*Figure 1 : Représentation imagée du jumeau numérique en prothèse maxillo-faciale.
(Source : chatGPT 4.0).*

Ce manuscrit a pour objectif de parcourir l'état actuel de la planification prothétique via le jumeau numérique, d'examiner les outils et applications associés, et d'ouvrir une perspective sur l'avenir de cette pratique. Il cherche également à susciter une réflexion sur les enjeux éthiques liés à l'intégration de ces technologies de pointe. Nous aborderons dans un premier temps les fondements théoriques du jumeau numérique, en définissant le concept et en retraçant son évolution. Cette partie contextualisera l'utilisation du jumeau numérique dans divers domaines, établissant ainsi un socle de compréhension avant de plonger dans les spécificités de la dentisterie. Nous examinerons ensuite les différents outils à notre disposition pour figurer le jumeau. Nous reviendrons en dernier lieu sur les perspectives scientifiques et les implications éthiques de telles avancées numériques.

I. Fondement théorique du jumeau numérique

1.1. Définition

La technologie du jumeau numérique, malgré une complexité intrinsèque et l'absence d'une standardisation académique universelle, est généralement compris comme : une représentation virtuelle d'un système physique, de son environnement, et des processus associés, mise à jour via l'échange d'informations entre les espaces physiques et virtuels (1) (figure 2).

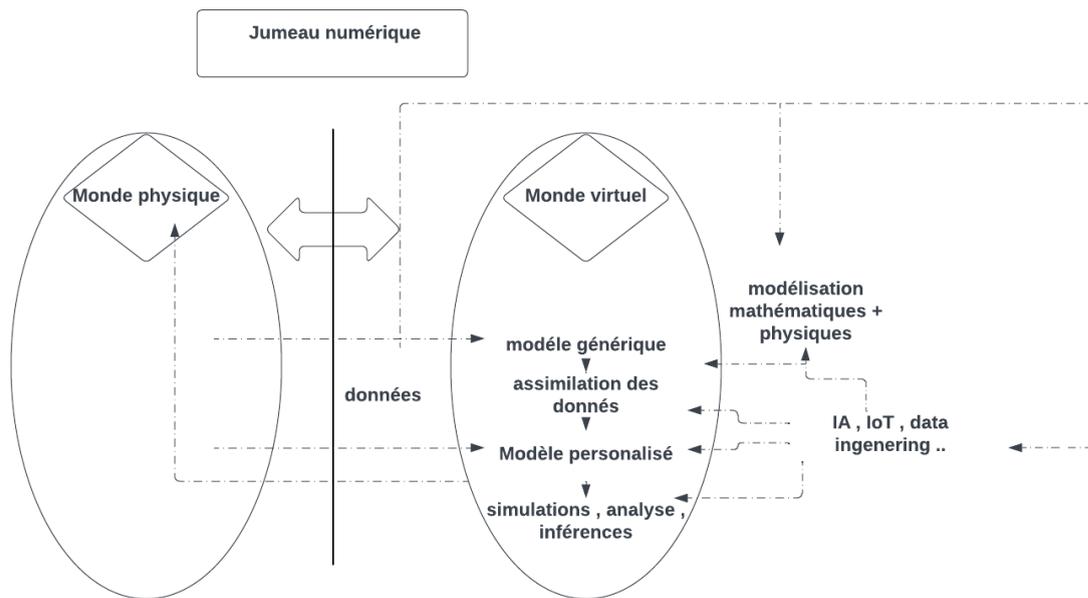


Figure 2 : Schéma architectural simplifié du jumeau numérique

Le jumeau numérique s'étend au-delà d'une simple copie ou d'imitation digitale, se manifestant en tant qu'entité virtuelle dynamique offrant un niveau de sophistication et d'interactivité élevé. Cela ouvre des horizons infinis pour la modélisation, l'optimisation, la prévention des dysfonctionnements, l'amélioration des performances, et la simulation de nouvelles possibilités, qui peuvent par la suite être concrétisées dans le monde physique (2). Plus précisément, le jumeau numérique fait référence à l'élaboration d'un modèle virtuel qui représente de manière fidèle le monde physique, conçu grâce à une complexe intrication de données algorithmiques basées sur les lois naturelles et les connaissances spécifiques au domaine concerné. Ce modèle générique est enrichi et actualisé par l'intégration de données collectées dans l'environnement physique au moyen de divers capteurs. Cette mise à jour permet au modèle de refléter avec une précision maximale la réalité physique, la pertinence de cette simulation étant directement liée au niveau de sophistication du modèle, à

l'étendue de la collecte de données et à leurs qualités. Ainsi, le modèle personnalisé devient un outil crucial pour l'analyse et la simulation de divers scénarios, aidant à la prise de décision. Suite à la mise en œuvre des décisions dans le monde réel, de nouvelles données sont recueillies afin de mettre à jour le modèle virtuel et ses simulations par l'assimilation des données à travers diverses méthodes impliquant l'ingénierie et l'intelligence artificielle. De plus, les jumeaux numériques peuvent être interconnectés pour former un système plus sophistiqué, permettant la conceptualisation d'un jumeau numérique de plus grande envergure et de fonctionnalités étendues (3).

1.2. Histoire

Déjà en 1991, David Gelernter envisageait, dans son ouvrage *Mirror Worlds: or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox... How It Will Happen and What It Will Mean*, une préfiguration du concept de jumeau numérique, bien que celui-ci n'ait pas été explicitement conceptualisé à l'époque. En 2002 à l'Université du Michigan, Michael Grieves envisageait une réplique virtuelle complète d'un système physique pour la gestion du cycle de vie des produits ; c'est un des premiers à introduire le modèle *Mirrored Spaces Model* comprenant un espace réel, un espace virtuel et un mécanisme de liaison pour l'échange de données entre les deux (4).

Le terme *Digital Twin* est apparu pour la première fois dans un document de la NASA (United States National Aeronautics and Space Administration) soulignant l'intérêt de créer des jumeaux numériques de vaisseaux spatiaux pour les tests à travers une simulation probabiliste multi-physique et multi-échelle d'un système pour refléter la vie de son jumeau physique (5). Certains auteurs attribuent l'origine du concept de jumeau numérique aux missions Apollo des années 1960, notamment Apollo 13, qui a inspiré le film homonyme. Pour ces missions, des simulateurs d'haute-fidélité au sol ont été employés pour l'entraînement des astronautes et la gestion de la mission. La mission Apollo 13, en particulier, a mis en évidence l'importance de ces simulateurs : après une explosion d'un réservoir d'oxygène le 11 avril 1970, qui a compromis l'atterrissage sur la Lune et mis en péril la vie de l'équipage, ces derniers ont dû s'appuyer sur des procédures improvisées et l'expertise de l'équipe au sol. Grâce à des simulations physiques qui reproduisaient les conditions de vol, des solutions ont été simulés et des décisions éclairées ont été prises, permettant le retour sécurisé de l'équipage le 17 avril 1970. Ces simulateurs (figure 3), bien que ne représentant pas des jumeaux numériques dans le sens moderne du terme, ont servi de prédécesseurs conceptuels,

démontrant le grand intérêt des simulations de conditions réelles dans la prise de décision (6).

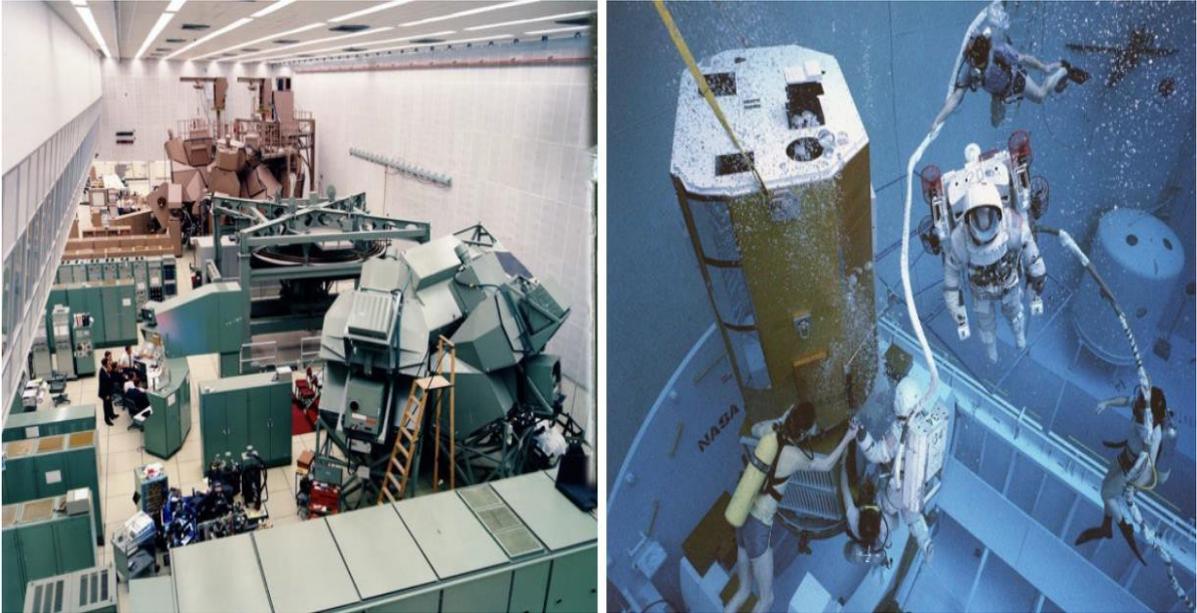


Figure 3 : Simulateurs pour les missions Apollo : un prédécesseur de la technologie du jumeau numérique. (Source : NASA) (7).

II. Applications transversales du jumeau numérique de planification

En tant que technologie transversale, les jumeaux numériques trouvent des applications variées dans de nombreux secteurs (2,8). Sans être exhaustif, dans le domaine aérospatial, ils aident à améliorer la conception des avions et des systèmes spatiaux, à effectuer des simulations de vol et à optimiser la maintenance des équipements (5). Dans la fabrication, ils sont utilisés pour simuler les processus de production, tester les équipements et optimiser les chaînes de production (9–11). Dans le secteur de l'énergie, les jumeaux numériques sont utilisés pour simuler et optimiser les opérations des centrales énergétiques, des réseaux électriques et des installations de production d'énergies renouvelables (12). Ils sont utilisés pour simuler et analyser la conception de bâtiments et d'infrastructures urbaines (8) ; il existe des jumeaux numériques de villes entières permettant une analyse et simulation multi-échelle permettant, par exemple, d'analyser et d'optimiser la consommation d'énergie, les transports, la simulation de catastrophes naturel et la planification de gestion d'une situation de crise (13,14).

Nous approfondirons l'analyse de l'application des jumeaux numériques pour la planification dans le secteur automobile, en raison de la simplicité relative de ces modèles et de leur niveau avancé de développement. Par ailleurs, nous examinerons l'utilisation des jumeaux numériques dans le domaine de la santé. Cette démarche nous fournira une base solide lorsque nous discuterons des perspectives.

2.1. Le jumeau numérique en ingénierie (exemple de l'industrie automobile)

Un exemple d'application pertinente dans le secteur automobile est la stratégie de développement vers une entreprise technologique déployée par Renault Group. Le projet d'ores et déjà opérationnel et en cours de développement par l'utilisation de la plateforme 3DEXperience de Dassault System via le cloud par tous les parties du projet de la conception en passant du management opérationnel à la fabrication, le schéma architectural (figure 4) sera décrit dans cette partie.

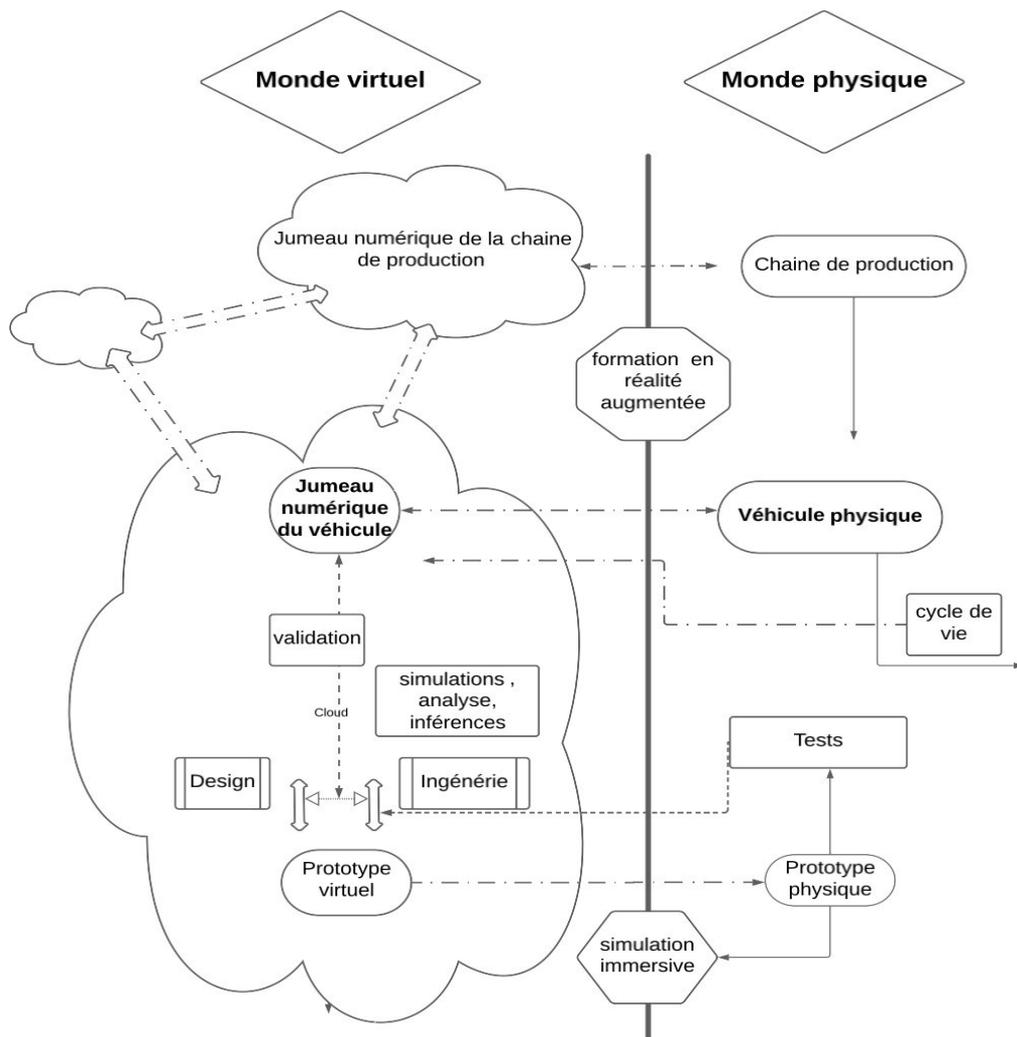
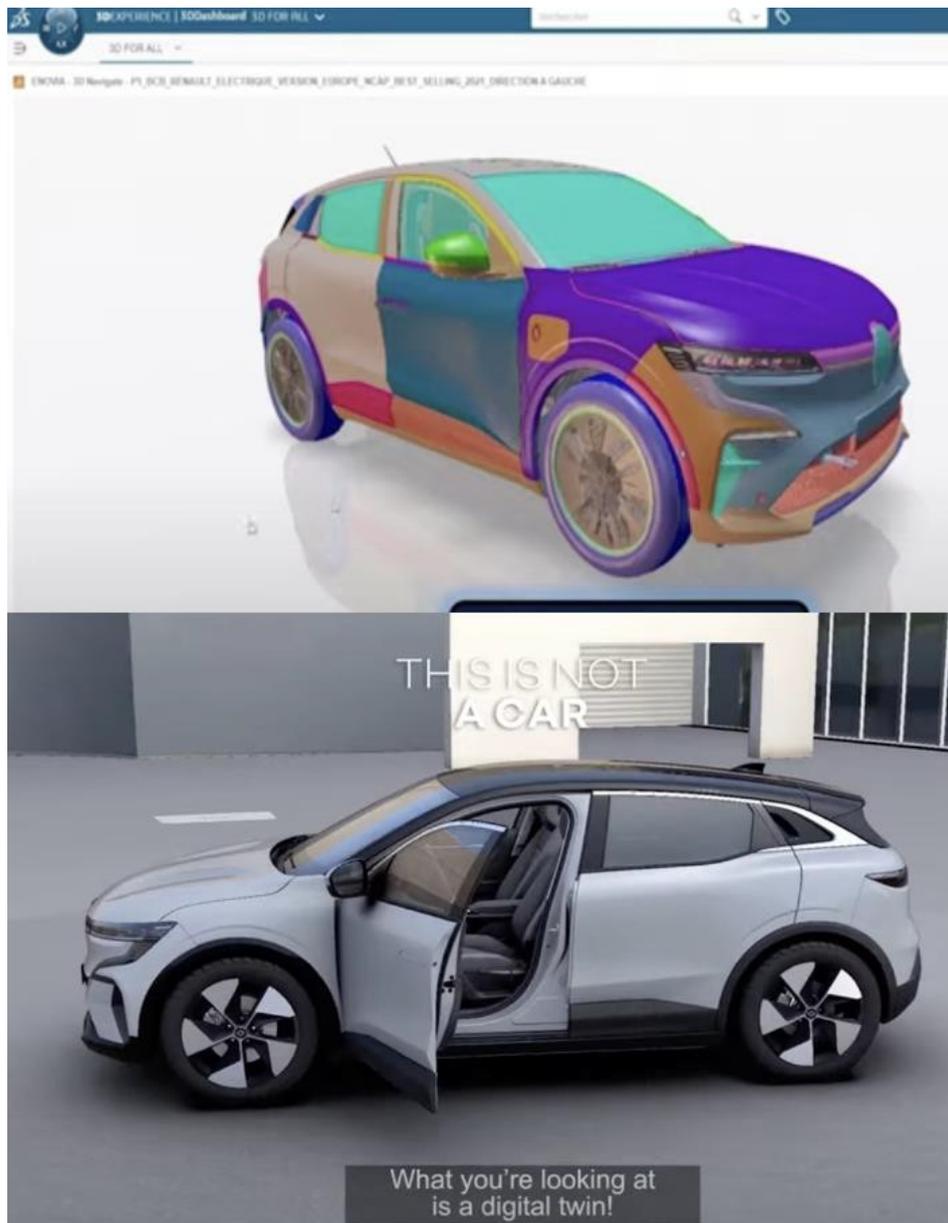


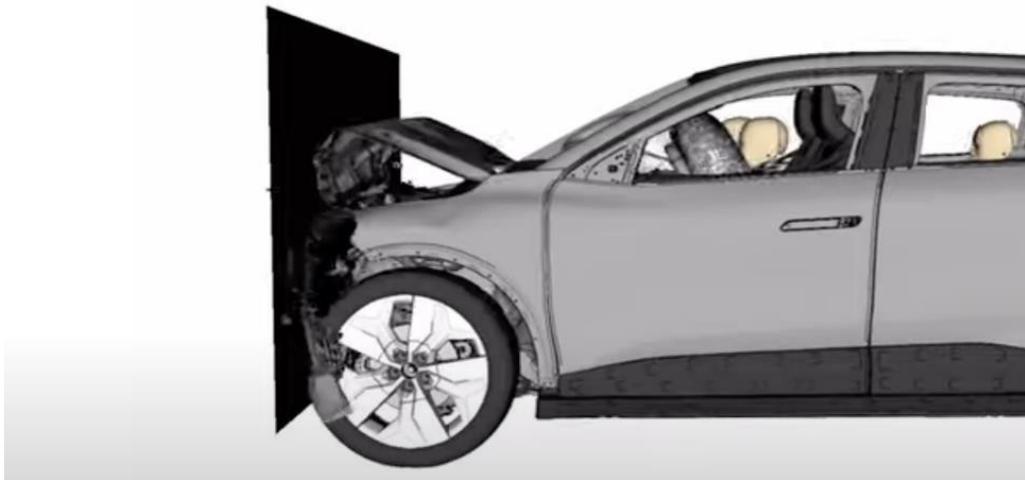
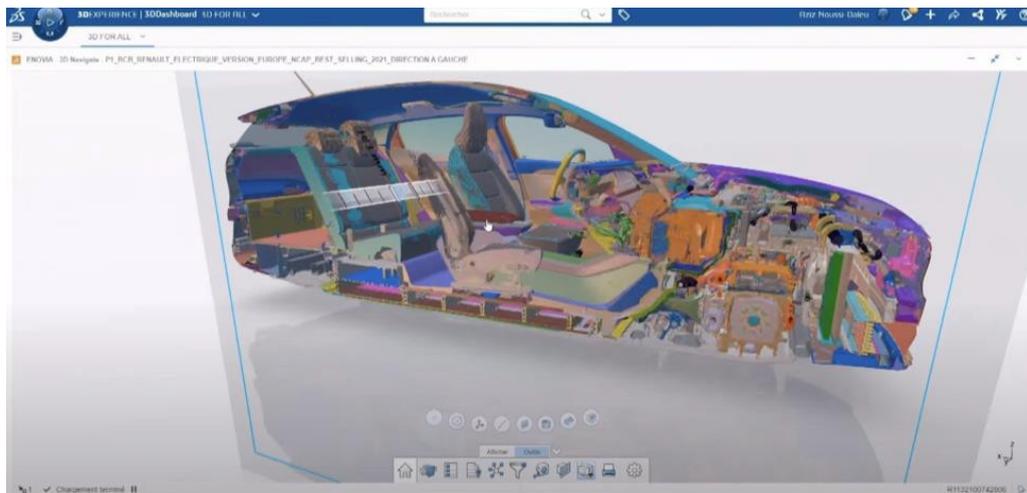
Figure 4 : Écosystème du jumeau numérique d'un véhicule chez Renault Group.

Lors de la création d'un véhicule, l'équipe en charge du design participe à l'élaboration initiale du jumeau numérique par la création d'un ou plusieurs mock up virtuel de l'extérieur et l'intérieur du véhicule (figure 5), en utilisant des outils de rendu numériques précis et ultraréalistes.



*Figure 5 : Conception du Mock up virtuel par l'équipe de designer.
(Source : Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE FORUM).*

L'équipe du Design transmet ensuite les propositions sous formes de données numériques via le cloud à celle de l'ingénierie qui vont s'occuper de la conception technique du véhicule, construisant un modèle 3D complet pièce par pièce, le tout virtuellement (figure 6). Durant cette étape, les ingénieurs utilisent une copie 3D de l'ensemble du jumeau numérique afin de conduire une série de simulations examinant des paramètres tels que l'aérodynamique externe, la performance motrice, l'optimisation des équipements et la fonctionnalité des systèmes de climatisation, complétées par l'exposition des modèles numériques à des essais de collision virtuels, des simulations de conduite sur des voies virtuelles, ainsi que des analyses dans des tunnels aérodynamiques virtuels, entre autres évaluations (15,16).



*Figure 6 : Phase d'ingénierie et test.
(Source : Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE FORUM).*

Une fois cette phase terminée les informations du jumeau numérique sont utilisées pour des tests de simulation plus avancé (17). On parle de simulation massive où des millions de scénarios sont testé via une infrastructure HPC qui permet d'avoir une analyse poussée permettant une boucle entre ajustement de l'architecture du jumeau numérique et nouveaux tests jusqu'à la validation (figure 7). Pour prendre en compte l'aspect subjectif de l'expérience de conduite des test en réalité virtuelle et augmentée sont réalisés par la suite.

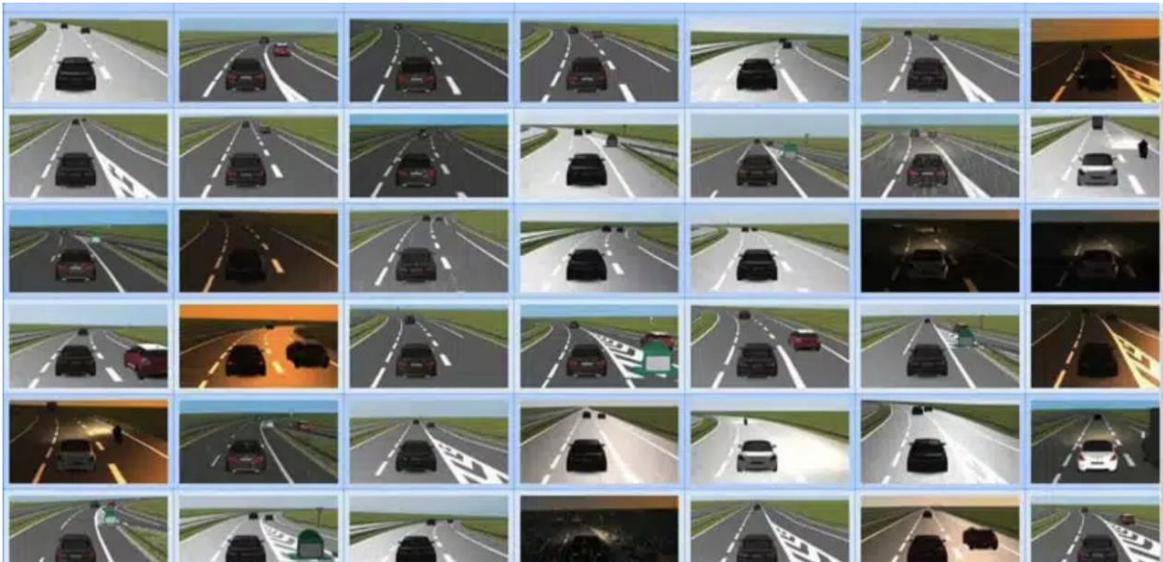


Figure 7 : Simulation massive (Source : AVSIMULATION).

Une fois cette validation acquise, le prototype est construit, il subira des tests de simulation via une plateforme de simulation (figure 8), pouvant simuler avec précision et exactitude différents scénarios de conduite permettant l'analyse du comportement du véhicule. Le prototype effectuera enfin des tests sur des pistes d'essais en centre technique.



Figure 8 : Plateforme de simulation « ROADS». (Source : Renault group).

Les différentes phases de simulation digitale ont permis de diminuer considérablement le temps de validation du prototype physique et leur nombre. Enfin la production du véhicule pouvant être lancée, les fournisseurs vont utiliser le clone virtuel de chaque pièce pour fabriquer la pièce physique, tandis

que l'usine s'appuie sur le double numérique complet pour concevoir de manière virtuelle la chaîne de montage à venir et configurer ses machines-outils, établissant ainsi le jumeau numérique (JN) de l'installation industrielle. En plus de la capacité d'analyse, de maintenance prédictive et d'aide à la décision que le JN de l'usine va fournir, les opérateurs pourront être formés aux différents processus en réalité virtuelle et en réalité augmentée. Une fois le véhicule mis en circulation ses données vont continuer à être collectées afin de mettre à jour son Jumeau numérique cela permettra non seulement la maintenance effective et prédictive mais aussi d'alimenter la base de données qui sert de base aux algorithmes décisionnels dans le développement des futurs véhicules.

Cet exemple de jumeau numérique est tout à fait intéressant à mettre en perspective avec les applications actuelles du jumeau numérique en médecine bucco-dentaire : le design, l'ingénierie, et le mock up (maquette) sont des éléments clés. Ces derniers permettent d'explorer différents niveaux de simulation allant du tout numérique à la réalité virtuelle et augmentée. La fabrication d'un prototype provisoire, les tests effectués sur celui-ci avant la validation et fabrication de la pièce finale, ainsi que le suivi de l'évolution de cette pièce finale dans le temps, sont des éléments de ce processus qu'il convient de mettre en relief. Mais aussi le logiciel utilisé en SaaS se présentant sous forme d'une plateforme sécurisée collaborative sur le cloud (cela diminue généralement les exigences de configuration matérielle sur l'appareil de l'utilisateur, le traitement lourd et le stockage des données étant gérés par des serveurs distants) et la possibilité d'ajouter un ensemble d'outils sous forme d'API. Ce modèle présente une robustesse, une agilité très intéressante.

2.2. Le jumeau numérique en santé

Le domaine de la santé exploite de plus en plus les avancées technologiques pour optimiser la prise en charge des patients. Parmi ces innovations, la création du jumeau numérique humain mobilise des efforts considérables. Ce modèle virtuel permettrait d'améliorer la compréhension, la simulation et la prédiction des processus physiologiques. Il ouvrirait ainsi la voie à des diagnostics et traitements plus précis, favorisant une personnalisation des soins à l'échelle individuelle et collective. Par ailleurs, il pourrait accélérer la recherche médicale et le développement de nouveaux traitements, notamment en remplaçant les groupes de contrôle traditionnels par des jumeaux numériques dans les essais cliniques. À terme, des essais *in silico*, menés au-delà de la phase préclinique sur des modèles suffisamment robustes, pourraient réduire le recours aux essais *in vivo*, un enjeu particulièrement crucial pour les

maladies rares (18,19). L'exemple décrit par Björnsson et al. (figure 9) illustre bien le concept général :

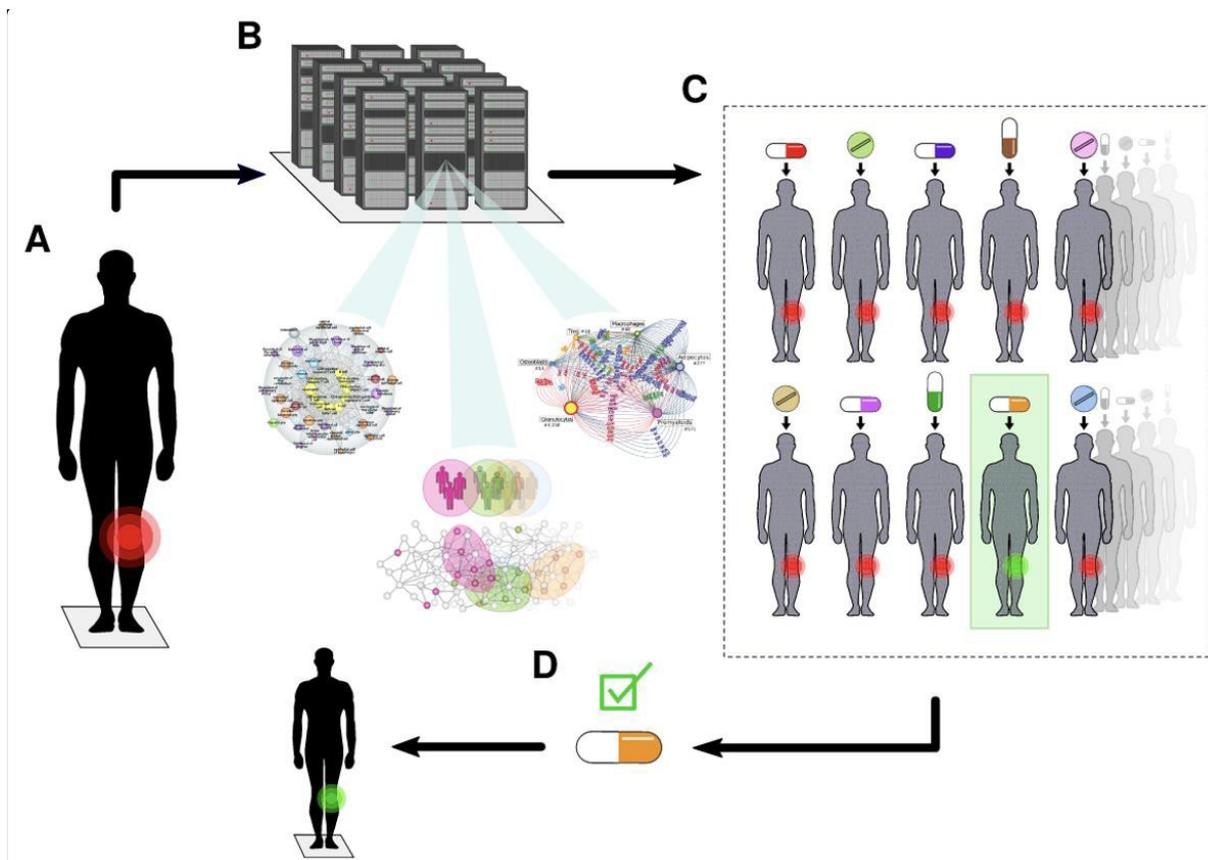


Figure 9: The digital twin concept to personalized medicine (Source : Björnsson et al. genome medicine) (A) Un patient présentant un signe local de la maladie (rouge). B) Un jumeau numérique du patient est construit en copies illimitées, basé sur l'intégration informatique haute performance de milliers de variables pertinentes pour la maladie. C) Chaque jumeau est traité informatiquement avec un ou plusieurs médicaments parmi des milliers. Cela résulte par une guérison numérique d'un patient (vert). D) Le médicament ayant le meilleur effet sur le jumeau est sélectionné pour le traitement du patient).

Actuellement, des jumeaux numériques visant à répliquer des fonctions spécifiques d'organes majeurs ou de systèmes physiologiques sont développés. (20). Ces jumeaux numériques plus ou moins sophistiqués offrent d'ores et déjà des applications cliniques ; à l'image de la plateforme « FEops HEARTguide » qui offre aux chirurgiens cardiaques des outils précis pour la planification préopératoire de diverses interventions cardiaques (21). Des images médicales du patient (tomodensitométrie) par le biais d'analyses anatomiques assistées par intelligence artificielle permettent de générer un jumeau numérique sur lequel il est possible de simuler différentes stratégies thérapeutiques, aidant ainsi à anticiper les résultats potentiels et à choisir l'approche la plus adaptée.

Ceci aboutit à une amélioration de l'efficacité procédurale et à une tendance vers de meilleurs résultats (22).

Cette technologie s'intègre également dans l'enseignement médical, offrant aux étudiants la possibilité de s'exercer sur des cas cliniques virtuels avant de pratiquer sur des patients vivants. En parallèle, les jumeaux numériques trouvent une application structurale dans la modélisation des services de santé eux-mêmes (23,24), facilitant ainsi l'optimisation des flux de travail, la gestion des ressources et l'amélioration de la qualité des soins. Cette dimension structurelle, tout aussi cruciale, permet une réorganisation plus efficace et une allocation optimisée des ressources au sein des établissements de santé, contribuant ainsi à l'évolution vers des systèmes de santé plus résilients et adaptatifs.

Le processus d'élaboration et d'intégration des jumeaux numériques, tant au niveau organique que structurel n'en est qu'à ses débuts malgré les avancées notables déjà réalisés. Il est intéressant de relever que la stratégie adoptée pour les applications cliniques est la modélisation de jumeau numérique générique très sophistiqué répondant à une moyenne statistique et aux connaissances actuels que l'on va personnaliser non pas sur l'ensemble des paramètres du patient mais sur certains paramètres clés et suffisants pour la simulation, l'enjeu est de bien identifier ses paramètres et d'avoir conscience du niveau de précision des modèles.

III. Le jumeau numérique dans la planification en odontologie prothétique

Lorsque l'on parle de jumeau numérique en odontologie, il faut s'intéresser aux différentes données d'entrée permettant d'intégrer le patient dans le monde virtuel et d'articuler toutes ses données entre elles. Nous allons dans un premier temps replacer le contexte en rappelant synthétiquement les grandes étapes de la planification prothétique, puis énumérer l'ensemble des outils à notre disposition afin d'acquérir des données d'entrée et voir comment elles sont articulées entre elles et utilisées dans la planification prothétique.

3.1. La planification prothétique

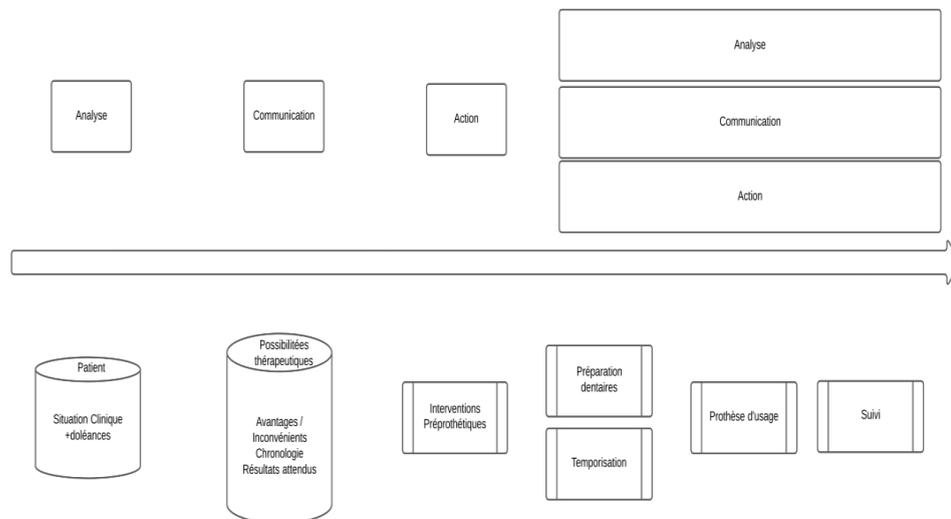


Figure 10 : Étapes chronologiques de la planification prothétique

La planification prothétique peut globalement se décomposer en plusieurs étapes (figure 10). Dans un premier temps, le chirurgien-dentiste analyse la situation clinique en tenant compte des doléances du patient. Il présente ensuite, de manière compréhensible, les différentes possibilités thérapeutiques en précisant la chronologie, le résultat attendu ainsi que les avantages, inconvénients et bénéfices/risques associés à chaque option. Cette démarche permet d'obtenir le consentement éclairé du patient et de définir des objectifs clairs, afin de mettre en place un plan d'action. Les grandes étapes de ce plan incluent généralement les interventions pré-prothétiques, les préparations dentaires et la temporisation, la mise en place des prothèses d'usage et le suivi. Les étapes d'analyse et de communication préliminaires sont cruciales avant la moindre intervention qui peut être irréversible, le chirurgien dentiste suivra un processus d'analyse/communication/action tout au long de la thérapeutique. Il ne s'agit pas là d'un processus standardisé et figé. Au contraire la planification prothétique peut être vue comme un exercice intellectuel dynamique et personnalisé au patient. Ce ne sont que les grandes lignes directrices ; chacune des étapes peut être plus ou moins complexifiée ou simplifiée par le chirurgien-dentiste en fonction du besoin du cas clinique et de son expertise. Nous nous concentrons ici sur la planification prothétique, qui s'intègre au schéma thérapeutique global du patient. Elle représente l'une des approches possibles pour sa réhabilitation, en fonction de ses besoins spécifiques. Cette démarche prend en compte l'état parodontal, l'hygiène bucco-dentaire et la capacité du patient à entretenir la prothèse, afin d'assurer la viabilité du projet. Par ailleurs, une prise en charge pluridisciplinaire dès les

phases initiales d'analyse et de communication est essentielle pour garantir la cohérence et l'efficacité du traitement. Nous verrons que l'utilisation du jumeau numérique s'intègre parfaitement dans ce schéma.

3.2. Données d'entrée pour la création d'un jumeau numérique

Avant toute chose, il convient d'acquérir des informations (données d'entrée) puis de les interconnecter. Plus ces données sont nombreuses, plus le jumeau numérique qui en découle sera sophistiqué et personnalisé, en adéquation avec les besoins réels de la situation clinique. Pour obtenir ces données, on utilise des outils métrologiques (hardware) capables de transmettre des informations à un logiciel d'exploitation (software). Ce dernier permettra d'analyser et de traiter ces informations afin de constituer le jumeau numérique. Avec les progrès actuels, ces outils métrologiques et programmes d'exploitation sont de plus en plus précis et performants. Leurs interfaces, conçues pour être ergonomiques, facilitent la compréhension, la communication et la planification pour le professionnel de santé et son équipe (de l'analyse clinique au plan de traitement, jusqu'à la fabrication des pièces prothétiques). Cette démarche numérique a été initiée en premier lieu avec l'apparition des empreintes optiques et l'évolution des biomatériaux pouvant être usinés ou imprimés par des machines-outils de plus en plus performantes. À ses débuts, on parlait surtout de CFAO dentaire (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur). Aujourd'hui, le numérique offre bien plus qu'une simple conception et fabrication ; on parle alors de flux numérique (digital workflow), qui couvre un plus grand nombre d'étapes, de l'acquisition des données jusqu'au suivi clinique. Les outils métrologiques et la façon dont ces données sont exploitées font l'objet des prochains paragraphes.

3.2.1. Empreinte optique

L'empreinte optique a été introduite dans les années 1970 par le Professeur François Duret lors de sa thèse éponyme, dans laquelle il posait déjà les bases de la CFAO en dentisterie chirurgie dentaire et plus encore (25). Elle constitue la porte d'entrée dans le flux numérique. Concrètement, l'empreinte optique permet de numériser des éléments clés de la cavité buccale, notamment :

- les arcades dentaires,
- une partie des tissus mous,
- les rapports entre les arcades (en général l'enregistrement d'un rapport statique en position d'intercuspidie maximale (OIM), même si certaines marques proposent l'enregistrements des mouvements. Nous verrons en suivant qu'il y a des outils dédiés qui seront soumis à moins de bruits).

Cela aboutit à une représentation surfacique en trois dimensions. Cette empreinte optique peut être obtenue par le biais de deux types de hardware : les caméras d'empreintes optiques intraorales ou scanner intra-oral et les scanners de bureau.

3.2.1.1. Scanner de bureau

Le scanner de bureau également appelé scanner 3D dentaire de laboratoire est un appareil permettant de numériser des objets dentaires en dehors de la cavité buccale. Il trouve son utilité dans la numérisation de modèles issus d'empreintes analogiques, certains modèles plus avancés peuvent également numériser des empreintes non coulées, générant directement un modèle numérique, en réalisant une sorte de "coulée numérique de l'empreinte". Certains scanners de bureau permettent de numériser des modèles placés sur articulateur facilitant le transfert de données sur logiciel de Conception assistée par ordinateur (CAO) pour la fabrication de prothèses dentaires. Généralement, ce sont principalement les laboratoires dentaires qui en sont équipés, mais certains dentistes également.

De plus, le scanner de bureau est souvent considéré comme plus fiable qu'une caméra d'empreinte optique. En effet, contrairement à la caméra d'empreinte optique, qui reconstitue un modèle à partir de plusieurs prises successives (ce qui entraîne des erreurs cumulées), le scanner de bureau capte l'ensemble de l'élément à scanner à la fois, minimisant ainsi les risques de déformation. Cette caractéristique est particulièrement bénéfique lorsqu'il s'agit de numériser des arcades complètes ou des surfaces lisses édentées sur une grande portée, qui peuvent poser problème à une caméra d'empreinte optique en raison des erreurs d'assemblage des différentes captures successives. Ainsi dans certaines études, les scanners de bureau sont utilisés comme

référence pour évaluer la précision des caméras d’empreinte optique (figure 11).

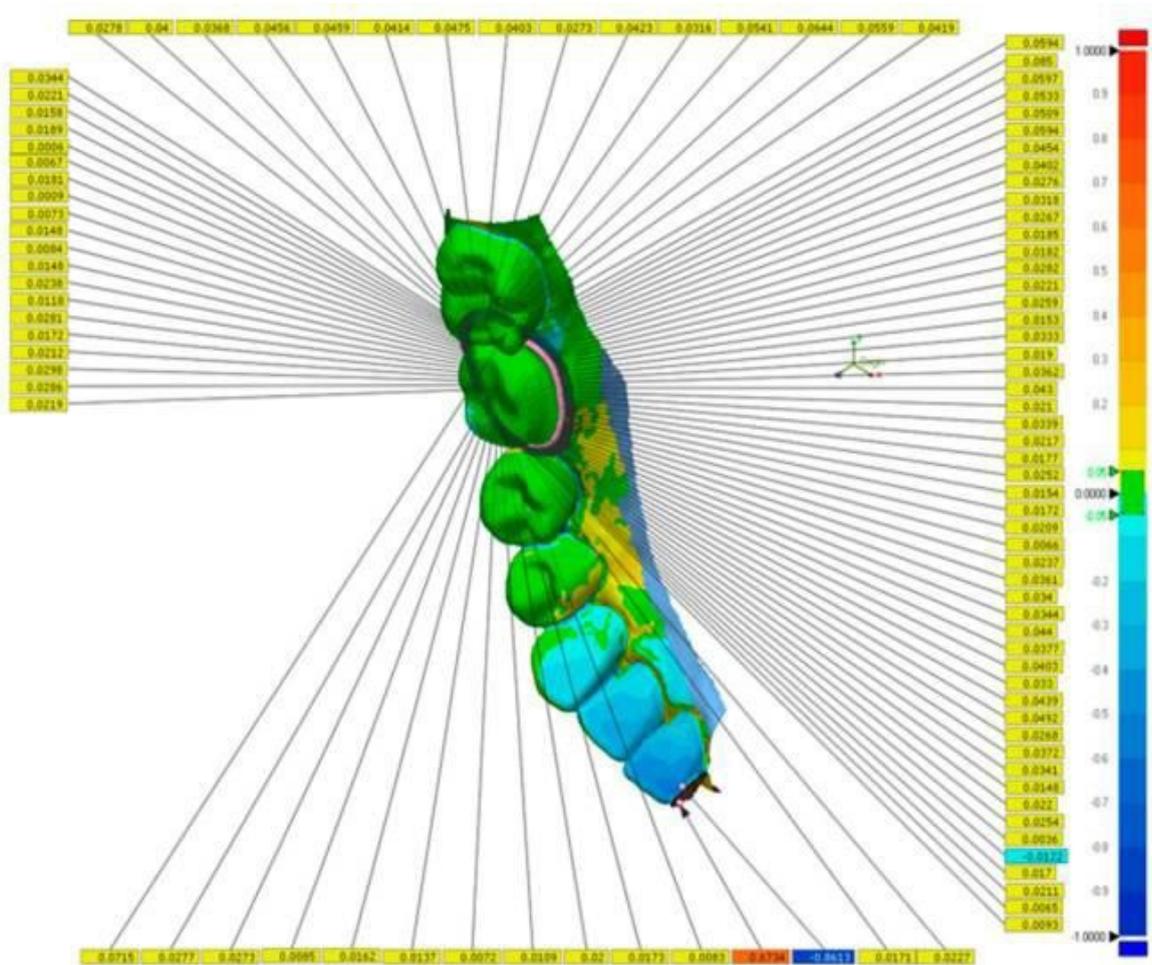


Figure 11 : Écart mesuré entre scanner de référence et scan intra-oral sur 100 points de la ligne de finition, avec une échelle couleur (-1 mm à +1 mm) et légendes jaunes pour les valeurs spécifiques (26).

Le scanner de bureau fonctionne grâce à la lumière structurée et à des caméras numériques (figure 12). Il projette des motifs lumineux sur l’objet à numériser, puis analyse la façon dont ces motifs se déforment. Les données ainsi recueillies permettent de déterminer la taille, la forme et la texture de l’objet, aboutissant à la création d’un modèle numérique 3D. Certains scanners utilisent une ligne laser au lieu de la lumière structurée, mais le principe reste le même. Par ailleurs, la multiplicité des caméras et la présence d’un plateau rotatif garantissent une numérisation complète de l’objet sous tous les angles. Les scanners de bureau disponibles sur le marché possèdent des caractéristiques techniques variées avec plusieurs options. Les différences résident principalement sur la qualité des composants, le type de source lumineuse

utilisée (laser ou lumière structurée), le nombre d'axes de mouvement du plateau de numérisation et les fonctionnalités logicielles associées.

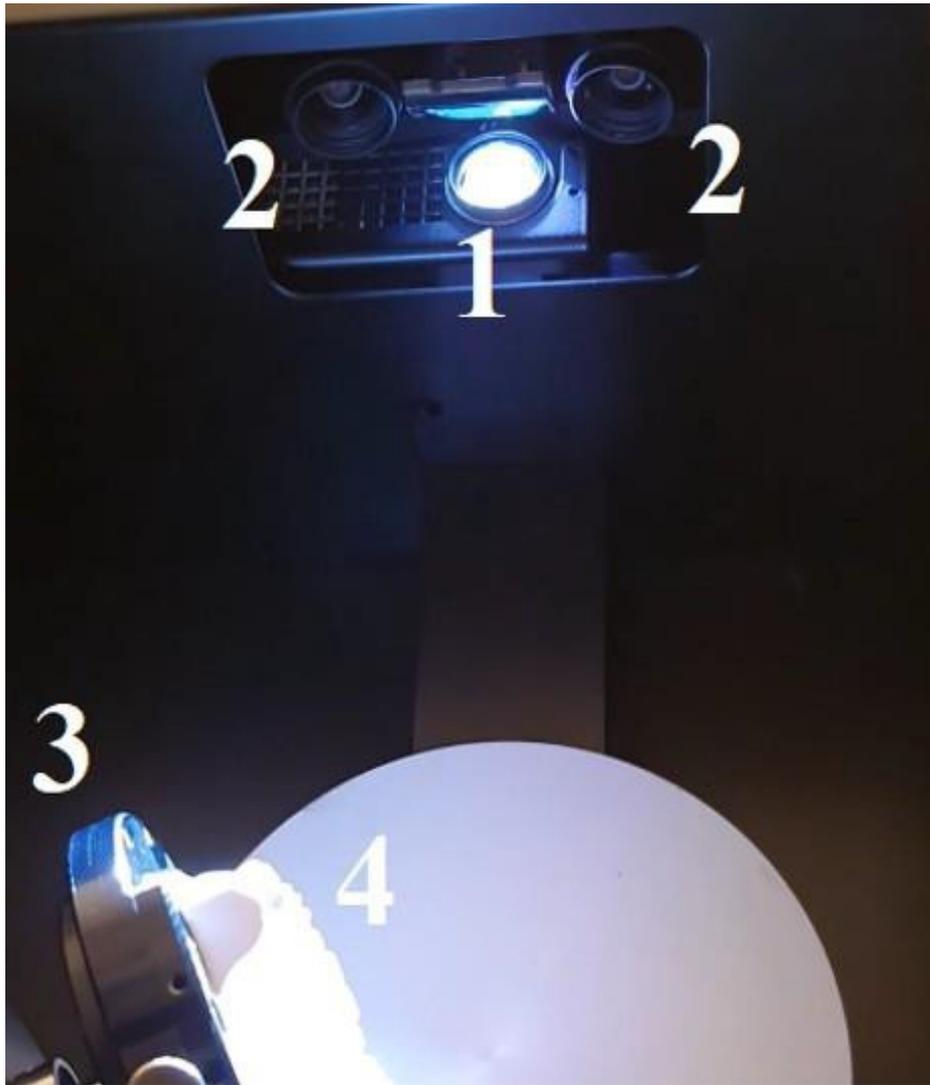


Figure 12 : Exemple de scanner de bureau en cours de numérisation 1 source lumineuse. 2 Double caméras permettant la triangulation. 3 Plateau de fixation et de numérisation. 4 modèle en plâtre en cours de numérisation (27).

3.2.1.2. Camera d’empreinte optique intra-orale ou scanner intraoral (IOS)

La caméra d’empreinte optique intra-orale, ou scanner intraoral (IOS), est un dispositif médical permettant de relever une empreinte optique directement au fauteuil, sans recourir à l’empreinte analogique traditionnelle. Elles sont aujourd’hui de véritables bijoux technologiques, et l’offre, très diversifiée, continue de s’élargir sur un marché en pleine expansion. Elles constituent une pièce maîtresse de l’intégration du flux numérique dans la prise en charge du patient. Pour en tirer le meilleur parti, il est essentiel de bien comprendre leur fonctionnement intrinsèque, leur ergonomie, ainsi que les possibilités offertes par le logiciel d’exploitation.

On peut schématiser le fonctionnement en trois grandes étapes, sachant qu'il existe diverses technologies et modèles dans ce secteur en plein essor (ce qui ne constitue pas l'objet de cette thèse) :

- projection de lumière (une lumière est projetée sur la dent),
- détermination des distances (la lumière réfléchie est reçue par les capteurs, permettant d'évaluer la distance entre chaque point de la surface scannée et le scanner),
- reconstruction numérique (figure 13) (les points collectés forment un nuage de points, ensuite convertis en surface continue via un maillage triangulaire (fichier STL).

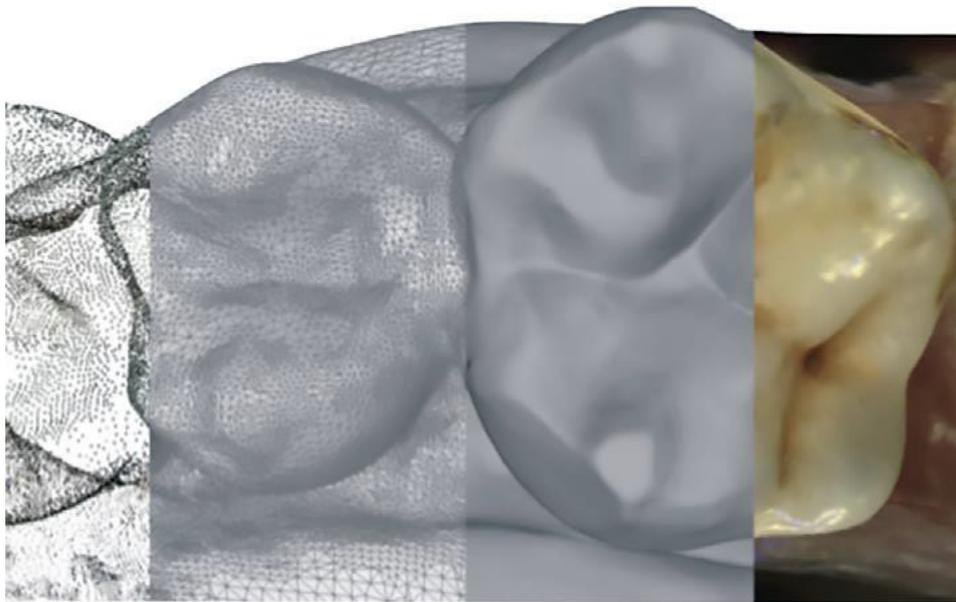


Figure 13 : Chronologie de reconstruction : nuage de points, maillage, texture, couleur (28).

Suite à l'acquisition, on obtient donc un modèle surfacique en 3 dimensions avec différents niveaux de précision et de détail. On va pouvoir manipuler ce modèle dans toutes les directions, visualiser chaque arcade séparément et avoir différents modes de vue (figure 14). On pourra utiliser ces informations pour l'analyse et les transférer sur un logiciel de conception où elles vont servir de base pour la fabrication de la prothèse.

Les informations recueillis par l'empreinte optique ne sont pas suffisantes dans bon nombre de cas, elles constituent une base de travail avec laquelle il faudra faire converger d'autres informations, en effet ces modèles numériques peuvent être assimilés à un simple occluseur rigide. Il ne reproduit donc qu'une position statique. Nous pouvons nous limiter à ses informations que dans le cas de restaurations prothétiques à la dimension vertical d'occlusion

du patient de petite étendue ne participant pas comme surface de guidage des mouvements mandibulaires (ex : quelques éléments postérieures en présence d'un guidage canin efficace) (29). En d'autres termes, à partir du moment où une surface occlusale est remplacée ou bien une modification de la dimension verticale a lieu, dans tous les cas où, en méthode classique on devrait avoir recourt à un articulateur, l'utilisation des seule informations issus de l'empreinte optique est à proscrire. Cela constitue une limite de la CFAO directe classique avec des systèmes où le praticien prend directement une empreinte en bouche, puis conçoit la prothèse avec un logiciel ergonomique, se basant seulement sur ces informations pour générer une forme adaptée à cette occlusion statique et envoyer les informations à la machine-outil pour la fabrication.

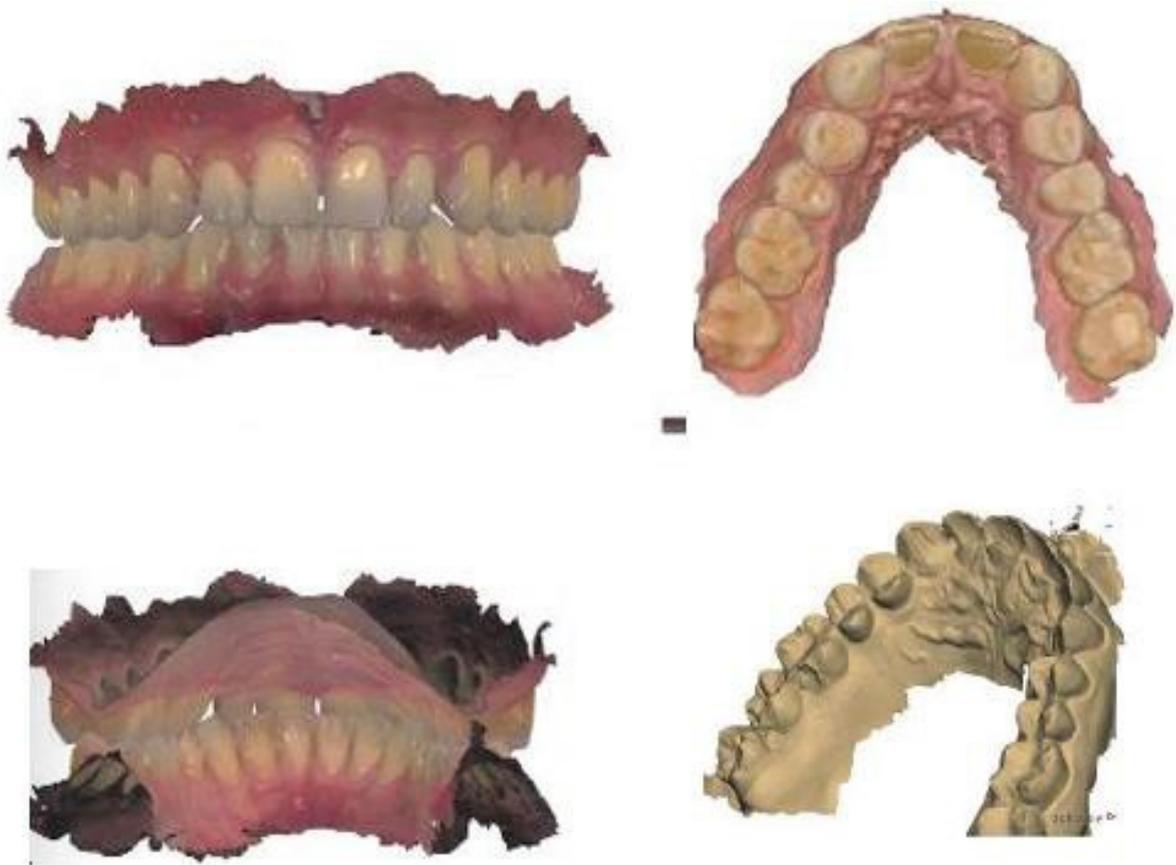


Figure 14 : Manipulation d'une empreinte numérique (30).

Il est également important de comprendre sous quel format et sous quelle forme les fichiers seront stockés et transmis au prothésiste. Il existe des formats ouverts et des formats fermés. Dans un format fermé, le prothésiste doit disposer de la même licence logicielle que celle utilisée par le praticien, ce qui limite les possibilités d'exploitation et de traitement des données à travers d'autres logiciels. Le principal avantage de ce système réside dans le fait que le prothésiste reçoit exactement le même fichier que celui visible à l'écran du

praticien, avec par exemple la possibilité d'annoter la limite de préparation. Dans un format ouvert, le prothésiste peut choisir librement son logiciel de conception. Face à la demande grandissante et à la démocratisation du flux numérique, la plupart des fabricants et des logiciels dédiés à la prise d'empreinte optique proposent désormais l'export vers un format ouvert. Les plus courants sont « STL., OBJ. et PLY. » (31).

Le format STL. est le format universel des fichiers 3D (figure 15). Le fichier est moins lourd et donc rapide à exporter et manipuler, mais se présente sous un aspect monochrome pouvant donner des difficultés au prothésiste à discerner les limites de préparation et la gencive de la dent. Contrairement au format PLY. et OBJ., où l'on aura plus d'information sur la couleur et la texture (figure 16). Les fichiers OBJ. peuvent théoriquement avoir un plus grand niveau de détail que les fichiers PLY. mais à leur niveau d'exploitation aujourd'hui il est difficile de différencier les deux.

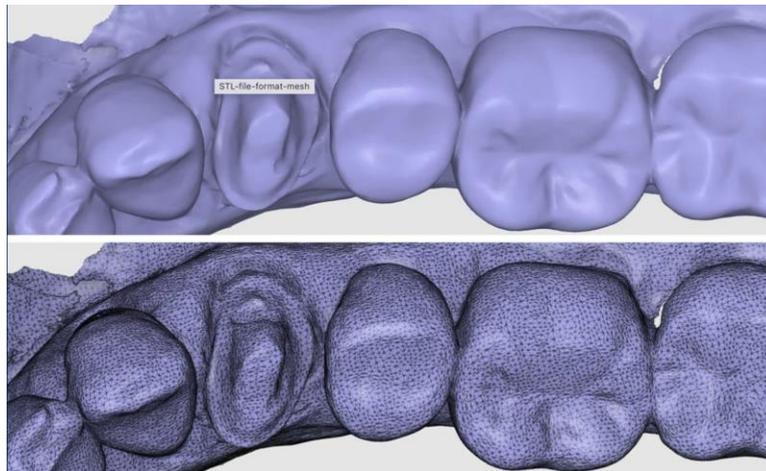


Figure 15 : Fichier STL. (31).

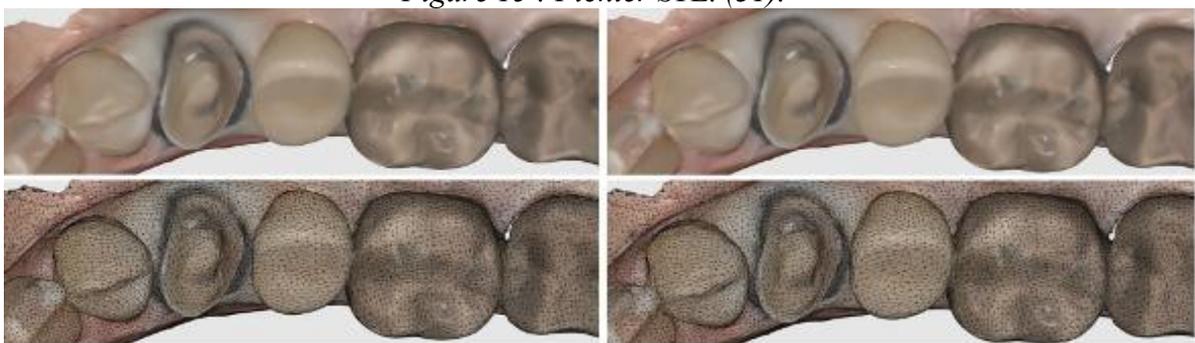


Figure 16 : Fichier au format PLY. à gauche et OBJ. à droite (31).

Les caméras d'empreinte optique peuvent se présenter sous différentes formes et ergonomies (figure 17-18) :

- Systèmes compacts : la caméra est reliée à un moniteur intégrant le logiciel d'exploitation.

- Caméras seules : la caméra est connectée à un ordinateur classique suffisamment puissant pour faire fonctionner le logiciel.
De plus, il existe des modèles filaires et d'autres sans fil (fonctionnant sur batterie). Enfin, la taille, le poids, la forme et les performances varient d'un appareil à l'autre. À l'image de l'évolution des téléphones cellulaires vers les smartphones, l'usage des caméras optiques ne cesse de progresser vers plus d'ergonomie, de précision et d'intégration avec d'autres éléments numériques.

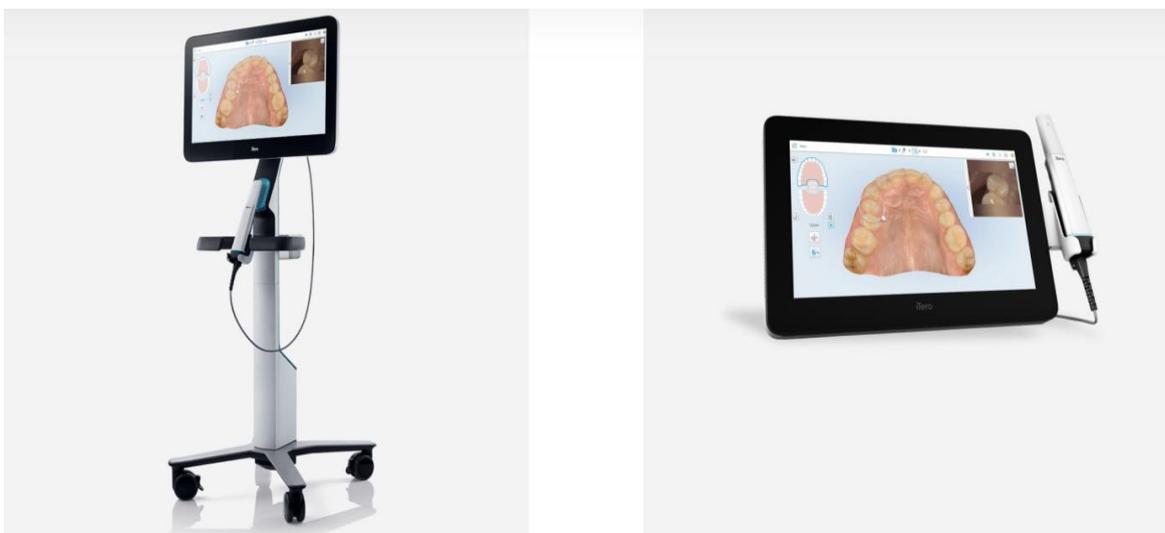


Figure 17 : Exemple de système compact iTero LuminaTM en version chariot et mobile.
(Source : iTero).

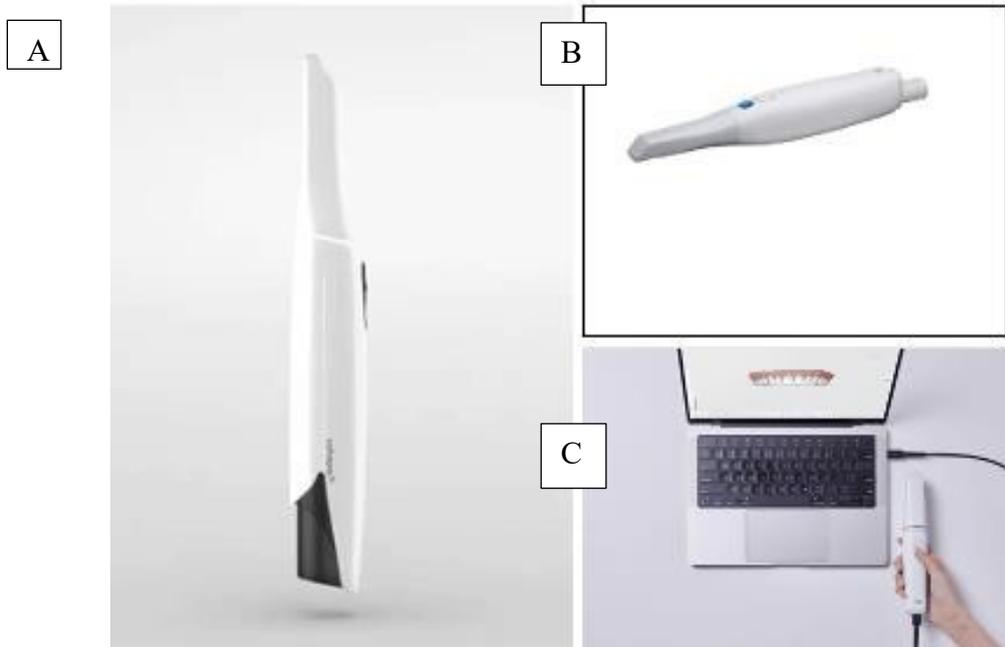


Figure 18 : Exemple de caméras seules (A) 3shape trios 5 sans fil (B) Medit i700w sans fil
(C)Medit i900 filaire. (Source :Medit et 3shape).

Elles fonctionnent généralement via un système d'exploitation relié au cloud ce qui permet de bénéficier d'une puissance et d'un stockage de données plus optimale, les interfaces peuvent être mise à jour, personnalisées et les

étapes de numérisation sont de plus en plus simples avec un usage très ergonomique et un accompagnement de l'utilisateur dans les différentes étapes. La courbe d'apprentissage est résolument plus simple que sur les premières générations, même si, comme tout outil il faut se former pour pouvoir l'intégrer dans son exercice clinique et comprendre son fonctionnement et ses limitations. Contrairement à une empreinte analogique classique où les sources d'erreur sont nombreuses mais visibles, il est possible d'avoir une belle empreinte optique avec des erreurs du fait de l'algorithme du logiciel qui va lisser les imperfections et créer un modèle moyen à partir de toutes les informations qu'il a acquises. L'utilisation de la caméra optique peut se faire à différents moments et pourra s'adapter à notre stratégie thérapeutique.

Entre autres exemples il est possible aujourd'hui de scanner une partie des structures péribuccales à l'aide de la caméra optique afin de pouvoir combiner plus facilement et précisément notre empreinte avec un scanner facial du patient, ou même le CBCT (cone beam computed tomography) converti en STL., ou même les trois. Cette combinaison peut généralement se faire directement via l'interface utilisateur (figure 19) (32). Par ailleurs, chez Medit et 3Shape on a la possibilité de comparer les empreintes prises à différents intervalles de temps et par une échelle de couleur mettre en évidence les différences constatés (figure 20), cela étant particulièrement utile dans la mise en évidence des facettes d'usure (33), l'éducation comportementale du patient et la justification de prescription de gouttières. La prise d'empreinte va également pouvoir être réalisée de façon partielle en conservant les données d'une empreinte précédente, ceci permet de mettre en place de nouvelles stratégies pour capter les informations de la situation clinique. Il ne s'agit pas de faire ce qui était possible avec les empreintes conventionnelles mais de s'approprié cet outil et élaborer des stratégies de flux de travail en conséquence. On va pouvoir également faire prévisualiser un set up orthodontique à partir de certaines applications de logiciel d'exploitation des caméras et se servir de celui-ci pour faire un mock up virtuel (maquette virtuelle) et ainsi proposer un visuel du résultat attendu au patient sur un traitement long terme.

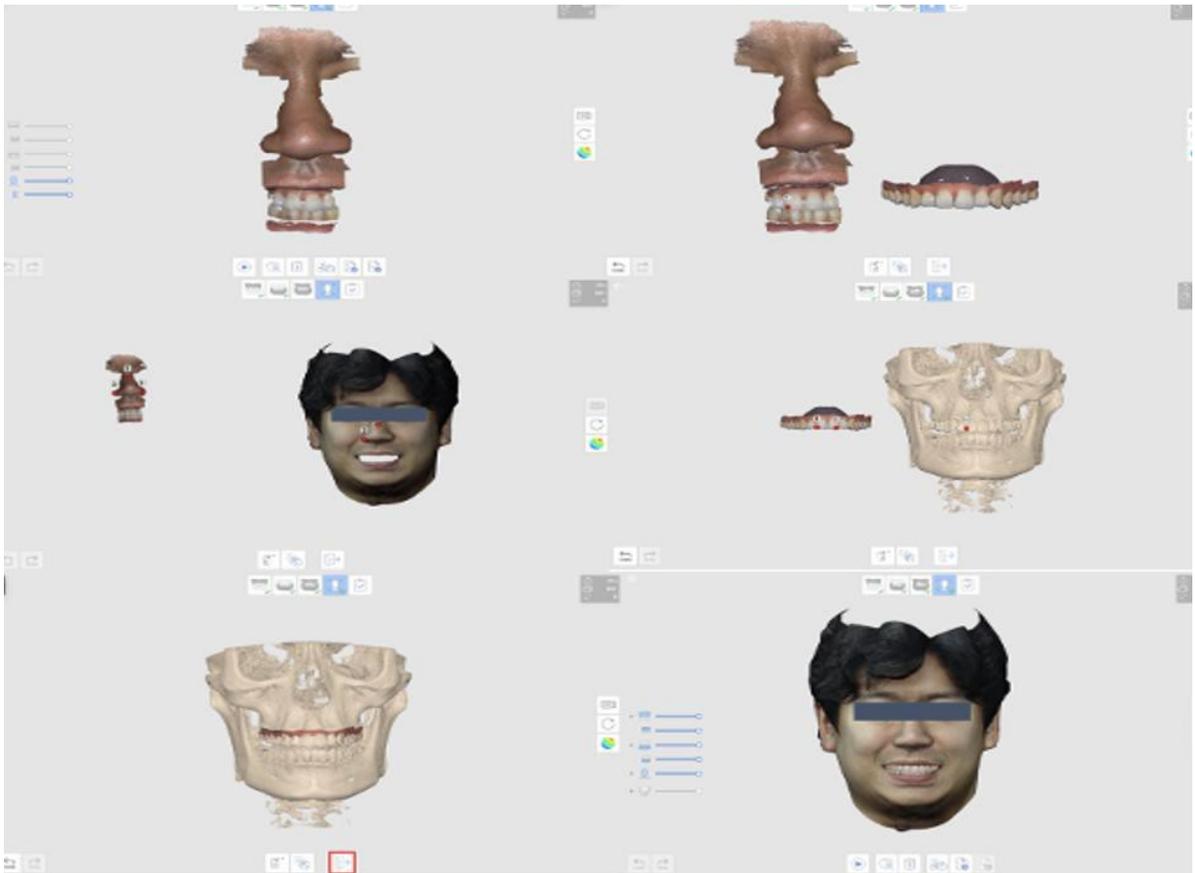


Figure 19 : Exemple de possibilités d'assemblage et de création d'un jumeau numérique du patient. (Source : Medit help center).



Figure 20: Exemple de comparaison de scans à l'aide du logiciel 3Shape patient Monitoring (34).

3.2.2. Photographie en deux dimensions (2D)

L'acquisition de photographies du patient fait partie de notre panel de données d'entrée pour la création d'un jumeau numérique. Ces clichés à travers un logiciel de traitement d'images spécifique ou non à la dentisterie, peuvent être analysés et servir d'outils de communication avec le patient et le prothésiste (35,36). Ils forment également la base du projet esthétique numérique (smile design), notamment lorsqu'une réhabilitation concerne le secteur antérieur maxillaire ou qu'une forte demande esthétique du patient est exprimée. La réalisation d'un design 2D demeure limitée sur le plan clinique, car le passage à la 2D entraîne de nombreuses approximations. De ce fait, le projet virtuel 3D,

seul véritablement cohérent d'un point de vue clinique, constitue la suite logique : le wax-up numérique issu de ce projet sert à fabriquer un masque en résine (mock-up) que le patient teste pour validation. De nouvelles photographies du mock-up porté par le patient sont alors réalisées, et le plan de traitement n'est enclenché qu'après acceptation de ce mock-up. De nombreux protocoles recommandent par ailleurs de filmer le patient, en plus de réaliser des photographies, afin de s'affranchir de l'aspect figé d'un simple cliché.

Un système de capture d'image performant est nécessaire, malgré l'évolution de la qualité des photographies issues de smartphones et tablettes, l'utilisation de matériel professionnel adapté est recommandé (figure 21). Un appareil photo numérique Reflex équipé d'un capteur APS-C (Advanced Photo System type-C) ou de type plein format (« full frame »). Un objectif macro, caractérisé par un rapport de reproduction de 1:1, qui élimine toutes les déformations, avec une longueur focale située entre 85 et 105 mm. Un dispositif d'éclairage additionnel. Des accessoires incluant des supports de lèvres, des contracteurs et des miroirs. Un bon équipement ne suffit pas à lui seul ; comme pour chaque outil, la compétence du praticien reste déterminante. Enfin, la standardisation des protocoles de prise de vue (position du patient, conditions d'éclairage, réglages de l'appareil : vitesse d'obturation, ouverture du diaphragme, ISO, balance des blancs, puissance des flashes) est essentielle pour obtenir des documents exploitables et reproductibles, adaptés aux diverses situations cliniques et aux types de photographies recherchés (36).



Figure 21 : Matériel nécessaire pour réaliser un protocole photographique. (Source: Grégory Camaleonte).

3.2.3. Scanner facial

Le scanner facial (ou FaceScanner FS en anglais) est un dispositif utilisé pour capturer l'anatomie du visage du patient en trois dimensions. Cela nous permet d'analyser, avec une précision supérieure à celle que procurent de simples photographies 2D, des éléments clés tels que la ligne médiane, la symétrie, les plans de référence, le plan occlusal, la proportion et l'équilibre des tiers faciaux, ou encore la ligne du sourire (37). Cette approche permet un smile design (design du sourire) et une planification prothétique encore plus personnalisée. De plus, la communication avec le patient et le prothésiste s'en trouve grandement améliorée grâce à la simulation du résultat, notamment lorsque l'on intègre dans le processus un mock-up virtuel (maquette virtuelle). Par ailleurs, les scanners faciaux peuvent être mis en œuvre pour créer un arc facial virtuel, dont les données serviront au montage d'un articulateur virtuel et à la conception prothétique (figure 22) (37,38). On peut également recueillir de nombreuses données esthétiques et morphométriques utiles, par exemple, pour la réalisation d'épithèses faciales (figure 23) (38).

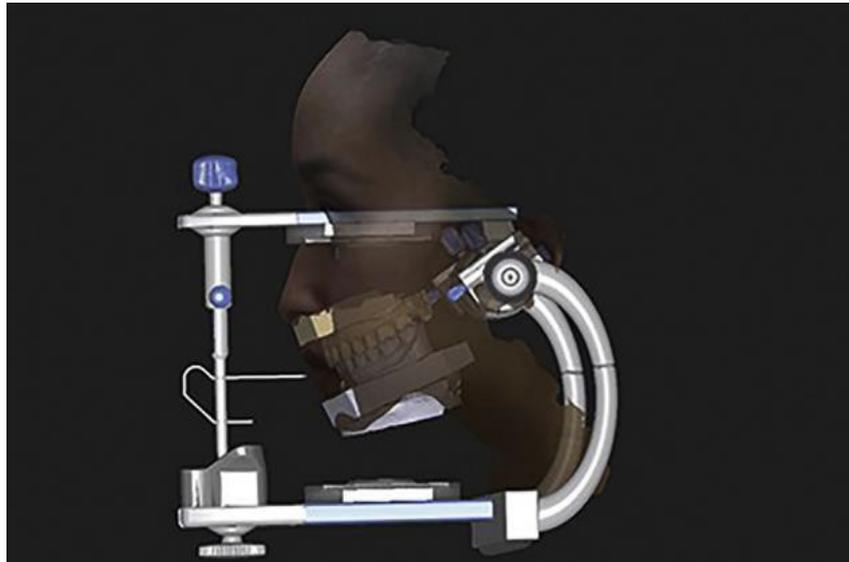


Figure 22 : Utilisation d'un scanner facial aligné avec une empreinte intraorale pour programmer un articulateur virtuel selon les plans de référence (37).

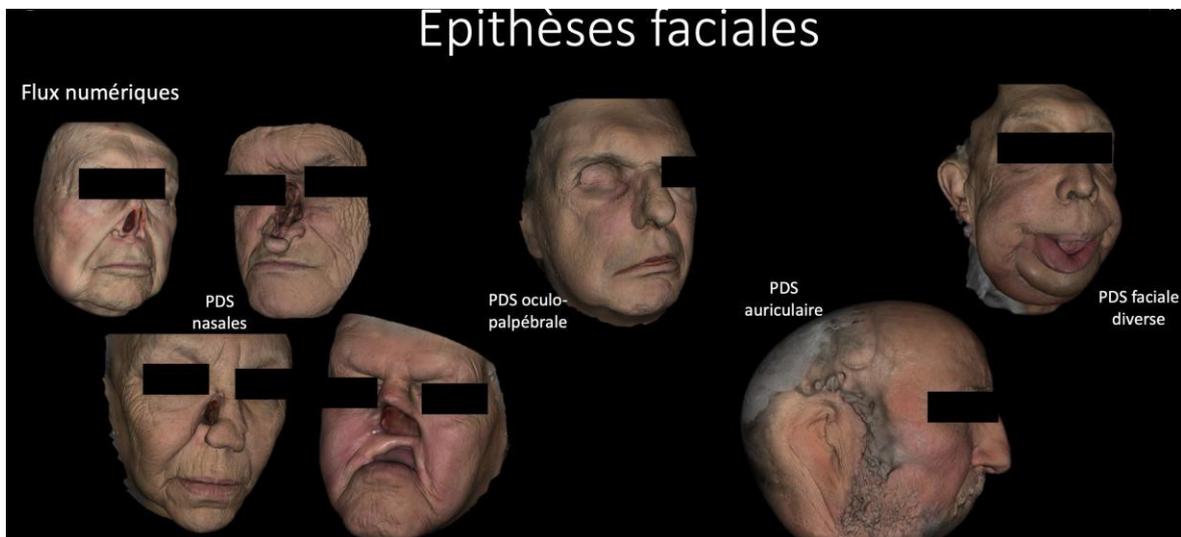


Figure 23 : Scan facial pour la réalisation d'épithèses faciales.
(Source: consultation de prothèse maxillo-faciale, CHU Rangueil).

Il y a différentes solutions pour effectuer un scanner facial, il s'agit d'une adaptation à notre pratique d'une technologie qui existe déjà. Allant de l'utilisation d'une application dédiée sur le smartphone à des hardwares plus spécifiques pouvant être fixes ou mobiles. Sur les smartphones, plusieurs applications permettent de scanner des objets en 3D et la face, entre autres, certaines se positionnent sur cette utilisation spécifique. Il est tout de même à noter que depuis 2020 les iPad Pro, les iPhone 12 Pro et Pro Max et les générations suivantes de la gamme Pro intègrent un capteur Light Detection and Ranging (LiDAR); contrairement à la photogrammétrie (analyse d'image en 2D pour reconstituer la 3D) le LiDAR fournit des données directes de distance permettant des mesure plus précise de chaque point grâce à l'émission d'un laser infrarouge (Laser infrarouge de faible intensité Class 1 selon la

norme IEC 60825-1, sûr pour l'œil humain dans les conditions normales d'utilisation) ,l'algorithme de l'application se servira de ces données en plus des autres données collectées pour reconstituer la 3D. Des applications exploitant cette technologie sont à privilégier. L'utilisation clinique de ces scans faciaux, bien que moins précise que les appareils dédiés semble cohérente cliniquement (37,39,40). Il existe des appareils dédiés plus précis et plus fiables (41),ils se présentent sous forme fixe ou mobile (figure 24) et utilisent généralement la photogrammétrie associée à la lumière structurée. Ils ont un temps d'acquisition plus rapide, sont plus ergonomiques et sont associés à une interface dédiée facilitant l'exploitation dans le flux numérique.

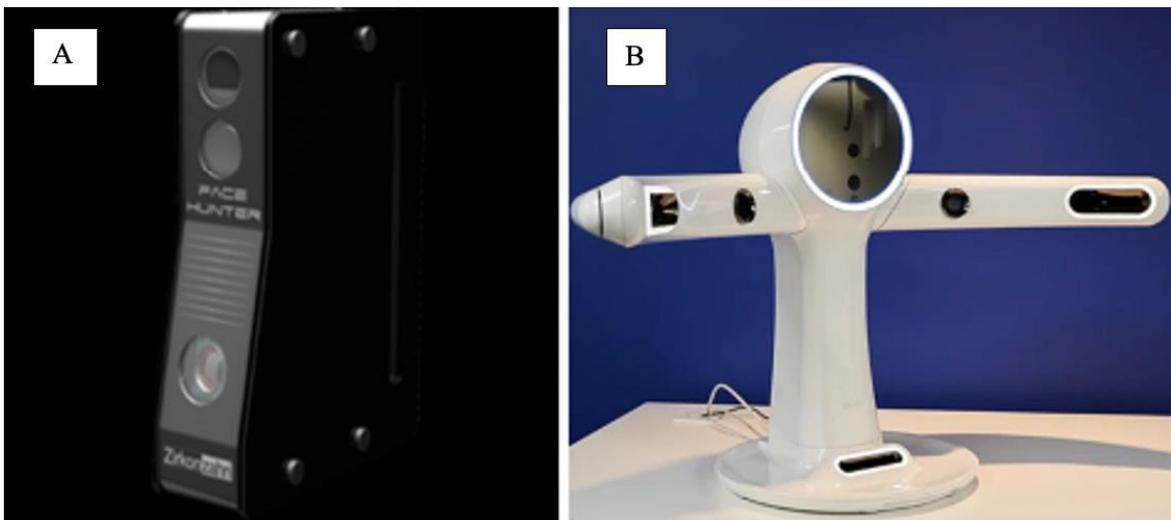


Figure 24 : A) Scanner facial mobile : Face Hunter Zirkonzahn®. B) Scanner facial fixe : RAYFace Raymedical®. (Source : Zirkonzahn® et Raymedical®).

3.2.4. Cone beam

Le Cône Beam, également connu sous le nom de CBCT (Cone Beam Computed Tomography), ou en français imagerie volumique à faisceau conique, est un appareil de radiographie (figure 25). Il permet une reconstruction en 3D des volumes osseux et leur exploration. Le CBCT utilise un faisceau de rayons ionisants en forme de cône pour numériser l'objet à analyser. Un générateur de rayons émet un faisceau qui traverse la zone à explorer. Après atténuation, ces rayons sont captés par un détecteur qui tourne autour du patient sur un angle de 180 à 360 degrés, en fonction des modèles. Pendant cet examen, plusieurs centaines d'images (ou projections) sont capturées sous différents angles. Ces données sont ensuite reconstruites par ordinateur pour créer une image volumique 3D, souvent sous forme de fichiers DICOM. On a une irradiation du patient : bien que réduite, elle reste une exposition aux rayons ionisants et nécessite donc une justification médicale. Donc, même s'il nous apporte des informations et une précision accrue son utilisation doit être raisonnée et limitée à son champ d'indication, dans le cadre

d'une planification prothétique. Le champ d'indication pour la reconstitution d'un jumeau numérique incluant le CBCT du patient sera pour la réalisation de prothèses implanto-portées ou pour des prothèses maxillo-faciales. Avant d'être exploité, le fichier doit être transformé en fichier STL. à l'aide d'un logiciel dédié, de nombreux logiciels permettent sa segmentation automatique aidé par l'intelligence artificielle à l'image du logiciel RELU® (figure 26) (42).



Figure 25 : Exemple d'unit d'imagerie CBCT. (Source : Planmeca Viso® G7).

Ensuite, les informations issues de ce CBCT vont pouvoir être assemblées aux autres éléments de notre jumeau numérique (empreinte optique, scan facial, tracking de la position mandibulaire etc.). Cela va nous permettre de planifier notre prothèse avec plus de précision, de faire un smile-design et de créer un wax-up numérique. Ce wax-up numérique va pouvoir être présenté au patient et validé. Une fois le projet prothétique validé, on va pouvoir se servir des informations du CBCT pour effectuer une planification implantaire sur des logiciels dédiés (figure 27). Cette planification va permettre l'impression de guides chirurgicaux, le jumeau numérique du patient pourra être mis à jour via une empreinte optique pour repérer le positionnement des implants et imprimer la prothèse provisoire, même si théoriquement il est possible de faire une mise en charge immédiate, ensuite de nouvelles empreintes seront effectuées une fois l'ostéo-intégration acquise pour la construction des prothèses définitive.

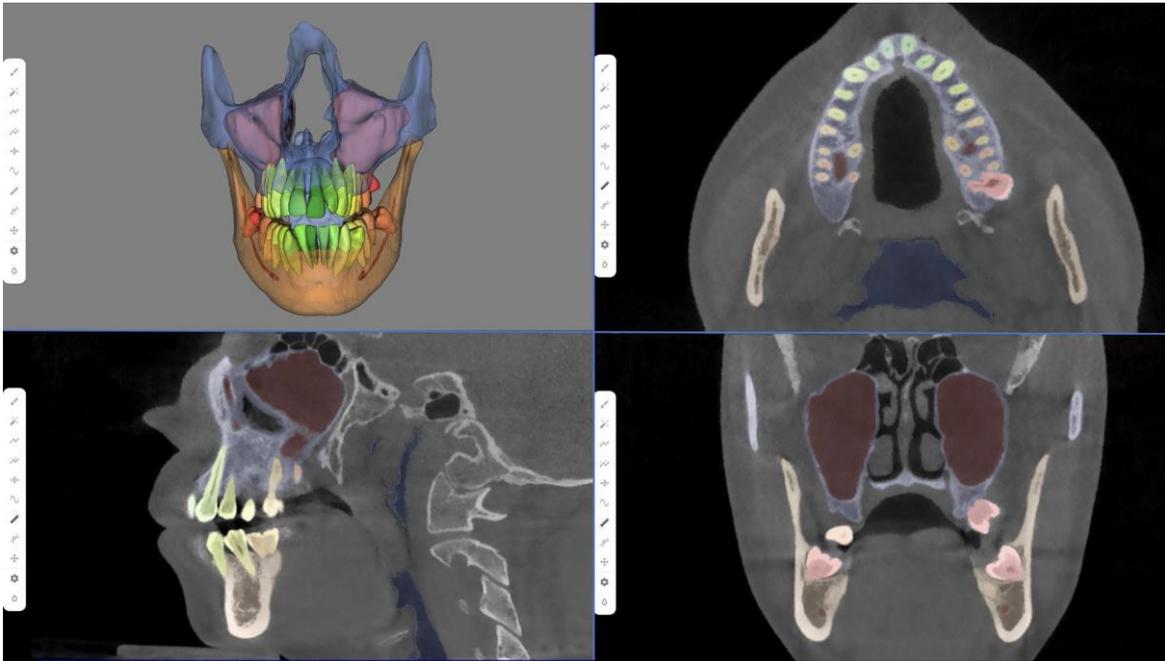


Figure 26 : Segmentation automatique à partir d'un CBCT (41)

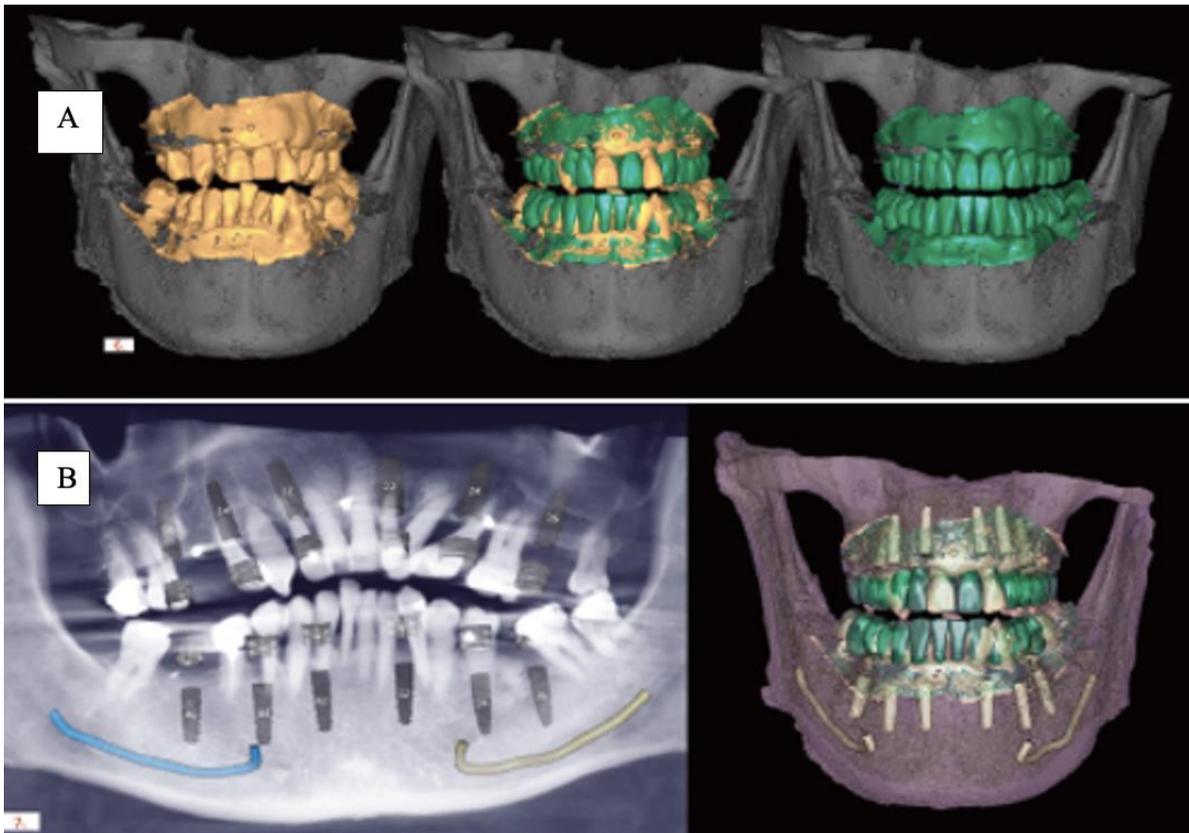


Figure 27 :A) Matching du CBCT avec l'empreinte optique et le wax-up numérique. B) Planification implantaire basée sur le projet prothétique (42).

Les indications du CBCT selon la HAS (haute autorité de santé) (43) :
 « lorsque les informations fournies par la clinique et la radiologie 2D (rétro-alvéolaire ou panoramique dentaire) ne sont pas suffisamment contributives au diagnostic et à la thérapeutique et qu'une image 3D est indispensable : pour un bilan péri-apical pré chirurgical particulièrement dans la région maxillaire

postérieure ou dans la région du foramen mentonnier ;pour la recherche et la localisation d'un canal radiculaire supplémentaire ;pour le bilan d'une pathologie radiculaire, type fracture, résorption interne et externe, péri-apicale ou latéro-radiculaire ;pour un bilan pré-implantaire et une estimation du volume osseux au niveau du site implantaire ;lorsqu'on veut évaluer l'extension et les rapports des lésions tumorales des maxillaires ».

3.2.5. Traqueurs de la position mandibulaire

Les articulateurs mécaniques conventionnels sont utilisés pour simuler une amplitude moyenne des mouvements mandibulaires. Ces systèmes ne permettent pas de reproduire les mouvements réels et spécifiques de chaque patient. Les dispositifs de suivi mandibulaire (*jaw tracking devices*) permettent d'analyser et d'enregistrer les mouvements et la cinématique mandibulaire. Ils permettent d'améliorer la planification et la personnalisation des soins, tout en réduisant les ajustements post-opératoire en facilitant l'adaptation des guidages cuspidiens lors du design des futures prothèses, afin de préserver l'équilibre fonctionnel du patient (44,45). Ils offrent également une aide précieuse dans le diagnostic des troubles de l'articulation temporomandibulaire (46,47). Il existe plusieurs dispositifs de suivi et d'enregistrement des mouvements mandibulaires, nous pouvons citer comme exemple Tech in motion Modjaw® (37), the cyclops system ITAKA®, Plane analyser Zirkozahn®, JMA Optic system Zebris®, Proaxis SDiMatriX® et K7x Jaw Tracking Myotonics ®. L'enregistrement des mouvements réels mandibulaires n'est pas nouveau, mais était moins répandu et ergonomique dans son utilisation (Figure 28). Nous développerons l'exemple du Modjaw dans la suite de par l'intérêt de leur interface pour la création et l'exploitation d'un jumeau numérique.

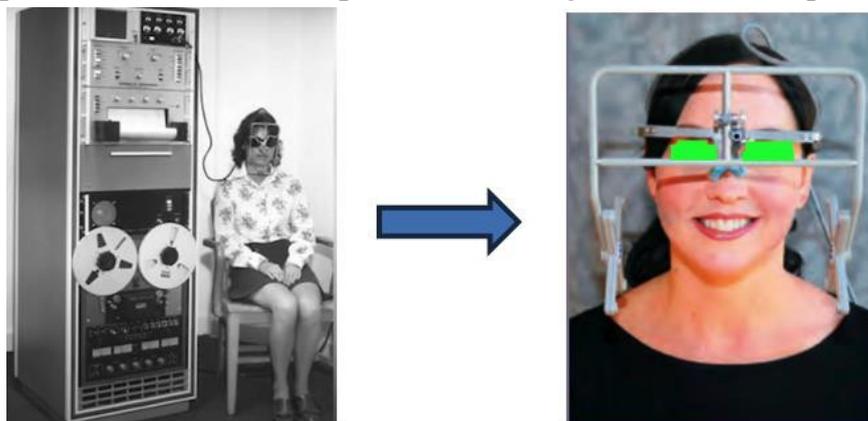
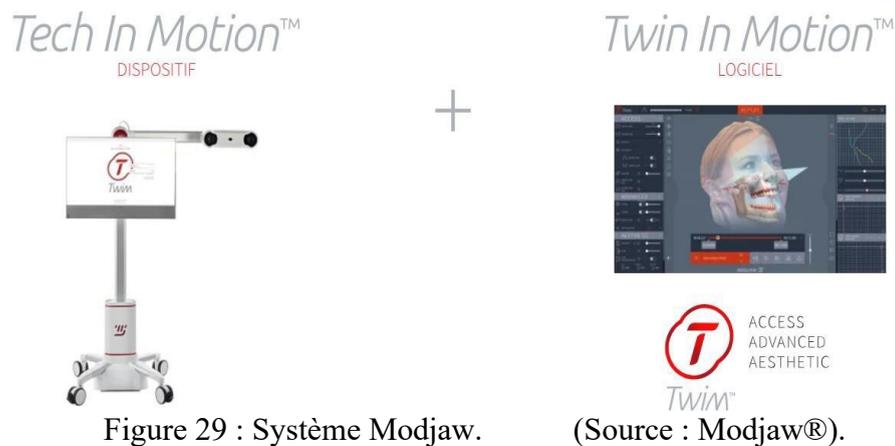


Figure 28 : K1 Myotonics® 1971 à gauche et K7x evaluation system Myotonics® à droite (35).

3.2.5.1. Le Modjaw (dispositif et logiciel)

Le dispositif utilisé par Modjaw est appelé « Tech in Motion ». Le logiciel installé sur le dispositif est appelé « TWIM », qui fait référence à TWIN IN MOTION. En français : jumeau en mouvement, ou jumeau numérique dynamique (figure 29). Le dispositif est constitué d'un chariot sur lequel est fixé un ordinateur tactile, avec un système d'exploitation installé dessus ainsi que d'une caméra rabattable et d'un kit patient, avec un capteur frontal (maxillaire) appelé « TIARA », un capteur mandibulaire appelé « SMILIT », et un stylet appelé « TALLY » (figure 30).



Le logiciel de Modjaw, « TWIM » (figure 31), est préinstallé sur le dispositif Modjaw, avec la possibilité de l'installer également sur d'autres ordinateurs. « TWIM » va permettre d'importer un certain nombre d'éléments numérisés du patient et de les intégrer sur la même plateforme, aboutissant ainsi à son jumeau numérique dynamique. Sur la version complète du logiciel il y a

3 modules, appelés « Access », « Advanced » et « Aesthetic ». Il est possible d'importer à la fois les modèles dentaires maxillaires et mandibulaires numérisés du patient, des seconds modèles dentaires avec extractions virtuelles, un wax-up numérique en STL., OBJ. ou PLY.(module « Access »).Ainsi que les radiographies 3D des bases osseuses du patient (si le patient avait à disposition des fichiers DICOM., ces fichiers doivent être d'abord segmentés afin de passer de DICOM à STL avant de pouvoir être importés sur « TWIM ») (module Advanced). Enfin, les photos 2D et le scanner facial 3D du patient peuvent également être importés (module « Aesthetic »).

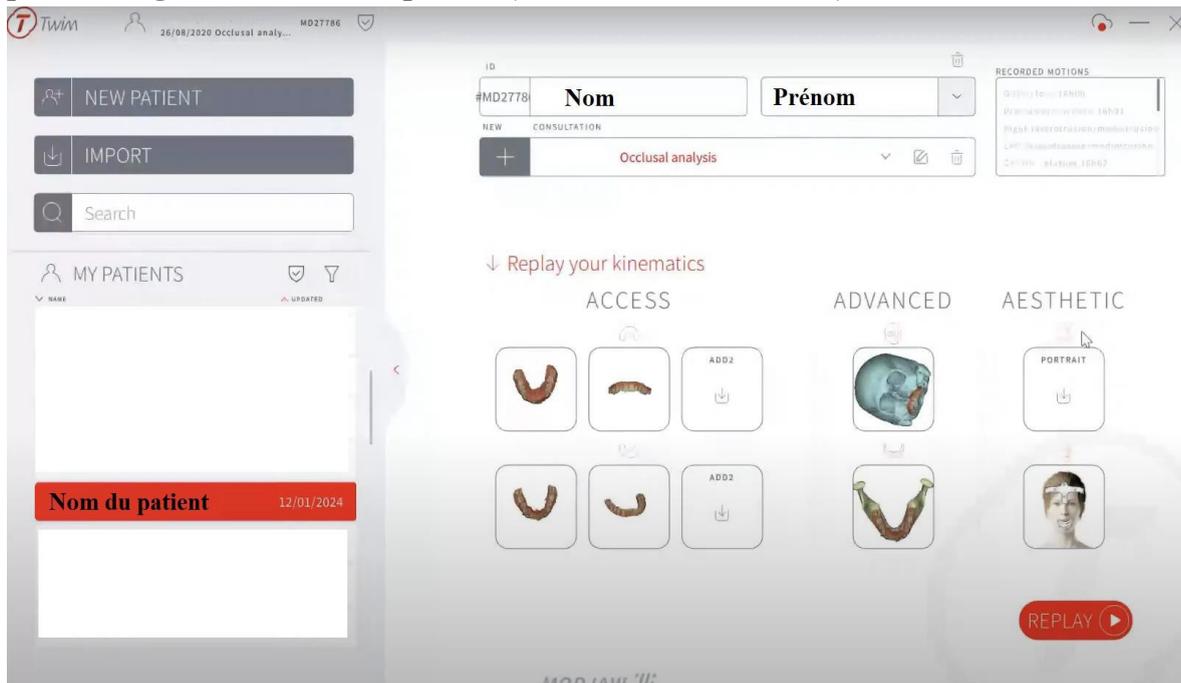


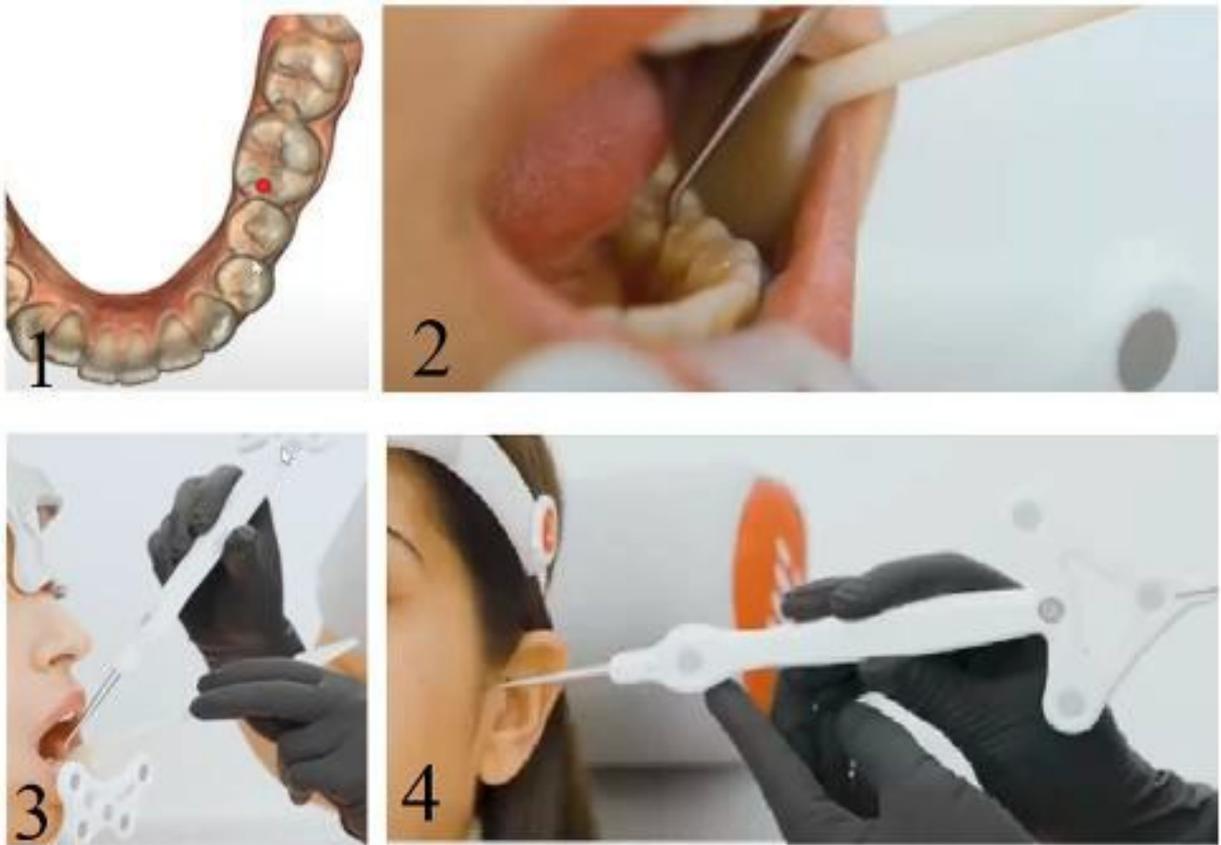
Figure 31 : Impression d'écran du logiciel TWIM. (Source : Modjaw®).

Explorons maintenant le fonctionnement de ce système. Cela débute par l'importation au sein du logiciel des différents éléments du dossier patient que l'on souhaite utiliser. Nous pouvons ainsi créer un jumeau numérique de façon assez rapide et ergonomique au niveau de l'interface. Il est nécessaire d'avoir au minimum la numérisation des arcades dentaires, obtenue soit via un scanner intraoral soit via un scanner de laboratoire. Suivi d'une étape d'étalonnage où l'on choisit des points de correspondance (matching) sur l'arcade mandibulaire et on calibre le « TALLY ». Le traqueur maxillaire, « TIARA », sera placé sur le front du patient, et serré sur sa tête grâce à un bandeau équipé de deux roulettes de serrage. Le traqueur mandibulaire, « SMILIT », sera solidarisé à l'aide d'une fourchette jetable aux faces vestibulaires des dents inférieures. Une résine à prise rapide (exemple Voco) est utilisée pour cela. La mise en place du « SMILIT » est assez simple, elle débute par le garnissage de la fourchette d'une résine à prise rapide (1 figure 32), suivi de sa fixation en vestibulaire des dents mandibulaires (2 figure 32), avant d'y clipser le

« SMILIT » (3-4 figure 32). Ensuite, le stylet « TALLY » permettra, grâce à sa pointe, de pointer des points de référence dentaires ainsi que des points de référence sur le visage du patient (figure 33). Cela permet d'informer le dispositif sur la position dans l'espace de ces points, afin de repositionner les dents par rapport au capteur maxillaire « TIARA » et mandibulaire « SMILIT ». En effet, ces éléments sont suivis par une caméra stéréoscopique qui enregistre leurs positions respectives. Puis le patient est invité à effectuer des mouvements fonctionnels (masticatoires, ouverture, fermeture, mouvement de protrusion et de latéralité etc.). Tous les déplacements du dispositif mandibulaire « SMILIT » sont capturés en temps réel. Ces données permettent de modéliser précisément la cinématique mandibulaire. Les différents éléments assemblés du jumeau numériques seront visibles sur l'écran en plus de l'axiographie et des contacts interdentaires lors de la fonction (figure 34-37).



*Figure 32 : Mise en place du SMILIT.
(Source : Modjaw®).*



1.Choix de points de repères virtuellement sur les dents. 2 et 3. Pointage de ces points à l'aide du TALLY afin d'informer le dispositif sur la positions dans l'espace des ces points là, afin de repositionner les dents par rapport aux capteurs TIARA et SMILIT. 4. Le TALLY permet également de pointer des points de référence sur le visage du patient.

Figure 33 : Étalonnage du système. (Source : Modjaw®).

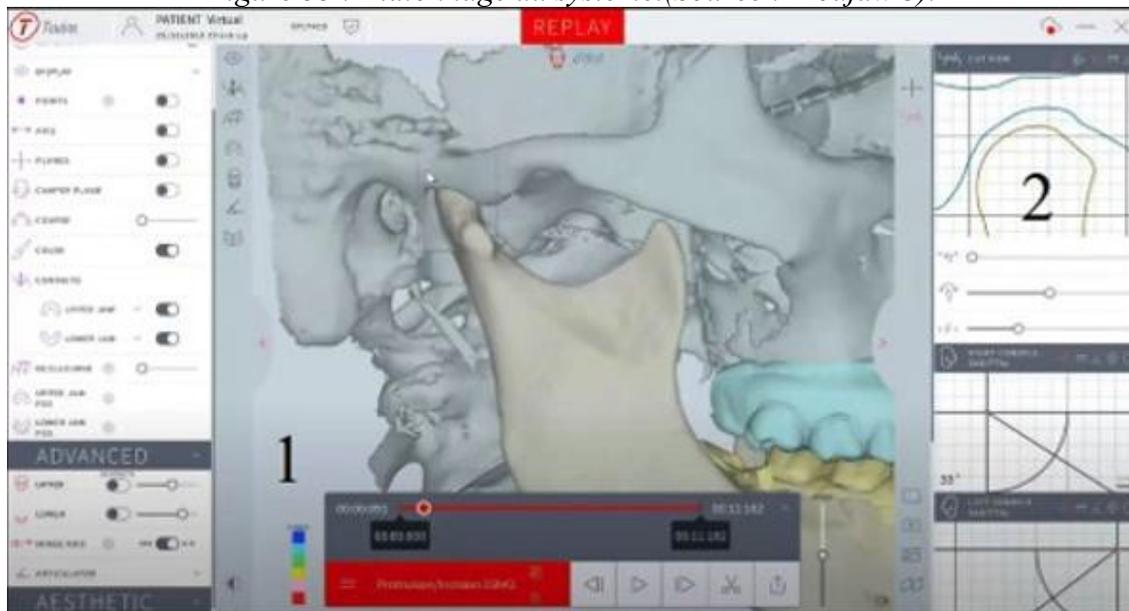


Figure 34 : 1) Visualisation des mouvements du patient avec les éléments choisis du jumeau numérique assemblés (ici CBCT segmenté au format STL., empreinte numérique et cinématique mandibulaire) 2) Axiographie. (Source : Webinaire Modjaw®).

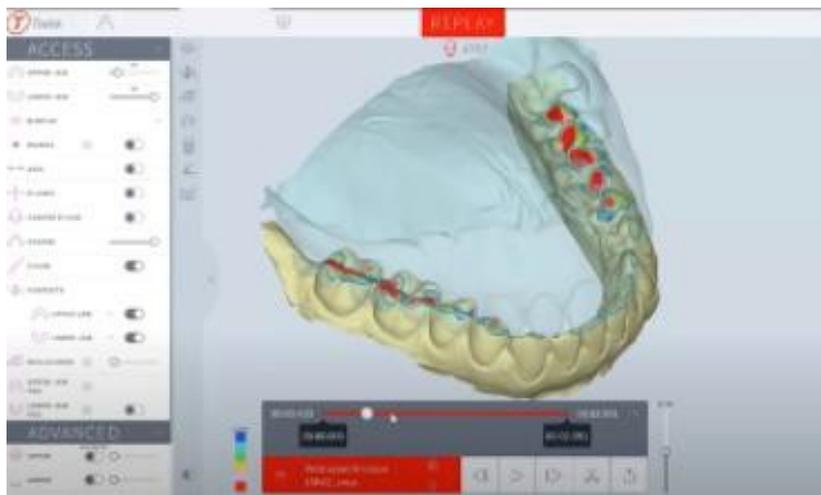


Figure 35 : Visualisation de l'intensité et de la répartition des contacts intercuspidiens lors de la fonction. (Source : Webinaire Modjaw®).



Figure 36 : Visualisation de la superposition du scan facial, CBCT segmenté en STL , empreinte optique , cinématique mandibulaire et plan de références. (Source : Webinaire Modjaw®).

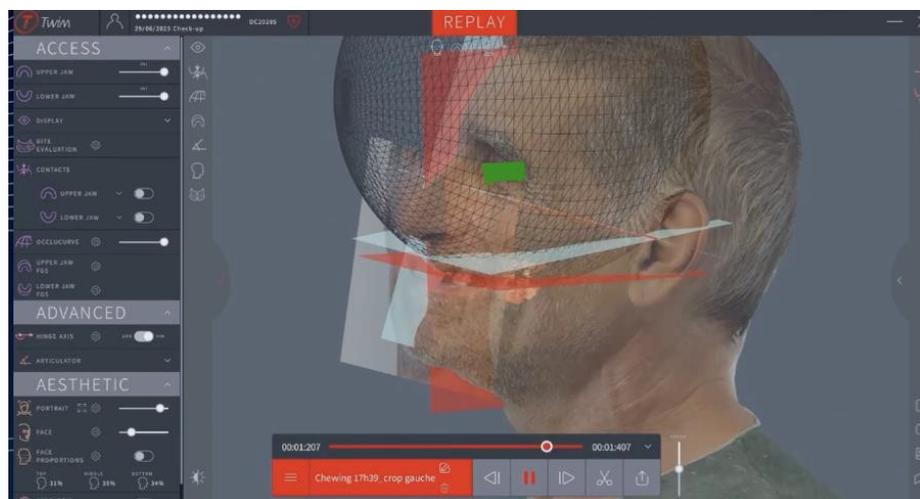


Figure 37 : Visualisation de la superposition du facescan, empreinte optique cinématique mandibulaires et plan de références. (Source : Webinaire Modjaw®).

Nous pouvons analyser les mouvements du patient grâce à l'axiographie et à l'étude des contacts dentaires en situation fonctionnelle. Ces informations nous aident à prendre des décisions lorsqu'une réhabilitation prothétique est nécessaire. Chez un patient dont l'enveloppe fonctionnelle est correcte, il est possible d'intégrer ces données pour « copier-coller » cette fonction dans la future réhabilitation en adaptant le design prothétique. Lorsque la fonction est défailante, il convient de l'améliorer par la mise en place de gouttières, de provisoires, ou d'une combinaison des deux, selon la chronologie requise. Leur fabrication et leur design s'appuient sur les renseignements recueillis, qui permettent de régler le montage sur articulateur et de simuler virtuellement les mouvements du patient (figure 38). Une fois la gouttière ou la prothèse provisoire délivrée, de nouveaux enregistrements peuvent être effectués. Chez un patient avec une enveloppe fonctionnelle correcte au départ, on observera un copier-coller de celle-ci avant/après la réhabilitation. Chez un patient dont l'enveloppe fonctionnelle enregistrée au départ n'est pas satisfaisante, la validation du projet se fera par la mise en évidence d'une enveloppe fonctionnelle correcte après rééducation.

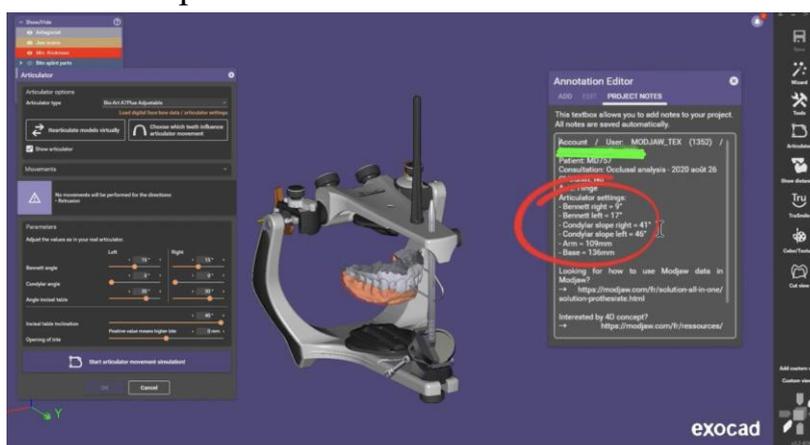


Figure 38 : Réglage de l'articulateur virtuel sur Exocad (source : Modjaw®).

Ces étapes fournissent des éléments d'analyse, de communication et d'action objectifs. À l'image d'un processus de fabrication industrielle, on peut ainsi mettre en place un « contrôle qualité » pour vérifier si le résultat respecte les normes et spécifications prévues, avant de passer à la production ou à la phase suivante.

Il est également possible d'externaliser l'analyse des mouvements enregistrés, en utilisant le service « TWIM FIT » de Modjaw®. Une équipe d'experts rédigera un rapport d'analyse et, entre autres, classifiera le cas parmi trois catégories :

- Verte, nous signifiant que les données enregistrées vont dans le sens d'une enveloppe fonctionnelle correcte du patient et que l'on va pouvoir

exploiter les enregistrements réels pour notre design prothétique afin de s'intégrer dans celle-ci.

- Orange, nous indiquant que les données enregistrées ne nous permettent pas de passer directement à une prothèse définitive, les données vont pouvoir être exploitées pour un réglage personnalisé d'un articulateur virtuel pour la fabrication d'éléments provisoires ou de gouttières.
- Rouge, nous indiquant que l'articulateur sera réglé de façon arbitraire selon les règles déjà établies. Le but étant de rééduquer le patient, faire des réglages occlusaux sur la prothèse provisoire jusqu'à l'obtention d'une pastille verte lors des nouveaux enregistrements.

L'ensemble des éléments assemblés sur le logiciel peut être exporté dans un format ouvert, qui peut être exploité sur des logiciels de CAO comme Exocad®, ZirkonZahn Modellier® et 3Shape Dental System®. Le format ouvert pour les enregistrements de la cinématique mandibulaire est « XML. ». Les données issues du Modjaw® peuvent être exportées dans ce format ou bien dans le format fermé de Modjaw, « Mod. ».

Une limite des articulateurs numériques est que la force des contacts intercuspidiens lors de la fonction est représentée et induite par un taux d'interpénétrations des surfaces lors des mouvements, ce qui peut être source de biais. En ce sens des articulateurs physiques reproduisant les mouvements enregistrés ont été développés à l'image de « the ART-HU-R articulator » ITAKA® (figure 39) pour articulatur human replication où les mouvements enregistrés sont directement reproduits sur l'articulateur pour les finitions finales et essais avant l'insertion dans la cavité buccale du patient.



Figure 39: "The ART-HU-R articulator ". (Source: ITAKA®).

3.2.6 Autres données d'entrée

3.2.6.1 Logiciels métiers

La plupart des cabinets aujourd'hui utilisent un logiciel métier, au-delà de l'aide à la cotation des actes et à la transmission de ceux-ci à la sécurité sociale de manière sécurisée. C'est au niveau de ces interfaces que va commencer conceptuellement la création du jumeau numérique du patient. On va avoir une fiche-patient plus ou moins ergonomique et personnalisable, sur laquelle un certain nombre d'informations seront utilisées dans la planification prothétique et le plan de traitement :

- Questionnaire médical, saisi informatiquement ou intégré par numérisation de la version papier.
- Historique des soins.
- Notes de consultations.
- Anamnèse.
- Prescriptions, avec souvent l'intégration d'outils d'aide à la prescription (labélisation spécifique en fonctions des données utilisés, par exemple la certification HAS v2 avec la base de connaissances VIDAL agréée par la Haute Autorité de Santé).
- Courriers.
- Interconnexion avec les interfaces de logiciels de radiographie 2D et 3D.
- Photographies extra-orales et intra-orales (de nombreux logiciels ont été développés pour l'aide à la communication avec le patient, l'analyse et la planification de traitements à visée esthétique à partir de ces photographies).
- Bilan parodontal plus ou moins intuitif (de nombreux outils ont été développés pour rendre les bilan parodontaux plus reproductibles ergonomiques, avec des outils et une interface dédiée, certains logiciels métiers ont intégré des modules).
- Devis, documents administratifs concernant la nature de la prothèse, consentement éclairé, documents informatifs etc.

3.2.6.2 Radiographie et diagnostic par intelligence artificielle

Nous avons à notre disposition différents outils pour la radiographie intra et extra-buccal selon différentes techniques que nous ne développerons pas ici. Les plus communément utilisées sont les cliché-rétro alvéolaires en intrabuccal et les radiographies panoramique (orthopantomogramme) en extrabuccal, il y a aussi des indications pour d'autres types des radiographies 2D à savoir en intra-buccal les clichés occlusaux selon différentes incidences et en extra-buccale le maxillaire défile-Blondeau-incidence tangentielle et la téléradiographie de face et de profil. Ces radiographies vont pouvoir compléter notre examen clinique et nous aider pour l'analyse et le diagnostic.

La grande habitude du praticien face à ce genre de cliché peut biaiser l'efficacité de la communication avec le patient lorsque le praticien utilise ses radiographies comme support de communication. Des outils ont été développés pour faciliter cette communication avec le patient, comme des écrans tactiles sur lesquels on peut dessiner, mais aussi des outils d'intelligence artificielle tels que « Allisone.ai » (48) qui a la capacité de reconnaître un certain nombre de structures et de les mettre en évidence donnant un aspect plus didactique pour le patient (figure 40). Le praticien peut modifier le compte-rendu en cas d'erreur du logiciel. Il ne s'agit au maximum que d'une aide au diagnostic et à la communication. Le praticien reste entièrement responsable du diagnostic et garde la main à toutes les étapes. Le logiciel permet, entre autres de rédiger un compte-rendu, de fournir des fiches explicatives simples et personnalisables des traitements que l'on propose au patient, ainsi que la possibilité d'établir le plan de traitement et l'illustrer sur la radiographie panoramique. Il permet également la synchronisation avec le logiciel métier, rendant, par exemple, le processus d'établissement de devis plus rapide. L'un des points d'intérêt de ce type de logiciel est son mode d'utilisation et son intégration dans l'écosystème dentaire. C'est un modèle SaaS (Software as a Service) utilisé sur le cloud avec tous les avantages que cela implique (accessibilité sur n'importe quel moniteur ayant accès à internet, facilité de mise à jour et possibilité de faire fonctionner l'intelligence artificielle à sa pleine capacité).

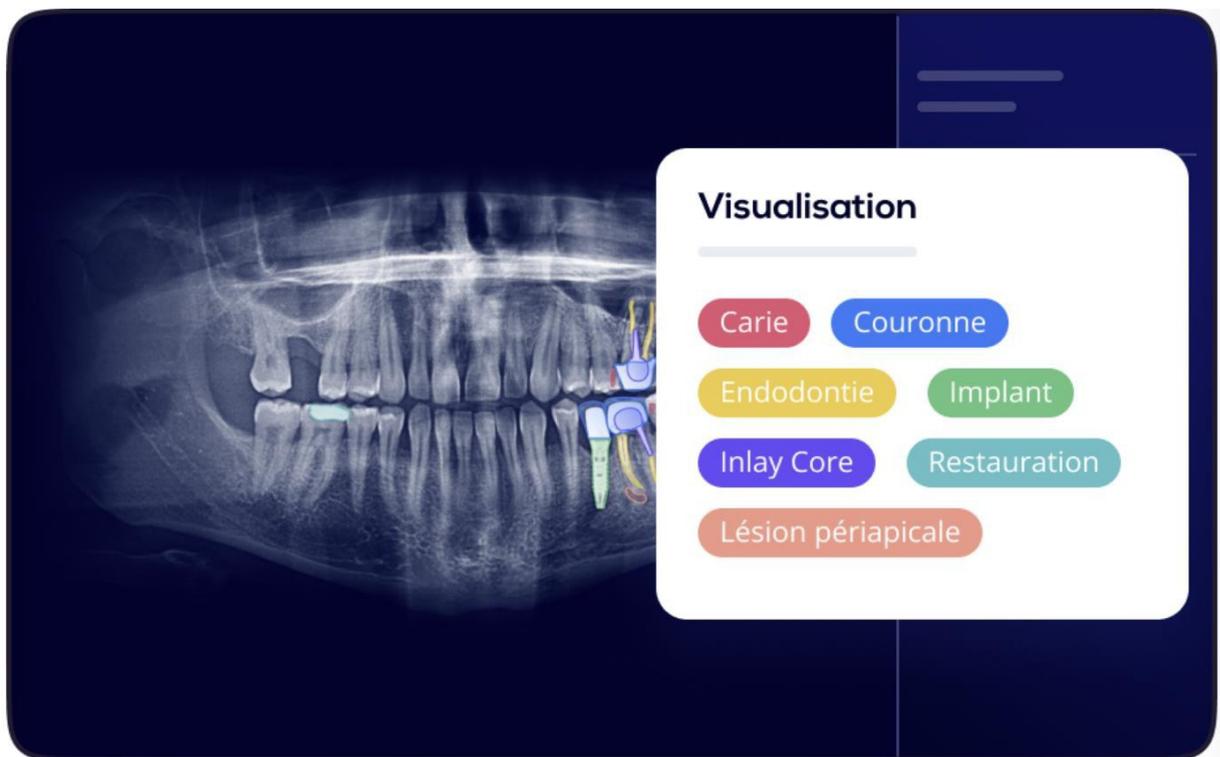


Figure 40: Visuel type d'une radiographie dentaire traitée par le logiciel d'Allisone.AI.
(Source : Allisone.AI).

3.2.6.3 Électromyographie (EMG)

Nous avons également la possibilité d'enregistrer les signaux électriques produits lors de l'activité musculaire à l'aide d'électrodes placées sur la peau (EMG de surface). Cela nous permet d'obtenir des données quantitatives objectives fiables et reproductibles sur l'état fonctionnel des muscles d'un patient (49).

Un protocole est proposé en ce sens dans la littérature et illustre bien l'intérêt de ce type de données (50). Le protocole « MAC1,2 », où les données de l'activité musculaire des principaux muscles masticateurs et de la cinématique mandibulaire sont utilisées en vue d'une analyse instrumentale et précise du fonctionnement de l'appareil manducateur, a un intérêt à la fois en pré-prothétique pour valider la situation musculaire initiale, en per-prothétique pour valider le projet, et en post-prothétique pour valider l'amélioration fonctionnelle. Le « K7 Evaluation System, Myotronics® », est utilisé. Ce système permet à la fois d'enregistrer la cinématique mandibulaire et l'EMG de surface des principaux muscles masticateurs. Ainsi vont pouvoir être évalués le tonus musculaire (tension au repos) des principaux muscles masticateurs (masséters, temporaux, sterno-cléido-occipito-mastoïdiens et digastriques), la chronologie et le synchronisme de contraction des masséters et temporaux, et enfin la force de contraction des masséters et temporaux, pour, dans un second temps, enregistrer la cinématique mandibulaire. Il y a ainsi une évaluation de la situation initiale et de la situation post-traitement (figure 41).

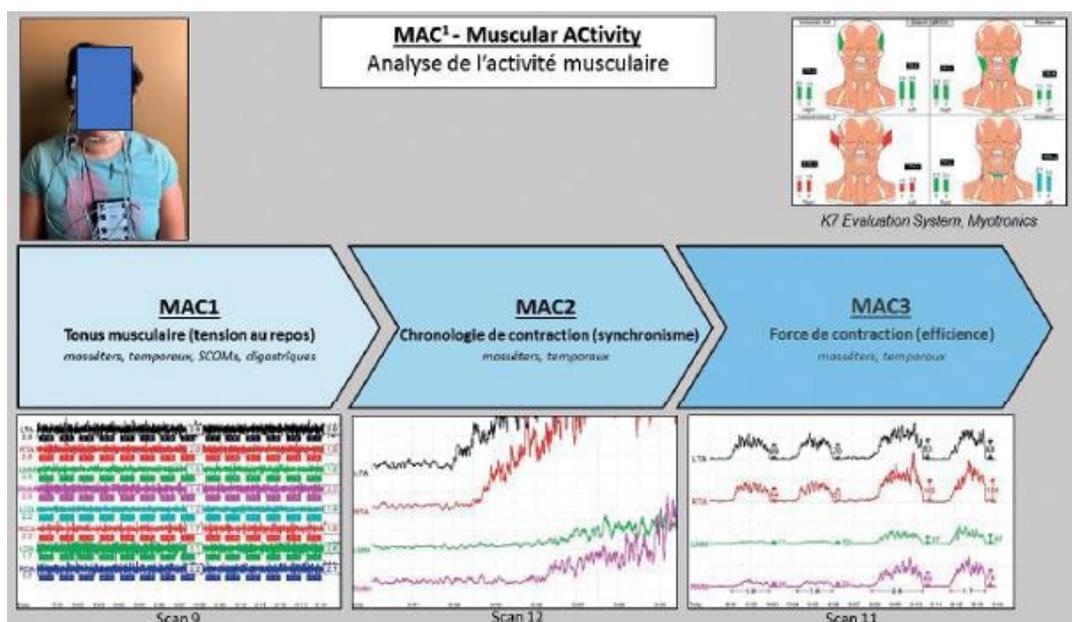


Figure 41 : Protocole MAC1 d'enregistrement de l'activité musculaire par électromyographie (48).

Par exemple, dans les enregistrements ci-dessous, une patiente présentant une héli-mandibulectomie reconstruite par endoprothèse a pu bénéficier de ce type d'enregistrement permettant une évaluation objective de l'amélioration fonctionnelle. Il a ainsi pu être mis en évidence, en début de traitement, une hyperactivité des muscles temporaux au repos et une activité musculaire pathologique des muscles temporaux et masséters. À 6 mois d'intervalle, après rééducation, la comparaison des enregistrements permet de montrer une réduction du tonus des muscles temporaux selon des valeurs normales (figure 42), une normalisation du synchronisme de contraction lors de la fermeture (figure 43) et une amélioration de l'efficacité musculaire au niveau des temporaux et des masséters (figure 44).

L'utilisation de l'électromyographie va au-delà de l'évaluation des données collectés ; elle va également pouvoir être utilisée associée à des techniques d'électrostimulation pour déterminer la position mandibulaire thérapeutique, qui sera la clé de voute de nombreuses réhabilitation prothétiques (51,52).

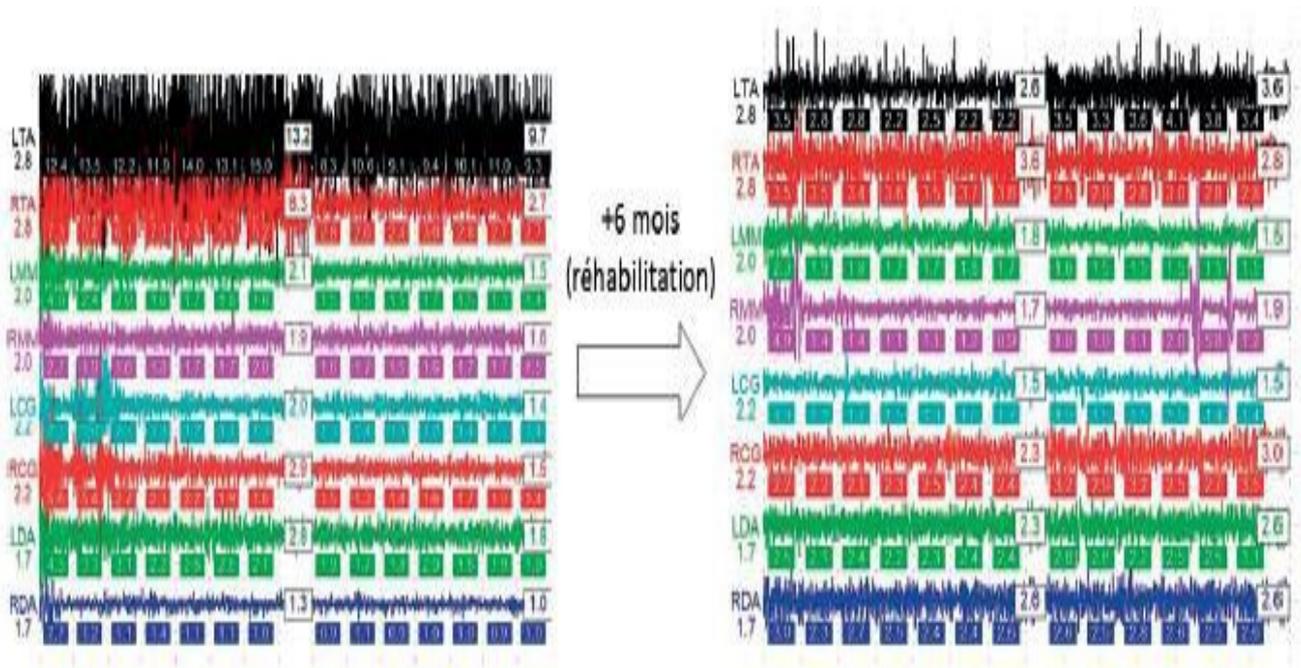


Figure 42 : Enregistrement du tonus (MAC1) (48).

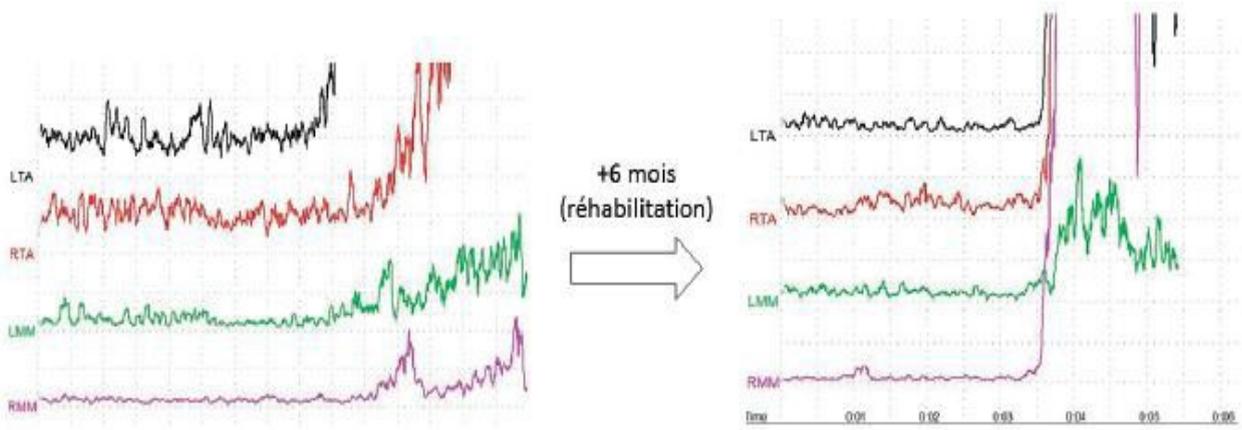


Figure 43 : Évaluation de la chronologie de contraction (MAC2)(48).

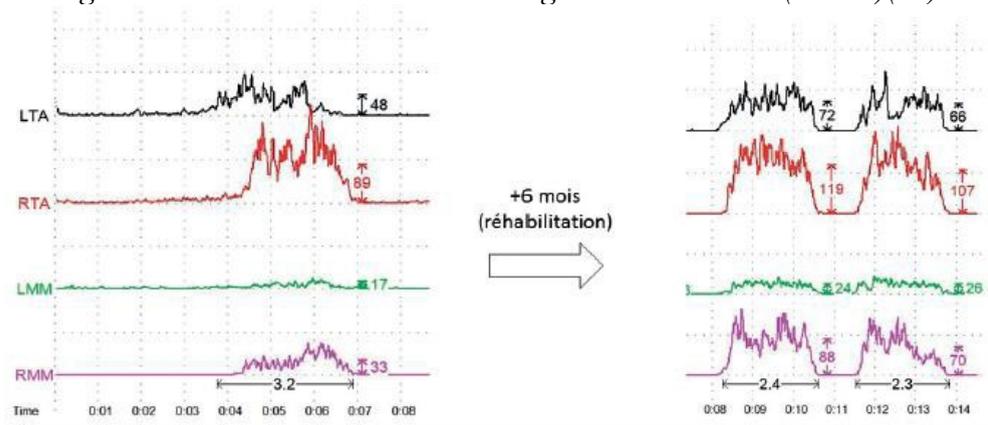


Figure 44: Évaluation de la force de contraction (MAC3)(48).

La sous-section « Autres données d'entrée » a eu pour objectif de relever le fait que d'autres informations à disposition du praticien ne sont pas encore intégrées directement dans les logiciels pour la création de notre jumeau numérique, l'analyse et la conception assistée par ordinateur.

IV. Perspectives technologiques et enjeux éthiques

4.1. Perspectives technologiques

La médecine bucco-dentaire connaît une évolution rapide grâce à l'apport des technologies numériques. Les traitements gagnent ainsi en précision, en prédictibilité, en personnalisation et en reproductibilité. Progressivement, le flux de travail traditionnel laisse place à une approche numérique (ou hybride), favorisant la convergence et l'exploitation efficace de multiples données cliniques. Nous avons pu voir à travers cette thèse un aperçu des possibilités opérationnelles déjà très intéressantes en termes de planification prothétique qu'offre le jumeau numérique. Toutefois, en comparant son développement à celui d'autres secteurs, comme l'industrie, on comprend rapidement que nous n'en sommes qu'aux prémices. Il y a un véritable défi quant à l'exploitation efficiente et raisonnée de l'ensemble des données que l'on est déjà capable d'acquérir, ainsi que dans le développement de nouveaux outils. Le principe du jumeau numérique repose sur la modélisation de chaque aspect de la cavité buccale (tissus durs, tissus mous, propriétés biomécaniques) et, à terme, de ses caractéristiques physiologiques. Dans la planification prothétique, il faut prendre en compte les aspects biologiques, fonctionnels et esthétiques, les technologies actuelles sont déjà très avancées pour l'aspect esthétique, mais elles n'en sont qu'au début de leur évolution en ce qui concerne l'aspect fonctionnel. Quant à l'intégration complète des paramètres biologiques, elle reste pour l'instant peu développée.

En matière de planification de l'aspect fonctionnel, l'analyse et la modélisation par éléments finis (FEM) constituent un levier majeur pour comprendre et anticiper les contraintes mécaniques subies par les restaurations. Cette approche permet de concevoir des dispositifs optimisés à la fois en termes de forme et de biomatériaux, de simuler divers scénarios cliniques et, in fine, d'améliorer l'intégration biologique et la résistance des prothèses tout en préservant les structures anatomiques voisines. L'intelligence artificielle (IA), dont le plein potentiel s'exprime grâce au cloud computing et aux ordinateurs haute performance (HPC), contribuera à cette évolution. De nombreuses études s'intéressent à ce sujet, notamment en implantologie et en orthodontie (53,54). Toutefois, la principale difficulté, comparativement à ce qui se pratique dans l'industrie, réside dans la collecte de données biomécaniques in vivo sans recourir à des méthodes invasives ou irradiantes. Cela incite à la recherche de stratégies innovantes.

Au-delà de la simulation, l'IA et le big data ouvrent également des perspectives inédites. Ainsi, il sera possible de comparer le profil d'un patient à un vaste ensemble de cas similaires, dans le but de déterminer les options prothétiques les mieux adaptées à ses contraintes spécifiques. Grâce à ces outils, on pourra établir des diagnostics prédictifs toujours plus précoces et envisager une approche préventive. Théoriquement, à mesure que ces solutions numériques seront employées, elles s'affineront et gagneront en pertinence grâce à l'apprentissage machine. L'accès à ces ressources s'effectuera essentiellement via le cloud, offrant aux praticiens la puissance de calcul nécessaire.

Parallèlement, les techniques d'impression et d'usinage évoluent rapidement, permettant le travail avec une grande variété de matériaux. Certaines recherches portent déjà sur l'impression de tissus biologiques, ce qui laisse entrevoir d'immenses perspectives (55). On constate également une intégration progressive de la réalité augmentée, offrant plusieurs avantages en termes de communication, de collaboration et de confort au fauteuil. Par exemple le prothésiste pourra visualiser exactement ce que voit le praticien et recevoir des consignes plus précises, comme s'il se trouvait physiquement au cabinet. De même, un spécialiste peut intervenir à distance pour apporter son expertise dès lors qu'une connexion internet stable est disponible, favorisant une concertation pluridisciplinaire plus fluide. En parallèle, le praticien pourra accéder à diverses informations sur le patient sans quitter le champ opératoire de sa vision, évaluer en direct la qualité de la préparation et la comparer au projet initial, ou encore localiser aisément les entrées canalaires lors de traitements endodontiques. Par ailleurs, des applications dédiées à la pose d'implants recourent déjà à la navigation guidée via la réalité augmentée(56,57).

En somme, la prochaine avancée majeure consistera à développer un modèle plus abouti, intégrant la biomécanique, la biologie et l'environnement du patient, tout en s'appuyant sur des algorithmes et une puissance de calcul toujours plus performants. Toutefois, la création d'un jumeau numérique parfaitement fidèle reste aujourd'hui une utopie, en raison de la complexité de l'être humain, du bruit généré à chaque étape de l'acquisition et de la variabilité intra- et inter-individuelle. Ainsi, même les modèles les plus avancés ne constitueront qu'une approximation. Les progrès à venir porteront autant sur les méthodes d'acquisition des données que sur leur exploitation.

4.2. Enjeux éthiques

L'émergence des jumeaux numériques dans la planification prothétique marque une avancée technologique significative. Cependant, leur adoption requiert des investissements considérables en logiciels, équipements et formations, ce qui constitue un obstacle pour de nombreux cabinets dentaires. Cette situation risque de générer des inégalités d'accès aux soins. Une réflexion approfondie sur les mécanismes d'accompagnement et les aides financières pour soutenir ces cabinets dans leur transition technologique s'impose. À cet égard, les stratégies mises en œuvre dans le cadre de la « transition énergétique » peuvent servir de modèle inspirant. Garantir le fonctionnement optimal des cabinets dentaires tout en permettant à tous les patients en France de bénéficier de soins de pointe, fondés sur les dernières avancées scientifiques, représente un enjeu éthique et sociétal.

L'utilisation des jumeaux numériques en odontologie et dans le domaine de la santé soulève des enjeux cruciaux liés à la gestion des données personnelles des patients. La collecte et l'analyse des informations de santé exigent des mesures de sécurité renforcées et un respect strict de la confidentialité. L'un des principaux risques de ces technologies réside dans le piratage des données d'un jumeau numérique, entraînant des conséquences potentiellement graves. Ces données, comprenant des informations personnelles et médicales sensibles, pourraient être exploitées à des fins malveillantes, telles que l'usurpation d'identité ou des attaques ciblées. À mesure que cette technologie se développe, toute altération ou manipulation de ces données pourrait directement compromettre les plans de traitement et mettre en péril la santé des patients. Dans ce contexte, il est impératif que les praticiens adoptent une vigilance accrue quant à la sécurité des données et acquièrent les compétences nécessaires en cybersécurité.

Par ailleurs, une autre problématique éthique qui a été soulevée dans la littérature réside dans le potentiel des représentations numériques à manipuler les interactions humaines, impactant ainsi la liberté individuelle et la confiance. La création et l'exploitation des données personnelles pour concevoir un jumeau numérique posent un risque réel de violation de la vie privée, notamment si ces données sont utilisées à des fins non explicitement consenties par le patient. Ces jumeaux numériques, véritables répliques de la personne réelle, soulèvent des interrogations fondamentales sur le respect de la « personnalité » et des attributs propres à chaque individu (58). Afin de prévenir les abus et garantir le respect des droits fondamentaux, l'utilisation de ces

technologies doit impérativement être encadrée par un cadre législatif clair et rigoureux.

L'obtention du consentement éclairé est une exigence fondamentale dans l'utilisation du jumeau numérique en Odontologie. Ce consentement garantit à chaque patient la liberté de décider si ses données personnelles peuvent être collectées et traitées. Pour renforcer ce droit, des dispositifs doivent être instaurés afin de permettre aux patients d'accéder facilement et à tout moment à l'ensemble de leurs données personnelles. En parallèle, il est essentiel que les professionnels de santé informent les patients de manière claire et transparente sur les finalités et les modalités d'utilisation de leurs données. Cette démarche contribue à instaurer un climat de confiance entre les praticiens et les patients, tout en respectant les principes éthiques et légaux qui entourent la gestion des données personnelles. Le consentement éclairé ne se limite pas à une formalité administrative ; il s'agit d'un pilier essentiel pour garantir que chaque patient reste au cœur du processus décisionnel concernant l'utilisation de ses informations sensibles.

Enfin, l'un des risques potentiels liés à l'adoption des jumeaux numériques est la déshumanisation de la relation entre le praticien et le patient. Le recours à des technologies de plus en plus sophistiquées pourrait, dans certains cas, conduire à une approche trop technocratique, déconnectée de l'aspect humain de la prise en charge. Au contraire, il est crucial que ces outils viennent renforcer la communication et l'approche centrée sur le patient, en permettant une meilleure personnalisation des traitements tout en préservant l'empathie et la confiance qui doivent exister dans toute relation soignant-soigné

Conclusion

L'odontologie prothétique connaît une transformation majeure avec l'adoption croissante des jumeaux numériques appliquée à la planification thérapeutique. Ces nouvelles technologies offrent la promesse d'une précision améliorée, d'une personnalisation accrue et d'une prévisibilité optimisée des résultats thérapeutiques. Toutefois, leur développement soulève des défis complexes, tant techniques qu'éthiques, exigeant une réflexion approfondie. En termes de perspectives, l'optimisation des processus numériques ouvre des horizons fascinants, tels que l'intégration de la modélisation par éléments finis et de l'intelligence artificielle pour anticiper les contraintes biomécaniques et affiner les traitements. L'évolution des techniques de réalité augmentée et d'impression 3D, voire l'impression de tissus biologiques, laisse entrevoir des avancées majeures en matière de réhabilitation prothétique et de collaboration entre praticiens. Ces technologies contribuent à une approche plus préventive et prédictive de la santé bucco-dentaire, alignée avec les tendances modernes de la médecine 4P.

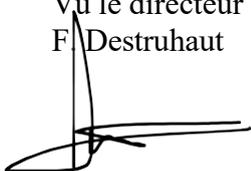
Cependant, ces promesses ne doivent pas occulter les défis éthiques majeurs liés à leur adoption. La gestion des données personnelles des patients représente un enjeu central. La collecte, le stockage et l'analyse des données sensibles nécessitent des garanties de sécurité robustes pour éviter tout piratage ou usage malveillant. La transparence sur les finalités de leur utilisation et l'obtention d'un consentement éclairé constituent des conditions sine qua non pour instaurer un climat de confiance. Par ailleurs, le consentement ne peut se limiter à un accord formel ; il doit s'accompagner d'une communication claire et didactique pour permettre aux patients de comprendre les implications de l'utilisation de leurs données de santé.

Un autre point de vigilance réside dans le risque de déshumanisation de la relation soignant-soigné. Si les technologies numériques offrent des outils puissants pour améliorer les soins, elles ne doivent pas prendre le pas sur la dimension humaine de la pratique médicale. Les praticiens doivent s'assurer que l'utilisation de ces outils renforce (plutôt que remplace) la communication et l'empathie envers leurs patients.

Enfin, l'inégalité d'accès à ces technologies innovantes constitue un enjeu sociétal majeur. Les coûts élevés des équipements et des formations nécessaires à leur utilisation risquent de creuser les disparités entre les structures de santé. Une réflexion doit être menée pour garantir une adoption équitable et pérenne de ces innovations.

Les jumeaux numériques représentent un tournant prometteur pour l'odontologie prothétique, mais leur intégration requiert une approche équilibrée, combinant progrès techniques, responsabilité éthique et accessibilité équitable. Ce n'est qu'en répondant à ces défis que cette révolution numérique pourra véritablement améliorer la qualité des soins tout en respectant les valeurs fondamentales (éthiques, déontologiques et humanistes) de la profession.

Vu le directeur de thèse
F. Destruhaut



Le Doyen,
Philippe POMAR



Bibliographie

1. VanDerHorn E, Mahadevan S. Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems* [Internet].2021 [cité 4 févr 2024]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167923621000348>
2. Attaran M, Celik BG. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal* [Internet].2023 [cité 15 nov 2023]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S277266222300005X>
3. Isah A, Shin H, Aliyu I, Oh S, Lee S, Park J, et al. A Data-Driven Digital Twin Network Architecture in the Industrial Internet of Things (IIoT) Applications [Internet]. arXiv; 2023 [cité 16 janv 2025]. Disponible sur: <https://arxiv.org/abs/2312.14930>
4. Grieves M. Origins of the Digital Twin Concept. 2016 [cité 4 févr 2024]; Disponible sur: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
5. Glaessgen E, Stargel D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference
20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference
14th AIAA [Internet]. Honolulu, Hawaii: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2012 [cité 11 févr 2024]. Disponible sur: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1818>
6. Stephen Ferguson. Apollo 13: The First Digital Twin [Internet]. Disponible sur: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
7. B Danette A. Digital Twins and Living Models at NASA. Digital Twin Summit; 2021; Virtual.
8. ARUP. digital twin report [Internet]. 2019. Disponible sur: www.arup.com/digitaltwinreport
9. Yildiz E, Møller C, Bilberg A. Virtual Factory: Digital Twin Based Integrated Factory Simulations. *Procedia CIRP* [Internet]. 2020 [cité 4 févr 2024];93:216-21. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827120306077>
10. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Internet]. 2014. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/275211047>
11. Fei Tao and Qinglin Qi. Virtual models boost smart manufacturing by simulating decisions and optimization, from design to operations. *NATURE*.2019;573.
12. Sifat MdMH, Choudhury SM, Das SK, Ahamed MdH, Muyeen SM, Hasan MdM, et

- al. Towards electric digital twin grid: Technology and framework review. *Energy and AI* [Internet]. 2023 [cité 26 mars 2024]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666546822000593>
13. Schrotter G, Hürzeler C. The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG* [Internet]. févr 2020 [cité 26 mars 2024]. Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s41064-020-00092-2>
14. Deng T, Zhang K, Shen ZJ (Max). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering* [Internet]. 2021 [cité 26 mars 2024] Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2096232021000238>
15. Renault group2024. Jumeau numérique des véhicules : quand les maquettes physiques et numériques se rejoignent [Internet]. Disponible sur: <https://www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/jumeau-numerique-des-vehicules-quand-les-maquettes-physiques-et-numeriques-se-rejoignent/>
16. Olivier Colmar. Data Science to Power Virtual Twin Experience 2023 with Renault | Dassault Systèmes ,.
17. AVSimulation. L'interview : La simulation massive. [Internet]. Disponible sur: <https://www.avsimulation.com/simulation-massive/?lang=fr#>
18. Dumas M, Fay AF, Charpentier E, Matricon J. Le jumeau numérique en santé: État des lieux et perspectives d'application à l'hôpital. *Med Sci (Paris)* [Internet]. 2023 [cité 12 mars 2024]. Disponible sur: <https://www.medecinesciences.org/10.1051/medsci/2023178>
19. on behalf of the Swedish Digital Twin Consortium, Björnsson B, Borrebaeck C, Elander N, Gasslander T, Gawel DR, et al. Digital twins to personalize medicine. *Genome Med* [Internet]. 2020 [cité 23 mars 2024]. Disponible sur: <https://genomemedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13073-019-0701-3>
20. Garg H. Digital twin technology: Revolutionary to improve personalized healthcare. *SPR* [Internet]. 2021 [cité 23 mars 2024]. Disponible sur: <https://sprjonline.com/menu-script/index.php/sprjonline/article/view/5/121>
21. Corral-Acero J, Margara F, Marciniak M, Rodero C, Loncaric F, Feng Y, et al. The 'Digital Twin' to enable the vision of precision cardiology. *European Heart Journal* [Internet]. 21 déc 2020 [cité 12 févr 2024];41(48):4556-64. Disponible sur: <https://academic.oup.com/eurheartj/article/41/48/4556/5775673>
22. De Backer O, Iriart X, Kefer J, Nielsen-Kudsk JE, Aminian A, Rosseel L, et al. Impact of Computational Modeling on Transcatheter Left Atrial Appendage Closure Efficiency and Outcomes. *JACC: Cardiovascular Interventions* [Internet]. 2023 [cité 2 avr 2024]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1936879823000080>

23. Karakra A, Fontanili F, Lamine E, Lamothe J. HospiT'Win: A Predictive Simulation-Based Digital Twin for Patients Pathways in Hospital. In: 2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI) [Internet]. Chicago, IL, USA: IEEE; 2019 [cité 23 mars 2024]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8834534/>
24. Croatti A, Gabellini M, Montagna S, Ricci A. On the Integration of Agents and Digital Twins in Healthcare. *J Med Syst* [Internet]. 2020 [cité 23 mars 2024]. Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1007/s10916-020-01623-5>
25. François Duret. Empreinte Optique [Internet]. Claude Bernard lyon; 1974. Disponible sur : <http://www.francoisduret.com/wp-content/uploads/2021/11/1.Web-2021.FD-page-3.1.these-originale-73-FR-V-finale-80-mo-OK.pdf>
26. Chiu A, Chen YW, Hayashi J, Sadr A. Accuracy of CAD/CAM Digital Impressions with Different Intraoral Scanner Parameters. *Sensors* [Internet]. 2020 [cité 2 janv 2025]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/4/1157>
27. Reda tebbal. Formation CFAO dentaire [Internet]. 2022 [cité 23 mars 2024]. Disponible sur: www.cadent.fr
28. Fages M, Ducret M. L'empreinte optique... en toute simplicité. 2020;VOL 5(N°1).
29. ORTHLIEB JD, MANIERE-EZVAN A. *Occluseur*. 2006;(28):1-2.
30. Duminil G. Apport du numérique dans la gestion de l'occlusion. (44(426)):441-9.
31. Paras A. Understanding STL, PLY, and OBJ Files in Digital Dentistry [Internet]. Institute of Digital Dentistry. Disponible sur: <https://instituteofdigitaldentistry.com/3d-printing/understanding-stl-ply-obj-files-in-digital-dentistry/?srsltid=AfmBOornlRrjfLJXKai0DXJDP9miJXAf9u94HbGj6gabQq6aovDGv18U>
32. Additional tool for face stage [Internet]. Medit help center. Disponible sur: https://support.medit.com/hc/en-us/articles/360039712451--Face?utm_term=&utm_campaign=Global_Pmax&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2123725819&hsa_cam=21666524553&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA4fi7BhC5ARIsAEV1YiZsc73mbpxnEhZbg1hLR0BLQoqG3CmYGNLrn9R09tCjNnV1uJdemMYaAg6vEALw_wcB
33. Machado AC, Phillips TS, Zimmerman R, Scaramucci T, Amaechi BT. Monitoring erosive tooth wear with intraoral 3D scanner: A feasibility study. *Am J Dent*. févr 2022;35(1):49-54.
34. MY MA, BAS L, NASR K. Apport du numérique dans le suivi du patient dans le

temps: application aux cas d'usure dentaire. 31 mai 2023;(22/23):38-44.

35. AYALA PAZ CaA. The workbook. 2017. (Quintessence).
36. Grégory Camaleonte AJF. Analyse esthétique de la face et du sourire: protocole photographique. 2019;30(3):175-80.
37. Akan B, Akan E, Şahan AO, Kalak M. Evaluation of 3D Face-Scan images obtained by stereophotogrammetry and smartphone camera. International Orthodontics [Internet]. 2021 [cité 9 janv 2025];19(4):669-78. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1761722721001145>
38. Destruhaut F, Caire JM, Dubuc A, Pomar P, Rignon-Bret C, Naveau A. Evolution of facial prosthetics: Conceptual history and biotechnological perspectives. Int J Maxillofac Prosthetics [Internet]. 2021 [cité 9 janv 2025];4(1):2-8. Disponible sur: <https://ijmp.com/index.php/ijmp/article/view/14/14>
39. Jindanil T, Xu L, Fontenele RC, Perula MCDL, Jacobs R. Smartphone applications for facial scanning: A technical and scoping review. Orthod Craniofac Res [Internet]. 2024 [cité 9 janv 2025];27(S2):65-87. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ocr.12821>
40. Inoue N, Scialabba R, Lee JD, Lee SJ. A comparison of virtually mounted dental casts from traditional facebow records, average values, and 3D facial scans. The Journal of Prosthetic Dentistry [Internet]. 2024 [cité 9 janv 2025];131(1):136-43. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022391322001469>
41. Amezua X, Iturrate M, Garikano X, Solaberrieta E. Analysis of the impact of the facial scanning method on the precision of a virtual facebow record technique: An in vivo study. The Journal of Prosthetic Dentistry [Internet]. 2023 [cité 8 janv 2025];130(3):382-91. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022391321006247>
42. Nogueira-Reis F, Morgan N, Suryani IR, Tabchoury CPM, Jacobs R. Full virtual patient generated by artificial intelligence-driven integrated segmentation of craniomaxillofacial structures from CBCT images. Journal of Dentistry [Internet]. 2024 [cité 9 janv 2025]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571223004153>
43. Recommandations HAS ,Tomographie volumique à faisceau conique de la face (cone beam computerized tomography),2009.
44. Bapelle M, Dubromez J, Savoldelli C, Tillier Y, Ehrmann E. Modjaw® device: Analysis of mandibular kinematics recorded for a group of asymptomatic subjects. CRANIO® [Internet]. 2024 [cité 4 janv 2025]. Disponible sur: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08869634.2021.2000790>
45. Felenc S, Lethuillier S. L'intégration des jumeaux numériques en dentisterie:

innovations et perspectives. nov 2024;(198):34-40.

46. Baldassarre G, Francesco L, Francesco C, Baldassarre R. Full Digital rehabilitation in TMD patient. *Journal of Dentistry* [Internet]. 2022 [cité 4 janv 2025]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571222000975>
47. Soboleva U, Laurina L, Slaidina A. Jaw tracking devices - historical review of methods development. Part I. 2005;7(3).
48. L'Intelligence artificielle au service de la pratique dentaire [Internet]. 2022. Disponible sur: https://www.youtube.com/watch?v=a8_nbt4o9nE
49. Hugger S, Schindler HJ, Kordass B, Hugger A. Clinical relevance of surface EMG of the masticatory muscles. (Part 1): Resting activity, maximal and submaximal voluntary contraction, symmetry of EMG activity. *Int J Comput Dent*. 2012;15(4):297-314.
50. Destruhaut F, Hourset M, Vidal L, Naveau A, Champion B, Hennequin A, et al. Apport de l'électro- myographie en prothèse maxillo-faciale.
51. LEBON A, CUNY C, BARBE S, Destruhaut F, RAYNALDY. La dimension verticale en prothèse complète: approches conventionnelles et inovantes. 34(2):70-83.
52. Esclassan R, Rumerio A, Monsarrat P, Combadazou JC, Champion J, Destruhaut F, et al. Optimal duration of ultra low frequency-transcutaneous electrical nerve stimulation (ULF-TENS) therapy for muscular relaxation in neuromuscular occlusion: A preliminary clinical study. *CRANIO®* [Internet]. 2017 [cité 8 janv 2025];35(3):175-9. Disponible sur: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08869634.2016.1171479>
53. Geng JP, Tan KBC, Liu GR. Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature. *The Journal of Prosthetic Dentistry* [Internet]. 2001 [cité 13 janv 2025]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022391301574314>
54. Chawla S, Deshmukh S. FEAR no more! Finite element analysis in orthodontics. *J Int Clin Dent Res Organ* [Internet]. 2022 [cité 13 janv 2025]. Disponible sur: <http://www.jicdro.org/text.asp?2022/14/1/6/349758>
55. Rodriguez-Salvador M, Ruiz-Cantu L. Revealing emerging science and technology research for dentistry applications of 3D bioprinting. *IJB* [Internet]. 2018 [cité 9 janv 2025];. Disponible sur: <https://accscience.com/journal/IJB/5/1/10.18063/ijb.v5i1.170>
56. Shusterman A, Nashef R, Tecco S, Mangano C, Lerner H, Mangano FG. Accuracy of implant placement using a mixed reality-based dynamic navigation system versus static computer-assisted and freehand surgery: An in Vitro study. *Journal of Dentistry* [Internet]. 2024 [cité 9 janv 2025]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571224002215>

57. Shusterman A, Nashef R, Tecco S, Mangano C, Mangano F. Implant placement using mixed reality-based dynamic navigation: A proof of concept. *Journal of Dentistry* [Internet]. 2024 [cité 9 janv 2025]. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571224004251>

58. Favela LH, Amon MJ. The ethics of human digital twins: Counterfeit people, personhood, and the right to privacy. In: 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI) [Internet]. Orlando, FL, USA: IEEE; 2023 [cité 17 janv 2025]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10365409/>

Table des figures

Figure 1 : Représentation imagée du jumeau numérique en prothèse maxillo-faciale. (Source : ChatGPT 4.0)	13
Figure 2 : Schéma architectural simplifié du jumeau numérique.....	14
Figure 3 : Simulateurs pour les missions Apollo : un prédécesseur de la technologie du jumeau numérique. (Source : NASA)	15
Figure 4 : Écosystème du jumeau numérique d'un véhicule chez Renault Group.....	17
Figure 5 : Conception du Mock up virtuel par l'équipe de designers. (Source : Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE FORUM)	18
Figure 6 : Phase d'ingénierie et test. (Source : Dassault Systèmes 3DEXPERIENCE FORUM)	19
Figure 9 : The digital twin concept to personalized medicine (Source : Björnsson et al. genome medicine).....	20
Figure 10 : Étapes chronologiques de la planification prothétique	
Figure 11 : Écart mesuré entre scanner de référence et scan intra-oral (26)	22
Figure 12 : Exemple de scanner de bureau en cours de numérisation (27)	25
Figure 13 : Chronologie de reconstruction : nuage de points, maillage, texture, couleur (28)	28
Figure 14 : Manipulation d'une empreinte numérique (30).....	31
Figure 15 : Fichier STL. (31).....	32
Figure 16 : Fichier au format PLY. à gauche et OBJ. à droite (31).....	32
Figure 17 : Exemple de système compact iTero Lumina™ en version chariot et mobile. (Source : iTero)	33
Figure 18 : Exemple de caméras seules (A) 3shape trios 5 sans fil (B) Medit i700w sans fil (C)Medit i900 filaire. (Source :Medit et 3shape).....	32
Figure 19 : Exemple de possibilités d'assemblage et de création d'un jumeau numérique du patient.(Source : Medit help center).....	35

Figure 20 : Exemple de comparaison de scans à l'aide du logiciel 3Shape patient Monitoring (34)	35
Figure 21 : Matériel nécessaire pour réaliser un protocole photographique. (Source : Grégory Camaleonte)	37
Figure 22 : Utilisation d'un scanner facial aligné avec une empreinte intraorale pour programmer un articulateur virtuel selon les plans de référence (37).....	38
Figure 23 : Scan facial pour la réalisation d'épithèses faciales. (Source : consultation de prothèse maxillo-faciale, CHU Rangueil)	38
Figure 24 : A) Scanner facial mobile : Face Hunter Zirkonzahn®. B) Scanner facial fixe : RAYFace Raymedical®. (Source : Zirkonzahn® et Raymedical®).	39
Figure 25 : Exemple d'unit d'imagerie CBCT. (Source : Planmeca Viso® G7)	40
Figure 26 : Segmentation automatique à partir d'un CBCT (41).....	41
Figure 27 : A) Matching du CBCT avec l'empreinte optique et le wax-up numérique. B) Planification implantaire basée sur le projet prothétique (42)	41
Figure 28 : K1 Myotronics® 1971 à gauche et K7x evaluation system Myotronics® à droite (35)	42
Figure 29 : Système Modjaw. (Source : Modjaw®).....	43
Figure 30 : Dispositif Modjaw « Tech In Motion ». (Source : Modjaw®).....	43
Figure 31 : Impression d'écran du logiciel TWIM. (Source : Modjaw®).....	44
Figure 32 : Mise en place du SMILIT. (Source : Modjaw®).....	45
Figure 33 : Étalonnage du système. (Source : Modjaw®).....	46
Figure 34 : 1) Visualisation des mouvements du patient avec les éléments choisis du jumeau numérique assemblés (Source : Webinaire Modjaw®).....	46
Figure 35 : Visualisation de l'intensité et de la répartition des contacts intercuspidiens lors de la fonction. (Source : Webinaire Modjaw®).....	47
Figure 36 : Visualisation de la superposition du scan facial, CBCT segmenté en STL, empreinte optique, cinématique mandibulaire et plan de références. (Source : Webinaire Modjaw®).....	47
Figure 37 : Visualisation de la superposition du facescan, empreinte optique,	

cinématiques mandibulaires et plan de références.(Source : Webinaire Modjaw®)	47
Figure 38 : Réglage de l'articulateur virtuel sur Exocad (source : Modjaw®) ...	48
Figure 39 : "The ART-HU-R articulator". (Source : ITAKA®).....	49
Figure 40 : Visuel type d'une radiographie dentaire traitée par le logiciel d'Allisone.AI. (Source : Allisone.AI)	52
Figure 41 : Protocole MAC1 d'enregistrement de l'activité musculaire par électromyographie. (Source : MAC1)	53
Figure 43 : Évaluation de la chronologie de contraction (MAC2) (48).....	55
Figure 44 : Évaluation de la force de contraction (MAC3) (48).....	55

Annexes

Lexique

Cloud : Le cloud computing (en français, « informatique dans les nuages ») fait référence à l'utilisation de la mémoire et des capacités de calcul des ordinateurs et des serveurs répartis dans le monde entier et liés par un réseau. Les applications et les données ne se trouvent plus sur un ordinateur déterminé mais dans un nuage (cloud) composé de nombreux serveurs distants interconnectés. (CNIL) ce qui diminue généralement les exigences de configuration matérielle sur l'appareil de l'utilisateur.

Logiciel SaaS : Un logiciel SaaS (Software as a Service) est un logiciel en tant que service. Cela signifie que le logiciel est accessible via internet, sans avoir à installer quoi que ce soit sur son ordinateur. (Francenum.gouv.fr).

L'IoT : (Internet of Things ou Internet des objets) désigne les objets dotés de capacités de communication et de traitement des données. Son fonctionnement repose sur trois éléments clés : les objets connectés, la connectivité et le traitement des données. Les objets connectés recueillent des données grâce à des capteurs intégrés (par exemple des capteurs de température, de mouvement, de lumière). Ces données sont ensuite transmises via une connexion Internet à des serveurs ou à d'autres objets connectés. Une fois les données collectées, elles sont analysées, traitées et utilisées pour prendre des décisions, déclencher des actions ou générer des informations utiles (grande école numérique.fr).

Infrastructure HPC : Le calcul haute performance (HPC, High Performance Computing), également appelé Big Compute, utilise un grand nombre d'ordinateurs basés sur processeur ou GPU pour résoudre des tâches mathématiques complexes (learn.microsoft.com)

API : (application programming interface ou « interface de programmation d'application ») est une interface logicielle qui permet de « connecter » un logiciel ou un service à un autre logiciel ou service afin d'échanger des données et des fonctionnalités (CNIL)

L'ESSOR DU JUMENTAUM NUMERIQUE DANS LA PLANIFICATION PROTHETIQUE : ENJEUX ET OPPORTUNITES

RESUME EN FRANÇAIS :

Cette thèse explore l'utilisation du jumeau numérique dans la planification prothétique en odontologie, en mettant en avant ses fondements théoriques, ses outils technologiques et ses applications cliniques. Après une présentation du concept et de son évolution historique, les domaines d'application, notamment dans l'industrie et la santé, sont étudiés afin de contextualiser son intégration en odontologie. L'analyse porte sur les étapes de collecte et d'exploitation des données nécessaires à la création du jumeau numérique du patient, en détaillant les outils et logiciels disponibles. Les opportunités offertes par les technologies numériques, telles que l'intelligence artificielle et la modélisation biomécanique, sont également examinées, tout comme les enjeux éthiques qu'elles soulèvent. Ce travail offre un cadre de réflexion et de compréhension sur les avancées actuelles et les perspectives futures du jumeau numérique dans la planification prothétique.

TITRE EN ANGLAIS: The Rise of Digital Twins in Prosthetic Planning: Challenges and Opportunities

This thesis explores the use of digital twins in prosthetic planning in dentistry, highlighting its theoretical foundations, technological tools, and clinical applications. Following an introduction to the concept and its historical evolution, areas of application, particularly in industry and healthcare, are examined to contextualize its integration into dentistry. The analysis focuses on the steps involved in data collection and utilization for creating the patient's digital twin, detailing the available tools and software. Opportunities offered by digital technologies, such as artificial intelligence and biomechanical modeling, are also explored, along with the ethical challenges they pose. This work provides a framework for understanding and reflecting on the current advancements and future prospects of digital twins in prosthetic planning.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLES : Jumeau numérique, Conception fabrication assistée par ordinateur, Planification prothétique, Scanner facial, médecine 4P.
Digital twin, Computer-aided design and manufacturing (CAD/CAM), Prosthetic planning, Facial scanner, 4P medicine.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université de Toulouse
Faculté de santé – Département d'Odontologie 3 chemin des Maraîchers 31062
Toulouse Cedex 09

Directeur de thèse : Pr Florent DESTRUHAUT