

UNIVERSITÉ DE NANTES
UNITÉ DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

Année 2020

N° 3661

Nouvelles technologies et orthodontie : état des lieux et perspectives en 2020

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE
DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée
et soutenue publiquement par

LEROUX Thomas

Né le 04/01/1993



Le 28 septembre 2020 devant le jury ci-dessous

Président : Monsieur le Professeur Bernard GIUMELLI

Assesseur : Madame la Docteur Fabienne JORDANA

Assesseur : Monsieur le Docteur Xavier BOUCHET

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Marc-Henri NIVET

UNIVERSITE DE NANTES	
<u>Présidente</u> Pr BERNAULT Carine	
 <small>UNIVERSITE DE NANTES</small>	
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE	
<u>Doyen</u> Pr GIUMELLI Bernard	
<u>Assesseurs</u> Dr RENAUDIN Stéphane Pr SOUEIDAN Assem Pr WEISS Pierre	
 <small>Faculté de Chirurgie Dentaire NANTES</small>	
PROFESSEURS DES UNIVERSITES PRATICIENS HOSPITALIERS DES C.S.E.R.D.	
Mme ALLIOT-LICHT Brigitte	M. LESCLOUS Philippe
M. AMOURIQ Yves	Mme PEREZ Fabienne
M. GIUMELLI Bernard	M. SOUEIDAN Assem
M. LE GUEHENNEC Laurent	M. WEISS Pierre
PROFESSEURS DES UNIVERSITES	
M. BOULER Jean-Michel	
MAITRE DE CONFERENCES DES UNIVERSITES	
Mme VINATIER Claire	
PROFESSEURS EMERITES	
M. JEAN Alain	
ENSEIGNANTS ASSOCIES	
M. GUIHARD Pierre (Professeur Associé)	Mme LOLAH Aoula (Assistant Associé)
MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES PRATICIENS HOSPITALIERS DES C.S.E.R.D.	ASSISTANTS HOSPITALIERS UNIVERSITAIRES DES C.S.E.R.D.
M. AMADOR DEL VALLE Gilles	M. ALLIOT Charles
Mme ARMENGOL Valérie	Mme ARRONDEAU Mathilde
Mme BLERY Pauline	Mme BARON Charlotte
M. BODIC François	M. BOUCHET Xavier
Mme CLOITRE Alexandra	Mme CLOUET Roselyne
Mme DAJEAN-TRUDAUD Sylvie	M. FREUCHET Erwan
M. DENIS Frédéric	M. GUIAS Charles
Mme ENKEL Bénédicte	Mme HASCOET Emilie
M. GAUDIN Alexis	Mme HEMMING Cécile
M. HOORNAERT Alain	M. HIBON Charles
Mme HOUCHMAND-CUNY Madline	M. HUGUET Grégoire
Mme JORDANA Fabienne	M. KERIBIN Pierre
M. LE BARS Pierre	M. OUVARD Pierre
Mme LOPEZ-CAZAUX Serena	M. RETHORE Gildas
M. NIVET Marc-Henri	M. SERISIER Samuel
M. PRUD'HOMME Tony	Mme TISSERAND Lise
Mme RENARD Emmanuelle	
M. RENAUDIN Stéphane	
Mme ROY Elisabeth	
M. STRUILLLOU Xavier	
M. VERNER Christian	
PRATICIENS HOSPITALIERS	
Mme DUPAS Cécile (Praticien Hospitalier)	Mme QUINSAT Victoire (Praticien Hospitalier Attaché)
Mme BRAY Estelle (Praticien Hospitalier Attaché)	Mme RICHARD Catherine (Praticien Hospitalier Attaché)
Mme LEROUXEL Emmanuelle (Praticien Hospitalier Attaché)	Mme HYON Isabelle (Praticien Hospitalier Contractuel)

Par délibération, en date du 6 décembre 1972, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'il n'entend leur donner aucune approbation, ni improbation

Remerciements

À Monsieur le Professeur Bernard GIUMELLI,
Doyen de l'UFR Odontologie de Nantes,
Département de Prothèses

-NANTES-

Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de présider ma thèse.

Avec mon profond respect.

À Monsieur le Docteur Marc-Henri NIVET,
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires
Département d'Orthopédie Dento-Faciale

-NANTES-

Je vous remercie grandement de m'avoir fait l'honneur de diriger ma thèse.

Votre aide et votre disponibilité durant ce travail m'ont été essentielles.

*Vous avez su poser les bases de ce travail tout en me laissant la liberté de rédiger à
ma façon.*

Vous avez toute ma reconnaissance et mon estime.

À Madame la Docteur Fabienne JORDANA

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier des Centres de Soins
d'Enseignement et de Recherche Dentaires

Docteur de l'Université de Bordeaux

Département de Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques,
Biomatériaux, Biophysique, Radiologie.

-NANTES-

*Merci beaucoup d'avoir accepté de participer à ce jury de thèse.
Votre gentillesse, votre disponibilité et la qualité de votre enseignement tout au long
de mon cursus font de vous une personne que j'estime beaucoup.*

Avec toute ma reconnaissance.

À Monsieur le Docteur Xavier BOUCHET
Assistant Hospitalier Universitaire des Centres de Soins d'Enseignement et de
Recherche Dentaires
Département d'Odontologie Conservatrice et Pédiatrique

-NANTES-

*Merci d'avoir accepté de participer à ce jury de thèse.
Merci pour ton engagement auprès des étudiants, pour ta disponibilité, pour la
qualité de ton enseignement et tous ces moments de convivialité dans et hors
de la faculté.*

Avec mon profond respect et mon amitié.

Table des matières

1.	RELATION PATIENT-PRATICIEN	10
1.1.	LE SITE INTERNET DU CABINET	10
1.1.1.	<i>Intérêt du site internet professionnel</i>	<i>10</i>
1.1.2.	<i>Règles à respecter</i>	<i>12</i>
1.1.3.	<i>Possibilités de création et contenu</i>	<i>13</i>
1.2.	LES PLATEFORMES DE GESTION D'AGENDA ET DE PRISES DE RENDEZ-VOUS.....	13
1.2.1.	<i>Présentation</i>	<i>13</i>
1.2.2.	<i>Utilisation</i>	<i>14</i>
1.2.3.	<i>Avantages.....</i>	<i>15</i>
1.2.4.	<i>Inconvénients, limites et controverses.....</i>	<i>16</i>
1.3.	PLATEFORME DE SUIVI ET MOTIVATION A DISTANCE	17
1.3.1.	<i>Présentation et intérêt</i>	<i>17</i>
1.3.2.	<i>Exemple de services existants.....</i>	<i>19</i>
2.	ACQUISITION NUMERIQUE DES DONNEES CLINIQUES DU PATIENT	21
2.1.	NUMERISATION INDIRECTE : SCANNER EXTRAORAL.....	22
2.2.	NUMERISATION DIRECTE : EMPREINTE NUMERIQUE INTRA-ORALE.....	24
2.2.1.	<i>Présentation et fonctionnement de la caméra intra-orale</i>	<i>25</i>
2.2.2.	<i>Avantages et inconvénients.....</i>	<i>27</i>
2.2.3.	<i>Différentes offres du marché.....</i>	<i>28</i>
2.3.	ACQUISITION VIA TECHNIQUES RADIOGRAPHIQUES	29
2.3.1.	<i>La radiographie 2D.....</i>	<i>30</i>
2.3.2.	<i>La radiographie 3D.....</i>	<i>31</i>
2.3.3.	<i>Évaluation du risque lié à la dose</i>	<i>34</i>
2.4.	PHOTOGRAPHIE NUMERIQUE ET SCANNER FACIAL	35
2.4.1.	<i>Acquisition de données en deux dimensions</i>	<i>35</i>
2.4.2.	<i>Acquisition de données 3D : le scanner facial.....</i>	<i>36</i>
2.5.	LES MODELES NUMERIQUES.....	39
2.5.1.	<i>Présentation</i>	<i>39</i>
2.5.2.	<i>Avantages et intérêts des modèles numériques.....</i>	<i>40</i>
2.5.3.	<i>Inconvénients et limites :</i>	<i>41</i>
2.5.4.	<i>Comparaison entre modèles numériques et modèles en plâtre</i>	<i>41</i>
2.5.5.	<i>Possibilités des logiciels.....</i>	<i>41</i>
3.	APPORT DU NUMERIQUE AUX APPLICATIONS THERAPEUTIQUES	44
3.1.	LE SETUP NUMERIQUE	44
3.1.1.	<i>Le setup traditionnel.....</i>	<i>44</i>
3.1.2.	<i>Le setup numérique</i>	<i>45</i>
3.1.3.	<i>Setup traditionnel VS setup virtuel</i>	<i>47</i>
3.2.	TRAITEMENT PAR ALIGNEURS.....	49
3.2.1.	<i>Principe.....</i>	<i>49</i>
3.2.2.	<i>Invisalign de Align Technology (83).....</i>	<i>50</i>
3.2.3.	<i>TwinAligners de OrthoCaps</i>	<i>51</i>
3.2.4.	<i>Conception et fabrication des aligneurs au cabinet</i>	<i>52</i>
3.3.	THERAPEUTIQUES FIXES PAR COLLAGE INDIRECT.....	53
3.3.1.	<i>Thérapeutique fixe vestibulaire par collage indirect</i>	<i>53</i>
3.3.2.	<i>Thérapeutique fixe lingual par collage indirect</i>	<i>59</i>
3.4.	IMPRIMANTE 3D.....	61
3.4.1.	<i>Différents types d'impression 3D.....</i>	<i>61</i>
3.4.2.	<i>Utilisation, intérêt et limite des imprimantes 3D.....</i>	<i>62</i>
3.4.3.	<i>Les différentes offres d'imprimantes.....</i>	<i>64</i>

Introduction

Au cours des dernières années, les innovations technologiques se sont succédées, de plus en plus rapidement et sont de plus en plus poussées. Certaines sont même devenues indispensables dans notre quotidien à l'image des smartphones. Mais ces innovations ne se limitent pas à ce que l'on pourrait considérer comme des gadgets, ce sont toutes les bases de notre société qui sont en pleine reconstruction et en quête d'une identité nouvelle. Le numérique, en 2020, bouleverse et tend à redéfinir le paradigme social. (1)

Dans le domaine de la santé, l'approche et la relation praticien-patient ont évolué en même temps que la technologie. A l'instar de l'industrie ou du web, il existe plusieurs niveaux d'évolution dans le domaine de la santé. De la santé 1.0, où il existait seulement une relation praticien-patient de cabinet, passant par 2.0 (intégration d'internet et du savoir mis en commun au sein de cette relation), puis 3.0 (apport de la téléconsultation, permettant des relations à distance entre praticien et patient) et enfin bientôt 4.0 (avènement de l'intelligence artificielle, système médicaux autonomes, robotique,...).(2)

L'évolution si rapide de tout cela apparaît à la fois comme excitante et terrifiante. A ce rythme on est en droit de se poser la question de la place du praticien dans quelques années. Ainsi pour ne pas se laisser submerger par toutes ces innovations technologiques, il faut rester à jour et apprendre à communiquer de la bonne manière avec ses patients.

La patientèle aussi évolue, les patients traités aujourd'hui sont très majoritairement nés dans les années 2000 et leurs parents font partie de la génération des milléniales. Cette génération ne répond pas aux mêmes codes que la génération précédente. Ainsi afin de communiquer et s'adresser au mieux à cette population, il est nécessaire de maîtriser leurs outils de prédilection, à savoir internet et les nouvelles technologies. (3)

Le but de cette thèse est ainsi de faire un éventail, souhaité aussi large que précis, de toutes les innovations et du développement digital apparus ces dernières années en orthodontie. Nous verrons cela sous plusieurs axes. Premièrement c'est l'axe de la communication avec le patient qui sera étudié, ensuite nous détaillerons toutes les technologies développées pour l'enregistrement et la conversion numérique des données cliniques. Enfin les nouvelles possibilités de traitement grâce à ces nouvelles technologies seront développées.

1. Relation patient-praticien

La relation entre le praticien et le patient présente plusieurs aspects. L'aspect essentiel de cette relation est la communication. Celle-ci, si elle est de bonne qualité permet d'installer une relation de confiance entre les deux partis, augmentant ainsi l'observance du patient et permettant au praticien de mieux cerner les attentes et besoins de ce dernier. Dans le domaine de la communication, il existe de nouveaux outils modifiant l'approche du patient par rapport au praticien. (4)

Le premier contact du patient avec le cabinet est très important, il donnera au patient sa première impression. Si ce premier contact se passe via internet, il est important que le cabinet possède un site internet, et que celui-ci soit agréable tant d'un point de vue esthétique, que d'un point de vue ergonomique.

1.1. Le site internet du cabinet

En 2019, de moins en moins de personnes utilisent un annuaire téléphonique physique. Très souvent lorsqu'un patient recherche un praticien il s'orientera vers internet et le moteur de recherche le plus utilisé, à savoir Google. Dans le cas de l'orthodontie, cette discipline étant une spécialité, très souvent le patient sera adressé par son omnipraticien. Mais cette démarche tend à diminuer, surtout dans la situation où plusieurs professionnels se trouvent dans un périmètre proche.(5)

1.1.1. Intérêt du site internet professionnel

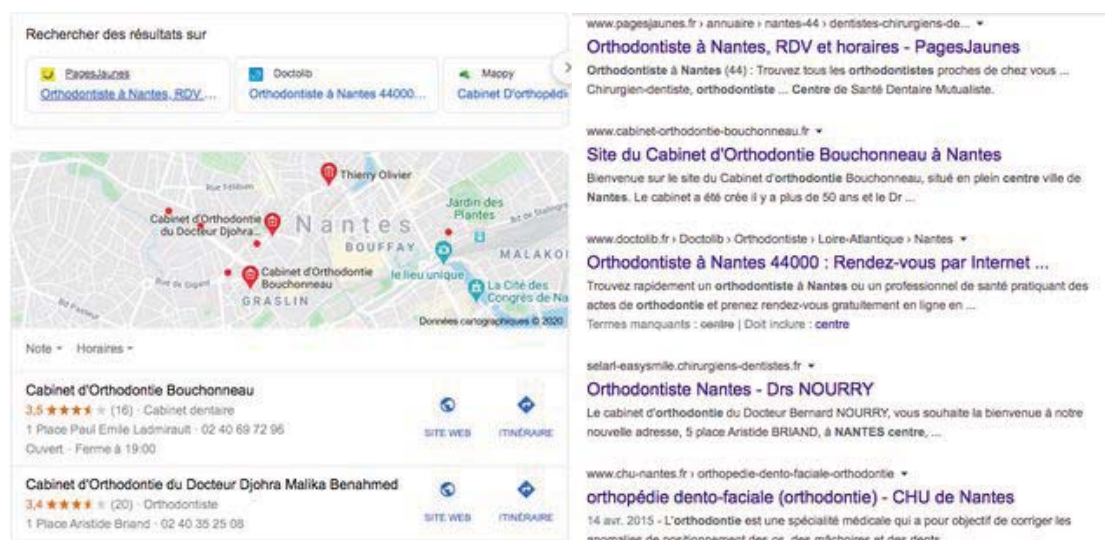
Le site internet du cabinet, c'est une vitrine dématérialisée, accessible à tous et de partout. Il est un endroit où l'on peut décrire son parcours, montrer son savoir-faire, présenter des photos du cabinet. C'est de ce fait la carte de visite du praticien.

En ce sens, le site professionnel est un moyen de communication entre le cabinet et le patient. Il y trouvera toutes les informations nécessaires en cas de besoin : numéro de téléphone, adresse, adresse mail, formulaire de contact pour demande de rendez-vous. Cela permet ainsi au patient de contacter le cabinet hors des heures d'ouverture de celui-ci.

Un autre grand intérêt du site internet professionnel est d'augmenter sa visibilité sur la toile et notamment lors des recherches Google. Si un patient tape les mots clés « orthodontiste » + le nom d'une ville, dans le moteur de recherche que trouvera-t-il ? Peu importe la ville, le même schéma est toujours présent, et on trouve par ordre d'apparition :

- Une petite carte du centre de la ville avec des icônes rouges indiquant la position géographique des différents cabinets

- Une liste de 3 cabinets d'orthodontie comportant le nom, la note donnée par des internautes/patients, l'adresse, le numéro de téléphone, les horaires d'ouverture et de fermeture, ainsi qu'un lien vers le site internet du cabinet et l'itinéraire vers celui-ci ;
- Un lien vers le site internet www.doctolib.fr, regroupant les praticiens permettant une prise de rendez-vous via la plateforme ;
- Un lien vers le site internet www.pagesjaunes.fr, référençant les différents praticiens de la ville avec leurs coordonnées ;
- Enfin après tout cela, on trouve les liens vers les différents sites internet professionnel des orthodontistes de la ville en question.



Exemple de recherche Google pour un orthodontiste à Nantes

Ainsi on comprend aisément l'importance de posséder un site internet professionnel, facilitant le contact avec le patient, mais aussi l'importance de son référencement sur Google. Car avec le système de notation via les étoiles et l'outil Google, la réputation d'un cabinet peut être mise à mal en seulement quelques clics. Dans une société où la visibilité d'une structure passe de plus en plus via internet et Google, il est important de faire attention à son image numérique au moins autant qu'à l'architecture de son cabinet.

Enfin, le site internet professionnel permet de fournir une information de qualité au patient. En effet, aujourd'hui il est aisé de trouver tout et n'importe quoi sur divers sujets, seulement en tapant quelques mots clés sur un moteur de recherche. Différents forums, blogs, magazine internet et site publicitaires existent et propagent une information parfois discutable dans plusieurs domaines.(6) L'orthodontie n'est pas exempte de ce phénomène, au contraire, et nombreux sont les patients qui iront rechercher des informations sur leur traitement avant ou après une consultation chez un praticien. De ce fait, il est possible d'insérer dans le site internet du cabinet, des fiches récapitulatives ciblant les sujets

intéressants pour les patients, tels que les types de malformations, les types de traitements, des conseils d'hygiène bucco-dentaires ou encore des vidéos pédagogiques pour les plus jeunes.

1.1.2. Règles à respecter

Comme pour tous les domaines, et avec l'évolution des technologies, des règles ont été mises en place afin d'encadrer la création du site internet professionnel : « L'information en ligne peut améliorer la qualité de l'exercice professionnel et le service rendu aux patients. Toutefois, la modernité et la liberté qu'offre ce réseau planétaire n'excluent pas le respect de l'éthique et de la déontologie. S'appuyant sur les règles du code de déontologie, la charte ordinale applicable aux sites internet professionnels des chirurgiens-dentistes s'applique « au site internet de tout chirurgien-dentiste, personne physique ou morale, inscrit au tableau de l'Ordre. ». (7)

De ce fait, il faudra veiller à respecter à la fois la réglementation qui s'applique aux sites internet et celle applicable à la profession de chirurgien-dentiste. La règle essentielle de la profession est l'interdiction de pratiquer la dentisterie comme un commerce (article R. 4127-215 du Code de la santé publique) et de ce fait le site internet professionnel ne doit pas être un moyen promotionnel. (7)

D'après la charte ordinale applicable aux sites internet des chirurgiens-dentistes (7) : « Il est conseillé aux praticiens de demander la certification de leur site auprès de la Fondation Health On the Net (HON), choisie par la Haute Autorité de Santé (HAS), cette fondation vérifie que le site respecte les critères de qualité qui suivent :

- L'autorité du rédacteur : le site doit indiquer la qualification du ou des rédacteur(s)
- La complémentarité, le site devant venir en complément, et non en remplacement de la relation du praticien avec son patient ;
- La confidentialité, le site devant préserver la confidentialité des informations personnelles soumises par les visiteurs du site ;
- L'attribution : la source des informations publiées doit être citée ; les pages contenant des informations médicales doivent être datées ;
- La justification : toute affirmation sur les bienfaits ou les inconvénients de traitements doit être justifiée ;
- Le professionnalisme : l'information doit être la plus accessible possible ; le webmestre doit être identifié ; une adresse de contact doit être fournie ;
- La transparence du financement : les sources de financement doivent être indiquées ;
- L'honnêteté dans la publicité et la politique éditoriale – étant rappelé que le site d'un chirurgien-dentiste ne doit pas contenir de publicité. »

« La Fondation Health On the Net (HON) n'a pas pour mission de vérifier que le site d'un praticien est conforme au Code de la santé publique, et notamment à son Code de déontologie. Ainsi une certification HON ne garantit pas le respect de sa déontologie par le titulaire du site.

De son côté, le Conseil de l'Ordre ne délivre aucun agrément aux sites Internet des praticiens. S'il constate qu'un site est contraire aux dispositions du Code de la santé publique, il peut décider de poursuivre le praticien titulaire du site devant les juridictions ordinaires (article R. 4126-1 du Code de la santé publique). » (7)

Il existe aussi des règles sur le nom de domaine du site internet. Le nom de domaine doit correspondre à un modèle, différent selon que celui-ci soit au nom :

- Du propriétaire du cabinet : « dr-nom d'inscription-prenom.chirurgiens-dentistes.fr » ou « docteur-nom d'inscription-prenom.chirurgiens-dentistes.fr » ou « nom d'inscription-prenom.chirurgiens-dentistes.fr »
- De la SELARL : « selarl-dénomination sociale.chirurgiens-dentistes.fr »
- De la société civile professionnelle : « scp-dénomination sociale.chirurgiens-dentistes.fr »
- Collaborateur salarié/libéral : ils peuvent apparaître sur le site internet du titulaire du cabinet ou avoir leur propre site internet. Celui-ci est alors du même type que le premier cas.

1.1.3. Possibilités de création et contenu

En ce qui concerne la création du site internet, plusieurs solutions existent :

- Création entièrement via une plateforme en ligne : ces plateformes permettent la création facilitée du site web. Toute la structure du site est déjà préexistante, le praticien personnalise son site grâce à des outils en modifiant le thème, les couleurs, l'insertion de sous-parties souhaitées, de photographies, etc.. ;
- Création via une agence web : L'agence web crée le site internet du praticien selon sa demande. La maintenance et l'actualisation du site est aussi gérée par l'agence.

De nombreux acteurs proposent différentes solutions, avec des prix et des prestations différentes. Chacun trouvera ce qui lui conviendra le mieux.

1.2. Les plateformes de gestion d'agenda et de prises de rendez-vous

1.2.1. Présentation

Classiquement la prise de rendez-vous se fait via un appel téléphonique du patient au cabinet, ou bien celui-ci se déplace directement au cabinet. Ces prises de rendez-vous en « direct » sont gérées par la secrétaire ou l'assistante, ou bien le praticien lui-même. Sur le créneau de la prise de rendez-vous et la gestion d'agenda en ligne, plusieurs acteurs existent : Doctolib, KelDoc, AlloDocteur, ClickDoc, etc... Ces plateformes servent à simplifier ce processus en proposant un service de prise de rendez-vous, directement sur leur site, c'est à dire sans l'intervention d'un personnel du cabinet. Le but étant de supprimer une charge de travail, certes essentielle dans le lien avec le patient mais non rentable et parfois chronophage dans l'organisation globale du cabinet.

De toutes ces plateformes, l'une d'entre elle est devenue leader du marché et principal acteur de ce domaine-là. Il s'agit de Doctolib : start-up française créée fin 2013 par des français, et qui vient de dépasser le milliard d'euros de valorisation financière en juin 2019. Le service est actuellement utilisé par 75 000 praticiens et génère 40 millions de visites sur son site, chaque mois. L'important pour ces services, est la quantité de praticiens affiliés : plus ils sont nombreux, plus les nouveaux praticiens désireux d'avoir recourt à ce service iront sur la plus grosse plateforme. Cet effet « boule de neige » a permis à Doctolib d'atteindre le statut de quasi-monopole de ce domaine.(8)

Toutes les plateformes fonctionnent sur le même principe, seul le cas de Doctolib sera développé ici, car sa position de leader en fait la plateforme la plus intéressante si l'on souhaite se lancer dans l'agenda en ligne.

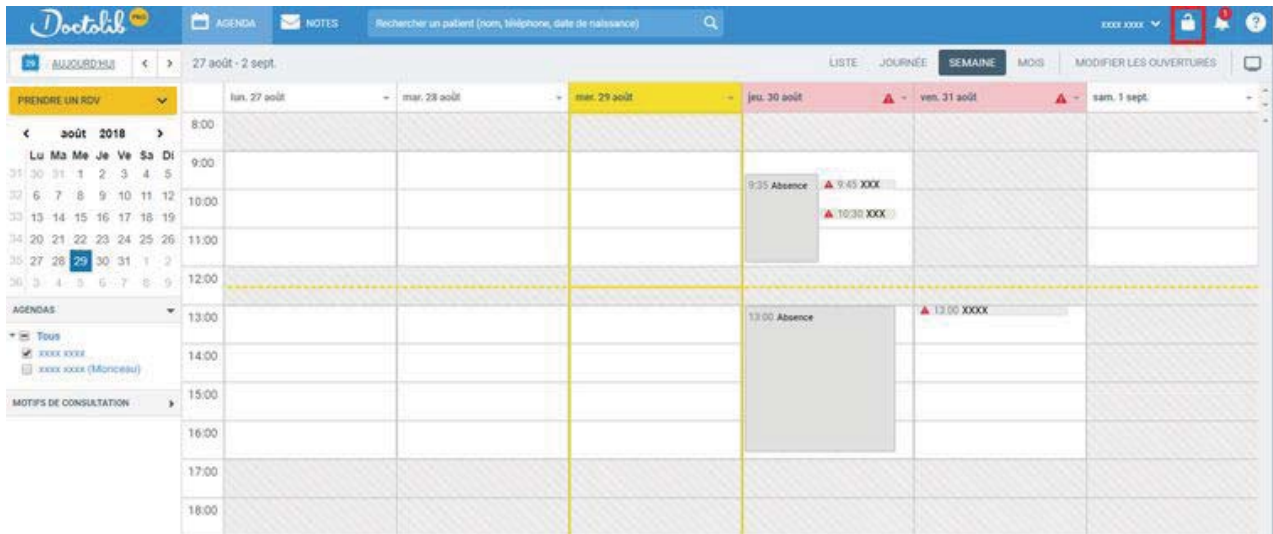
1.2.2. Utilisation

L'utilisation de la plateforme est relativement simple : afin de prendre un rendez-vous, le patient doit se rendre sur le site <https://www.doctolib.fr> (ou l'application mobile du même nom), rechercher dans la barre de recherche un nom de praticien ou une zone géographique. Une fois le praticien trouvé, il sélectionne le rendez-vous puis complète les informations personnelles demandées.

Coté praticien, on installe un logiciel sur l'ordinateur qui se lie au logiciel de soin utilisé (Julie, Logos, Macdent, etc..). Lors de l'ouverture d'une fiche patient déjà connu du cabinet via Doctolib, un onglet permet l'ouverture du dossier patient correspondant sur le logiciel de soin. Pour la création d'un nouveau patient, le logiciel Doctolib créé lui-même la fiche du patient sur le logiciel de soin et affine automatiquement les informations renseignées par le patient lors de sa prise de rendez-vous via internet.

Pour ce qui est de la gestion des rendez-vous, le praticien est libre d'ouvrir des plages horaires comme il le souhaite, que les patients pourront sectionner afin de poser un rendez-vous. Des motifs de consultations différents sont présent (possible d'en proposer plusieurs ou un seul), représentant un

temps de consultation préalablement défini par le praticien. Le patient sélectionne la plage horaire souhaitée et valide le rendez-vous, qui apparait directement sur le planning du praticien.



Présentation de l'agenda Doctolib

1.2.3. Avantages

- Optimisation de l'organisation : gain de 30% de temps de secrétariat (que ce soit pour le praticien ou son assistante qui pourra se concentrer à d'autres tâches du cabinet). Réduction de 75% des rendez-vous non honorés grâce à des sms de rappels personnalisés et générés automatiquement.(9)
- Augmentation et amélioration de la visibilité sur internet : élaboration d'un profil avec toutes les informations nécessaires au patient pour joindre et rejoindre le cabinet. Possibilité de mettre des photos du praticien et du cabinet, indiquer les diplômes obtenus, les formations réalisés et les spécialités maîtrisées. De plus, le site Doctolib apparait dans les premières propositions d'une recherche Google, peu importe le praticien et la ville recherchés. Ainsi grâce à son référencement, la plateforme permet une meilleure visibilité de ses praticiens abonnés.
- Agenda disponible pour le praticien de n'importe où, sur n'importe quelle plateforme, et même en dehors du cabinet (ordinateur, tablette, smartphone).
- Interface claire et facile d'utilisation (comparée à certains logiciels de soins qui ne sont pas forcément très intuitifs), personnalisable et adaptable à sa propre utilisation.
- C'est un outil de communication entre praticiens, permettant un échange d'information sur un patient commun.

- Du côté patient, cela permet aussi une diminution du temps passé au téléphone, qui peut parfois durer plusieurs minutes s'il appelle au mauvais moment. La prise de rendez-vous peut se faire quand il le souhaite et plus seulement sur les horaires d'ouverture du cabinet.
- Gain économique par rapport à l'embauche d'une secrétaire, même si le service est payant d'une centaine d'euros par mois.

1.2.4. Inconvénients, limites et controverses

- Une des premières limites est la limite liée à l'utilisation d'internet : difficilement utilisable par les populations plus âgées ou moins à l'aise avec ces technologies.
- Sécurité des données. C'est le gros point de controverse. En effet, avec Doctolib, ou une autre plateforme de rendez-vous en ligne, il y a un recueil de données sur les patients et praticiens par un organisme extérieur au cabinet. On est en droit de se poser la question de ce que fait Doctolib de ces données et de son utilisation dans le futur. La plateforme affirme qu'elle n'a pas accès aux données médicales qui transitent sur ses serveurs agréés, mais déjà la simple association d'un praticien avec un patient est une donnée médicale. De plus les motifs de consultation et le nombre de rendez-vous donnés, informent sur le parcours de soin du patient. Pour l'instant le RGPD protège, les utilisateurs de ce type de service en France, mais qu'en sera-t-il dans l'avenir ? Est-ce que les informations recueillies par Doctolib sur les patients et praticiens seront un jour commercialisées auprès des organismes d'assurance ? La tendance de la notation arrivera-t-elle jusque là et des notes seront-elles affectées aux praticiens ? Le groupe, affirme que non, et soutient que la vision de Doctolib ne tend pas vers un « consumérisme à la Uber ».(10)
- On peut voir l'augmentation de la visibilité pour certains praticiens affiliés à Doctolib comme un inconvénient. En effet, il est nécessaire de se poser la question de la concurrence, et du référencement des praticiens affiliés et non affiliés à Doctolib dans les moteurs de recherche internet. On peut voir cela comme une certaine publicité ou du moins mise en avant de certains praticiens vis à vis d'autres. Car contrairement aux pages jaunes qui sont un simple référencement géographique, Doctolib ne référence pas aussi bien les praticiens non clients chez eux. Et là où le problème se pose, c'est que le site [doctolib.com](https://www.doctolib.com) se place en tête du référencement sur les moteurs de recherche, mettant ainsi ses praticiens/clients en avant et de ce fait en tête du référencement.
- La position de quasi-monopole de Doctolib sur le créneau peut inquiéter, car l'absence de concurrence lui permet de faire plus ou moins ce qu'il veut. Mais l'accès aux soins ne doit pas se laisser diriger et prendre le chemin voulu d'un seul acteur du marché. Un sondage a été réalisé par l'URPS des médecins libéraux d'Ile-de-France, indiquant que 79% des patients et

76% des médecins aillant recours à des plateformes de rendez-vous en ligne, utilisent Doctolib.(11)

Ces questions et aspects ambivalents de Doctolib ont été soulevés par l'UFML (Union Française pour une Médecine Libre), syndicat de médecins. Dans une tribune, ils portent plusieurs accusations à l'encontre de Doctolib, que ce soit sur le modèle économique ou en évoquant un parasitisme commercial. Le PDG du groupe leur a répondu dans une lettre ouverte, dénonçant des accusations « fausses » et « fallacieuses »(12). Dans tous les cas, que l'on soit d'accord ou non avec les accusations et les doutes évoqués sur Doctolib, il faudra faire attention dans le futur à ne pas se retrouver dans une position de dépendance par rapport à cette plateforme (ou une autre si un autre acteur devient leader du marché). Il est essentiel que l'accès aux soins ne devienne pas un business trop lucratif pour des intervenants extérieurs au monde de la santé.

1.3. Plateforme de suivi et motivation à distance

1.3.1. Présentation et intérêt

L'OMS définit la télémédecine comme « une activité professionnelle qui met en œuvre des moyens de télécommunications numériques permettant à des médecins et à d'autres membres du corps médical de réaliser à distance des actes médicaux, alors que la télésanté concerne l'utilisation des systèmes de communication pour protéger et promouvoir la santé »(13). Dans le domaine de la médecine française, ces derniers temps la téléconsultation a beaucoup progressé grâce à la mise en place de son remboursement par la sécurité sociale, depuis le 15 septembre 2018(14). Ce service permet une consultation vidéo entre un patient et un praticien via un service spécialisé (Doctolib réalisant environ 2/3 des téléconsultations à ce jour(15)). Ce service permet un accès aux soins à des personnes éloignées, ayant des difficultés de déplacement ou se situant dans des zones avec des temps de prise en charge longs. La téléconsultation diminue ainsi le temps d'attente des patients, les déplacements inutiles ou encore l'engorgement les urgences pour des cas qui ne le nécessitent pas. Dans le cas de l'orthodontie, l'étape de dépistage et d'examen clinique est difficilement réalisable à distance pour obtenir un diagnostic précis. Néanmoins les phases de suivi et de motivation sont quant à elles faisables à distance grâce à des services d'automesure et de monitoring.

En médecine, de multiples bénéfices au niveau de la santé publique sont démontrés grâce au suivi à distance (du diabète et de l'hypertension artérielle essentiellement)(16):

- Amélioration de l'observance
- Adaptation et optimisation en continu du traitement
- Détection précoce des incidents

- Réduction du nombre de visites en cabinet
- Réduction du nombre d'hospitalisations

Lors d'un traitement orthodontique, des bénéfices thérapeutiques et économiques peuvent être tirés grâce à un suivi à distance(16):

- Bénéfices thérapeutiques :
 - * Nécessité d'observance
 - * Nécessité d'optimisation thérapeutique
 - * Nécessité de prévention des incidents
- Bénéfices économiques :
 - * Optimisation du nombre de rendez-vous
 - * Prévention des complications

Récemment, une étude (17) a été faite au sein du catalogue d'application des smartphones au Royaume-Uni, sur le domaine de l'orthodontie. Il en ressort qu'en janvier 2019, 305 applications étaient disponibles (regroupant l'AppleStore et le GooglePlayStore qui sont les deux plateformes de téléchargement d'applications). 241 applications étaient à destination des patients (dont 136 basés sur des jeux permettant de visualiser son visage avec des bagues), 63 applications étaient développées par des praticiens et 56 avaient pour but d'éduquer les patients. Enfin, 295 de ces applications étaient gratuites.

Une autre étude de fin 2018 (18), toujours au Royaume-Uni, a questionné cent patients âgés de huit à cinquante-deux ans (avec 71% entre onze et dix-huit ans) sur l'utilisation d'applications smartphone en lien avec l'orthodontie. Le questionnaire proposé comportait différentes questions sur leur utilisation des smartphones et en particulier sur l'utilisation d'applications en lien avec l'orthodontie. Seulement 7% étaient au courant qu'il existait des applications en lien avec l'orthodontie et aucun d'entre eux n'avait utilisé une de ces applications. Pour conclure 87% ont déclaré être prêts à utiliser une application pour aider leur traitement.

En 2018, YouGov a réalisé une étude pour le compte d'Align Technology sur un échantillon de 1002 personnes françaises en 2018 montrait que 83% des personnes interrogées étaient favorables à l'utilisation des nouvelles technologies pour le contrôle des traitements médicaux.

Enfin une étude réalisée aux Pays-Bas sur 132 adolescents porteurs de traitements multi-attaches, durant une année, a montré que l'utilisation d'une application encourageant le brossage des dents (WhiteTeeth), en plus des conseils donnés par le praticien, améliorait l'hygiène bucco-dentaire.(19)

L'observance, l'hygiène bucco-dentaire et le nombre de rendez-vous manqués sont des facteurs importants de la durée d'un traitement orthodontique. Ces facteurs sont modifiables et améliorables par le patient.(20) Le praticien peut ainsi aider le patient à améliorer ces facteurs grâce à des outils de communication et de motivation, afin d'optimiser la durée de traitement.

1.3.2. Exemple de services existants

« **Mon Coach Ortho** »

Au début de l'année 2019, le Groupe VYV a sorti cette application, en collaboration avec l'Union Française pour la Santé Bucco-Dentaire (UFSBD). Cette application « propose sous une forme interactive et ludique adaptée à l'univers des jeunes, un panel complet d'outils d'accompagnement et de suivi du traitement, tout en facilitant le partage d'informations entre tous les intervenants : les parents, l'orthodontiste, le chirurgien-dentiste et, le cas échéant, l'orthophoniste ».(21) Cette application se présente sous forme de carnet de suivi du traitement de l'enfant avec des pages de conseils sur le brossage, le port des solutions ODF ou encore des exercices d'orthophonie.

« **Loum** »

Cette application créée en 2017, elle se base sur l'amélioration de l'observance du patient. L'application permet au praticien de paramétrer les consignes qu'ils doivent réaliser chez eux (mettre leurs élastiques après les repas, changer de gouttières, consignes d'hygiènes, etc..). Ces consignes sont notifiées automatiquement par la suite. L'application accompagne les consignes de vidéos explicatives personnalisées.(22)

« **Dental Monitoring** »

Créée en 2015, cette société française propose la solution la plus aboutie en termes de suivi à distance d'un traitement orthodontique et certainement la plus intéressante sur ce créneau. Le principe est simple, et se base sur 3 supports différent : une application smartphone pour le patient, une plateforme de calcul de Dental Monitoring (DM) et un service d'accès web pour le praticien.(16,23–25)

Utilisation par le patient :

Le patient télécharge l'application sur smartphone, rentre ses identifiants puis ensuite il est guidé par l'application. Il devra prendre des photographies intra-orales, avec des écarteurs de joues fournis, au nombre de dix (trois en occlusion, cinq avec la bouche légèrement entrouverte et deux en vue occlusale) selon un intervalle défini par le praticien et rappelé par des notifications. Il pourra au cours

de son traitement revoir les anciennes photographies prises, ainsi que la superposition entre les prises de vues à différents moments de son traitement.



Utilisation de Dental Monitoring(24)

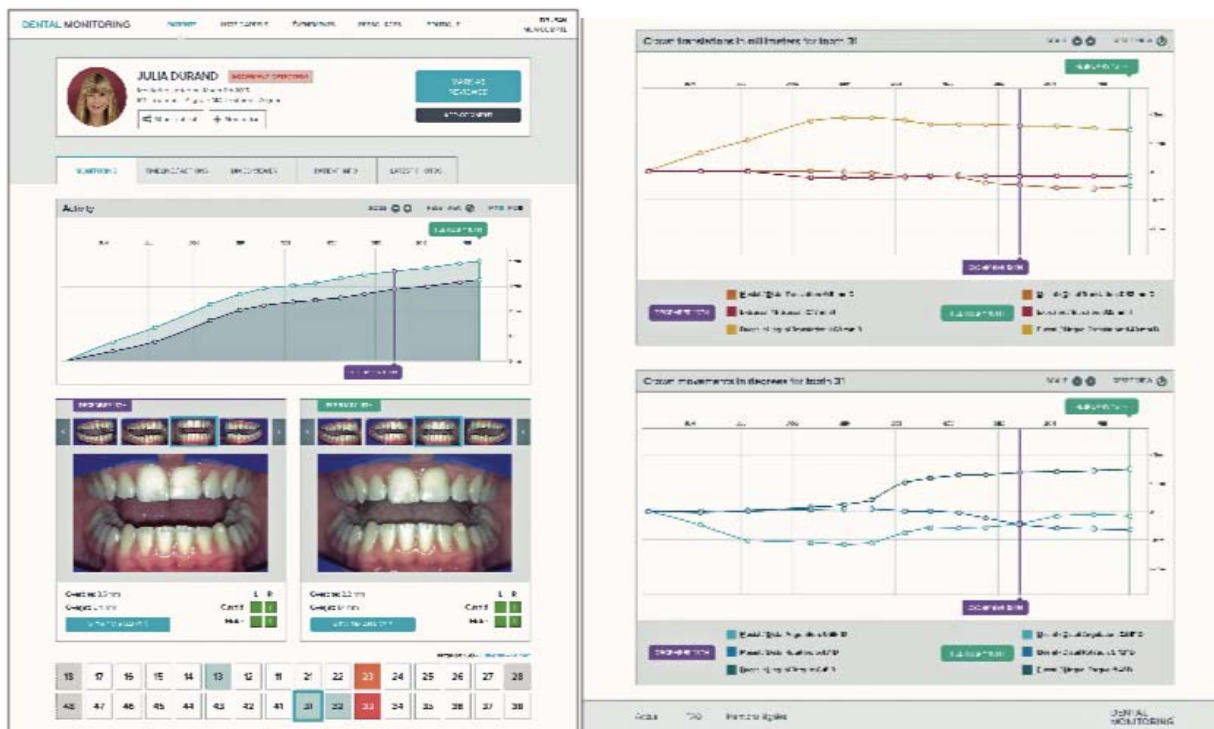
Plateforme de calcul :

La plateforme se base sur des algorithmes d'analyse d'image et d'optimisation afin de pouvoir calculer et quantifier les mouvements dentaires. Les prises de vues du patient sont dans un premier temps analysées afin de s'assurer qu'elles soient bien exploitables. Ensuite les calculs de mouvement sont réalisés dans les 3 plans de l'espace. La société avance une précision de calcul des mouvements de 0,05mm sur les dents antérieures et 0,07mm sur les dents postérieures. Une étude a comparé la précision des modèles créés par DM à ceux créés par la caméra optique iTero. L'étude conclut à une différence de 0,02mm en moyenne ce qui est considéré comme cliniquement insignifiant.(26) Après la réalisation des calculs, tous les résultats sont envoyés sur la plateforme destinée au praticien.

Plateforme praticien :

Sur son « tableau de bord », le praticien retrouve toutes les informations du patient :

- Une messagerie qui permettra de communiquer avec le patient
- Les galeries de photographies
- Les résultats des mesures des mouvements
- Courbes d'activités par arcade et par dent
- Des superpositions entre les photographies actuelles et les photographies précédentes
- Un centre de notification où il est averti en cas de problèmes



Exemple tableau de bord praticien avec la galerie photo, les courbes de suivi(16)

Une étude (25) s'est intéressée à l'utilisation de DM au cours d'un traitement avec des aligneurs Invisalign. 74 patients ont utilisé DM et ont été comparés à 85 patients qui n'ont pas utilisé l'application. Il en ressort que les groupes tests avaient un nombre de rendez-vous inférieur de 1,68 par rapport au groupe contrôle. Il en ressort aussi que les patients ont trouvé l'application facile à utiliser (moyenne des notes de 4,31/5) et bénéfique pour le traitement (moyenne des notes de 4,4/5). Le constat global exprimé par les patients était parfois, la difficulté de prendre de bonnes photographies. Cette étude semble aller dans le sens d'un bénéfice de l'application pour le traitement orthodontique.

A la lumière de ces exemples, on se rend facilement compte des possibilités qu'offrent les applications smartphones pour améliorer la communication entre le patient et le praticien tout en améliorant l'implication du patient dans son traitement. Ces solutions n'ont pas pour but de remplacer un praticien mais bien de l'accompagner ainsi que de faciliter l'accès aux soins de certains patients (éloignement géographique d'un praticien et patients peu disponibles)

2. Acquisition numérique des données cliniques du patient

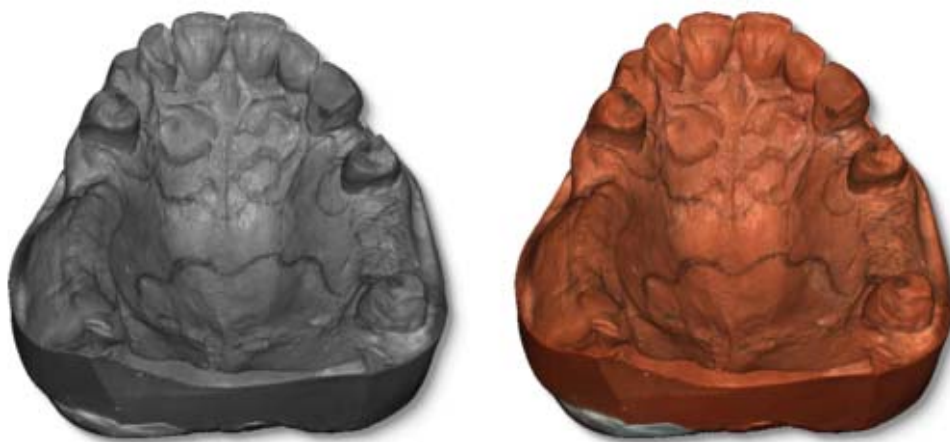
Classiquement l'enregistrement des données cliniques du patient se fait grâce à des empreintes (à l'aide d'un porte-empreinte et d'un matériau à empreinte), de photographies et d'une ou plusieurs radiographies (orthopantomogramme ou céphalométrie). L'apport des nouvelles technologies, de ces dernières années permet une numérisation globale de toutes ces données. En effet, toutes ces étapes sont désormais numérisables permettant ainsi la création de modèles numériques, véritable copie de la bouche du patient.

Nous allons étudier dans cette partie le flux numérique partant de l'enregistrement des différentes données cliniques du patient jusqu'à son étude grâce aux logiciels adaptés.

2.1. Numérisation indirecte : Scanner extraoral

Le scanner extraoral est un moyen d'obtenir des modèles numériques des arcades dentaires du patient via la numérisation indirecte des éléments intraoraux. On parle de numérisation indirecte car l'empreinte est réalisée classiquement au fauteuil à l'aide de matériaux à empreinte, puis celle-ci est scannée directement ou après coulée. En effet, il existe deux possibilités pour obtenir les modèles numériques du patient avec les scanners : scanner une empreinte réalisée sur le patient ou scanner le modèle en plâtre obtenu via la coulée de l'empreinte. Pour réaliser le scan, on place l'empreinte ou le modèle en plâtre sur une plateforme mobile, permettant la numérisation de l'objet sous tous les angles, à l'intérieur du scanner. Une lumière laser est projetée sur l'objet et des caméras réparties à l'intérieur du scanner acquièrent l'image miroir de la surface. Une fois la numérisation terminée, un modèle stéréolithographique est créé, initiant de ce fait le flux numérique et permettant la modélisation informatique via des logiciels adaptés.

Ce type de produit est plutôt destiné au prothésiste qu'au praticien lui-même, même si certains scanners sont à des prix abordables avec une utilisation simple et compatible avec une pratique quotidienne.(27)



Numérisation de modèles en plâtres avec le scanner Maestro3D(28)

On trouve plusieurs scanners extraoraux 3D sur le marché, parmi ceux-là on a :

- 5 scanners, selon la gamme désirée, de la société 3Shape
- Le scanner Maestro 3D MDS500 de chez AGE Solutions

Les 5 scanners de la société 3Shape sont, du moins performant au plus performant, le E1, E2, E3, R1000 et R2000. Le tableau ci-dessous résume toutes les caractéristiques de ces produits :

	E1	E2	E3	R1000	R2000
Nombre de caméras	2	2	2	4	4
Précision (μm)	10-12	10-12	7-10	5-8	5-8
Temps de numérisation du plâtre	61s	43s	33s	23s	23s
Temps de numérisation de l'empreinte	107s	72s	52s	50s	50s
Texture	Non dispo	Noir et blanc	Couleur	Couleur	Couleur



Scanner E3, R1000 et R2000 de 3Shape(29)

Les caméras utilisées dans ces scanners sont des caméras de 5 mégapixels, LED bleue multi-ligne. La différence entre le R1000 et le R2000 est que le R2000 permet de numériser 2 empreintes ou deux modèles en plâtre en même temps contrairement au R1000 qui ne peut en faire qu'un seul à la fois. En plus de tout cela, les scanners permettent la numérisation des modèles en plâtre positionnés selon l'occlusion du patient, directement en place sur l'articulateur.(29)

Le scanner Maestro 3D MDS 500 qui contient lui, 2 caméras de 5 mégapixels, avec une précision de $10\mu\text{m}$. Il permet de numériser les textures en couleur ou échelle de gris (permettant ainsi de tracer sur les plâtres des informations nécessaire à la fabrication de l'appareil et de se retrouver numérisé avec l'objet). En termes de vitesse il lui faut entre 2 et 3 minutes environ pour réaliser le scan, mais là où est son gros avantage est qu'il permet de scanner jusqu'à 8 empreintes ou modèles en plâtre

simultanément. Le scanner est compatible avec le logiciel de modélisation que l'on souhaite, il a été conçu pour pouvoir s'adapter à tous. (28)



Scanner Maestro3D(28)

2.2. Numérisation directe : Empreinte numérique intra-orale

L'empreinte optique grâce à un scanner intraoral, permet cette fois-ci de réaliser la numérisation directe des éléments intra-buccaux. L'utilisation de ces caméras (ou scanner) intra-orales afin de réaliser la numérisation des volumes bucco-dentaires au fauteuil se démocratise de plus en plus, grâce à l'amélioration des technologies utilisées.

De nombreux modèles existent chez différents fabricants, ici nous ne nous intéresserons qu'aux produits les plus performants et adaptés à un usage orthodontique :

- Trios® 3 et 4 de 3Shape
- iTero® Element 2 ou Flex de Align Technology
- CS 3600 et CS3700® de Carestream
- Omnicam® de DentsplySirona



Exemple d'un scan intra-oral(30)

2.2.1. Présentation et fonctionnement de la caméra intra-orale

La caméra intra-orale se présente sous forme d'une grosse pièce à main, d'une vingtaine de centimètre, avec un embout intra-buccal à l'extrémité. Selon les fabricants, la taille, le poids et la forme diffèrent quelque peu, et la préférence d'un système ou l'autre selon ces critères restera très personnel. Le poids est tout de même un élément important car une caméra trop lourde provoquera une fatigue et possiblement des douleurs plus importantes à la fin de la journée.

La prise en main de la caméra se fait en prise stylo (sauf pour iTero qui a une prise inversée), il existe aussi une solution sous forme de pistolet chez 3Shape. De plus 3Shape est le seul fabricant à proposer une solution sans fil pour sa caméra Trios 3.

Concernant les embouts, différentes écoles existent (31) :

- Un embout inamovible, nettoyé avec des lingettes désinfectantes pour la Omnicam
- Un seul embout pour tout, autoclavable un certain nombre de fois Trios
- Trois embouts de différentes tailles selon le besoin, autoclavables un certain nombre de fois CS3600 et CS3700
- Des embouts en plastiques jetables pour les iTero, ce qui représente la solution la plus hygiénique.

La chaîne de numérisation est composée de 3 maillons : la caméra, l'ordinateur ou unité d'acquisition et le logiciel. Encore une fois, selon le fabricant, les systèmes diffèrent ou non, chacun y allant de son innovation et de son design. Le contrôle de l'acquisition se fait via un écran auquel est reliée la caméra. Le tout peut se présenter sous différentes formes selon le fabricant et les besoins du praticien (32) :

- « Kart » = écran et ordinateur sur un pied à roulette permettant le déplacement autour du fauteuil (Trios®, Omnicam®, iTero® Element 2)
- « Pods » = caméra branchée à un ordinateur portable qui est posé sur le plan de travail ou une tablette à roulette (Trios®, iTero® Flex, CS3600 et CS3700®)



A gauche : Kart Trios Move (33) ; A droite : Itéro Element Flex en pods (34)

La prise d’empreinte avec une caméra intraorale est une numérisation optique sans contact des surfaces dentaires et des tissus mous adjacents par balayage d’un faisceau lumineux. Différentes technologies existent, elles varient sensiblement. L’enregistrement se fait soit par triangulation (Cerec Omnicam® de DentsplySirona), soit par projection de franges de lumière, soit par imagerie parallèle confocale (Itéro® de Align Technology et Trios® de 3Shape), soit par vidéo stéréophotogrammétrique. Au-delà de la technologie d’enregistrement, c’est le logiciel interne à la caméra qui a une importance toute particulière. C’est lui qui définira la résolution dont la caméra est capable et qui est à l’origine de la reconstruction 3D via la modélisation polygonal 3D qui servira de base à la reconstruction 3D qui apparaît à l’écran au fur et à mesure de la prise d’empreinte.(32)

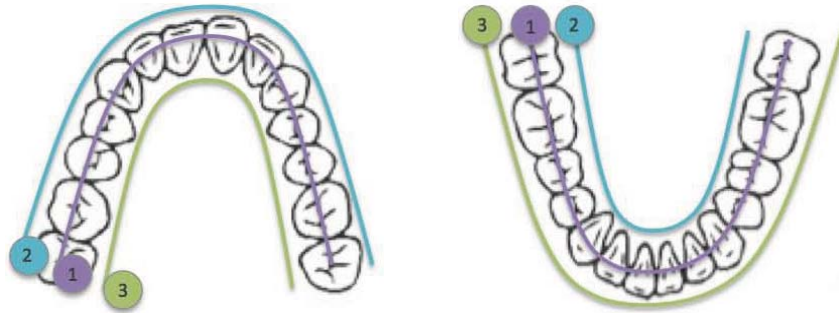
L’enregistrement se fait dans un ordre précis afin d’optimiser le temps d’empreinte et d’enregistrer le maximum de détails :

- On commence ainsi par la mandibule, en s’intéressant premièrement aux surfaces occlusales, puis linguales et enfin vestibulaires.
- Ensuite, on fait le maxillaire avec dans l’ordre, l’enregistrement des surfaces occlusales, puis vestibulaires, palatines et du palais si nécessaire.
- Enfin on réalise un enregistrement bilatéral de l’occlusion, en mettant le patient en OIM.

L’enregistrement ne se fait pas nécessairement d’un seul coup. Grâce au contrôle en temps réel via l’écran, on peut repasser sur les zones mal enregistrées directement.

Le temps nécessaire à l’enregistrement diffère selon les caméras (taille de la caméra, précision de celle-ci) et selon l’expérience du praticien (le temps de prise d’empreinte diminuant logiquement avec l’expérience). De plus à ce temps de prise d’empreinte, il faut rajouter le temps de traitement par le

logiciel des images recueillies (allant d'une minute trente à presque huit minutes chez certains non présentés ici)



Sens de numérisation des arcades

Une fois le temps de traitement terminé, le logiciel permet de visualiser l'ensemble de l'empreinte numérique, de la manipuler et enfin de l'exploiter. Que ce soit un modèle d'étude ou bien un modèle de travail, il est important de pouvoir exporter ce fichier facilement, soit vers le prothésiste, soit vers un autre praticien. Les dernières évolutions ont permis un assouplissement des formats informatiques des empreintes numériques. Ainsi toutes ces caméras permettent d'exporter l'empreinte numérique sous format stéréolithographique « .stl », fichier ouvert, pouvant être lu par tous les logiciels de modélisation 3D.(35–38)

2.2.2. Avantages et inconvénients

Comme toute nouvelle technologie, celle-ci présente des avantages et des inconvénients par rapport à la technique classique, encore considérée comme le gold standard.

On trouve comme avantages de l'empreinte numérique par rapport à l'empreinte classique (27,39–41) :

- Meilleur confort du patient : l'empreinte ne provoque plus de réflexes nauséux chez le patient et permet une meilleure coopération du patient, surtout chez les jeunes patients.
- Affranchissement des contraintes liées aux matériaux à empreinte : zones mal enregistrées lors de l'empreinte, déformation lors de la désinsertion, transport ou coulée.
- Accélération du flux de travail, permettant de réaliser une seule empreinte pour plusieurs étapes (modèle études et fabrication de l'appareil par exemple)
- Échange de données directement entre le cabinet et le laboratoire, permettant ainsi de diminuer le transport et d'avoir un contact direct avec les prestataires.
- Visualisation et analyse des arcades possible directement. Il est possible de corriger l'empreinte directement au lieu d'en refaire une.

- Amélioration de la communication avec les patients : ils peuvent voir en direct et après l’empreinte leurs dents. Cela permet de leur faire comprendre l’intérêt du traitement et ainsi améliorer la coopération.
- Suppression de l’espace de stockage physique grâce au stockage virtuel, à condition d’être propriétaire de ses fichiers et indépendant vis à vis du fabricant de la caméra.

Dans les inconvénients de l’empreinte numérique on trouve (27,39–41) :

- La nécessité d’un temps d’adaptation plus ou moins long pour la prise en main de cette technologie
- La précision de l’empreinte opérateur dépendante (s’améliorant avec le temps)
- Difficulté d’accès au niveau des molaires chez les jeunes patients avec certaines caméras
- Coût important, que ce soit en termes de temps ou financier
- La dépendance informatique, même si rien n’empêche de repasser à des empreintes classiques le jour où cela ne marche pas correctement.
- L’évolution rapide des technologies peut vite rendre une caméra obsolète si on souhaite toujours avoir le meilleur produit du marché.

2.2.3. Différentes offres du marché

Actuellement, sur le marché, de nombreuses caméras intra-orales existent, certaines se prêtent plus ou moins à une utilisation en orthodontie. Cela est dû à la compatibilité entre les fabricants de caméra, les logiciels d’analyses et les fabricants d’appareils orthodontiques. Certaines solutions permettent de faire toute la chaîne chez eux, d’autres ne permettent que la numérisation des données cliniques, l’analyse et la production d’appareil se faisant via d’autres solutions.



Scanners intra-oraux Trios® 4 ; Cerec® Omnicam ; CS® 3700

Les différences entre ces caméras se trouvent principalement dans :

- La technique d’enregistrement (détaillée dans la partie 2.1.1) ;
- La précision de l’image et de la prise d’empreinte, que ce soit en arcade complète ou sectorielle
- Le temps d’enregistrement nécessaire et le temps de traitement

- Le coût : il varie si l'on prend la caméra seule ou avec un système ergonomique spécial, si l'on prend un logiciel d'analyse et modélisation 3D en plus, etc...

	Fabricant	Technique d'acquisition	Poudrage	Ergonomie	Précision annoncée	Prix approximatif
Trios 4	3Shape	Imagerie parallèle confocale	Non	Kart ou pods	7µm	45 000€
iTéro	Align Technology	Imagerie parallèle confocale	Non	Kart ou pods	10µm	34 000€
CEREC Omnicam	Dentsply Sirona	Triangulation	Non	Kart ou pods		30 000€
CS3700	Carestream	Triangulation	Non	Pods		30 000€

Tableau récapitulatif de plusieurs offres de caméras

Plusieurs études se sont penchées sur la comparaison des caméras. Une étude en particulier s'est intéressée à la comparaison de l'exactitude et de la précision de 6 caméras(42). Cette étude a été réalisée in vitro, sur des modèles d'études fabriqués de manière à avoir le même indice de réflexion que la dent naturelle. Ils ont scanné 5 fois des arcades complètes, maxillaires et mandibulaires, et des sextants. Le scan des modèles a été réalisé par des opérateurs aguerris à la technique d'empreinte numérique afin que les résultats soient le moins opérateurs dépendants possible. Le temps nécessaire au scan complet a été pris en compte à chaque fois et est corrélé avec les résultats.

A la vue des résultats, il apparait que la caméra Trios® de chez 3Shape est la meilleure combinaison entre rapidité de scan, précision et exactitude pour le scan d'arcade complète.

Plusieurs études se sont aussi intéressées à la comparaison de précision entre les scanners intra-oraux et extra-oraux. Ces études vont dans le même sens, en concluant que les scanners extra-oraux sont plus performants en termes de précision, mais pour un usage clinique la précision des scanners intra-oraux suffit largement. De plus l'utilisation de scanners extra-oraux rajoute l'étape de prise d'empreinte classique qui peut représenter une source d'erreur.(42–45)

2.3. Acquisition via techniques radiographiques

L'utilisation de la radiographie en orthodontie s'est démocratisée depuis des décennies dans la pratique courante. Les clichés radiographiques les plus réalisés sont la radiographie panoramique et

la téléradiographie de profil, ils constituent le dossier radiologique de base de l'orthodontiste. Ces deux clichés sont des clichés en deux dimensions et apportent chacun des informations différentes. Plus récemment, avec les dernières innovations technologiques, la radiographie en trois dimensions a émergé, permettant une approche différente dans le recueil des données du patient.

2.3.1. La radiographie 2D

La radiographie panoramique est un examen de dépistage, elle fournit une vision globale des arcades dentaires et des structures environnantes. Ce cliché permet :

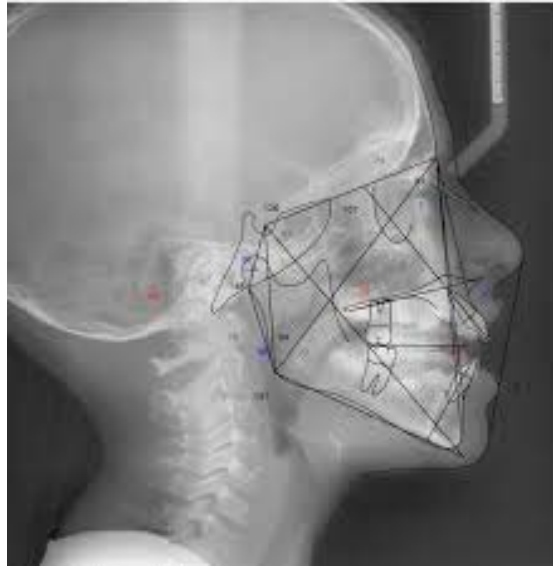
- D'obtenir la formule dentaire et le stade de dentition ;
- D'obtenir l'état et la morphologie des dents ;
- De détecter des inclusions ou rétentions ;
- De renseigner sur la position et l'orientation des germes des dents permanentes ;
- D'informer sur l'état des sinus, articulations temporo-mandibulaires.

La téléradiographie de profil est un cliché radiographique, réalisé de profil, apportant des renseignements sur les rapports dentoalvéolaires, dento-squelettiques et squeletto-squelettiques dans le sens sagittal et vertical. Ce cliché est à visée diagnostique, pronostic et thérapeutique. Bien qu'encore réalisée sur un calque ou directement sur le cliché radiographique, l'analyse céphalométrique se fait désormais de plus en plus sur ordinateur directement. Des logiciels d'aide permettent d'effectuer, en seulement quelques clics un tracé et une analyse complète, avec toutes les informations nécessaires aux praticiens.

L'exploitation du cliché, avec le tracé de points, de lignes et de plans aboutit à l'élaboration d'une analyse céphalométrique. On retrouve plusieurs types d'analyses selon les courants de pensées, ainsi elles peuvent être typologiques, dimensionnelles ou bien architecturales. Grâce à ces analyses, la téléradiographie et la céphalométrie permettent d'apporter des informations précieuses à l'orthodontiste dans plusieurs domaines (46) :

- L'aide au diagnostic : donne des informations, mesurables, sur les caractéristiques squelettiques, dentaires et l'épaisseur des tissus mous du patient. Ces mesures permettent de quantifier la gravité d'un cas, de le comparer à d'autres cas ou à lui-même au cours du temps.
- L'aide au pronostic : Grâce à l'analyse de clichés au cours du temps d'un même patient et de superpositions, certains auteurs (Björk, Tweed, Merrifield, Ricketts, Petrovic) ont permis d'estimer des pronostics sur la croissance des sujets étudiés. Ainsi, via l'analyse céphalométrique et les mesures recueillies on peut savoir, avec un risque calculé, le pronostic de certaines dysmorphoses.

- L'évaluation des effets d'un traitement et de la croissance : cela est possible grâce à la superposition de plusieurs clichés, pris à des moments différents du traitement.



Téléradiographie de profil avec analyse céphalométrique

L'inconvénient majeur de la téléradiographie de profil et des conclusions que l'on tire via l'analyse céphalométrique, est que l'on étudie une image 2D d'un objet en 3D. La superposition des structures maxillo-faciales et crâniennes peut parfois rendre difficile la localisation de certains points, faussant légèrement ainsi les différentes mesures. De plus les tracés sont réalisés dans un plan sagittal alors que la majorité des structures et plans étudiés ne se situent pas dans ce plan. Ajoutez à cela une mauvaise position de la tête du patient dans le céphalostat, et certaines mesures peuvent se retrouver totalement faussées.

Ainsi la téléradiographie de profil et l'analyse céphalométrique sont des outils intéressants dans l'analyse et l'aide au diagnostic de cas simples, mais trouvent leurs limites lors de cas plus complexes.

2.3.2. La radiographie 3D

L'imagerie 3D a vu le jour au cours des années 1980, premièrement avec l'arrivée des premiers CT scan. L'application de celle-ci à des fins diagnostiques dans le cadre de dysmorphoses maxillo-mandibulaires est restée limitée. Le coût de mise en œuvre, la sensibilité aux artéfacts (couronnes métalliques) et la quantité de radiations lors de l'examen en étaient les principales raisons.(47)

Au début des années 2000, une nouvelle technique d'imagerie 3D a fait son apparition : « l'imagerie volumétrique par faisceau conique » ou plus régulièrement appelée CBCT (« cone-beam computerized tomography »). Cette technologie a été mise en œuvre afin de pallier aux défauts des

CT scan traditionnels dans le cadre d'une utilisation maxillo-faciale. Cette technologie se base sur l'utilisation d'un faisceau de rayons X, sous la forme d'un cône, traversant l'objet (le patient dans ce cas précis) et étant réceptionné par un détecteur plat, créant ainsi un objet en 2D. Une séquence d'image 2D est obtenue grâce à la rotation de la source de rayons X et du détecteur autour de la tête du patient. La reconstruction 3D se faisant par la suite grâce au logiciel informatique à partir des données sous format DICOM provenant du CBCT, permettant d'obtenir à la fois des radiographies 2D et des images 3D. (48)

Ainsi le CBCT trouve son application dans divers domaines en ODF, à commencer par le diagnostic :

- Evaluation du squelette et des dents
- Localisation des dents incluses
- Quantification de la croissance osseuse
- Analyse des voies aériennes
- Analyse des ATM
- Etudes des fentes labio-palatines

Le CBCT trouve aussi son application dans la planification des traitements :

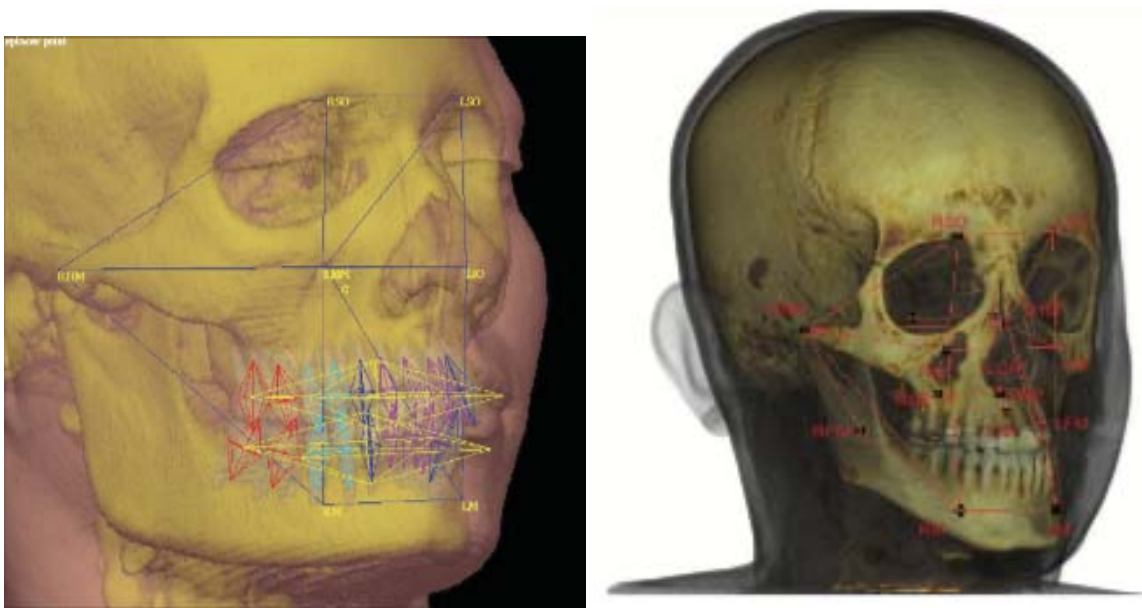
- Planification des chirurgies orthognatiques
- Étude de la localisation des ancrages osseux temporaires
- Estimation précise de l'espace nécessaire afin de mettre une dent retenue/incluse sur arcade
- Fabrication d'appareils orthodontiques personnalisés

Enfin, en cours en fin de traitement le CBCT permet d'évaluer la progression et la finalité du traitement lors d'un traitement ODF ou d'une chirurgie orthognatique grâce à des superpositions.(48)

La majorité de ces applications n'utilise que les coupes obtenues par le CBCT, permettant de localiser ou étudier une structure en particulier et ses rapports avec les structures voisines dans les trois dimensions de l'espace. Mais la reconstruction des structures maxillo-faciales sous forme de modèles numériques en 3D peut s'avérer très intéressante dans certaines applications, telles que l'analyse céphalométrique, la planification des chirurgies orthognatiques, des setups impliquant les racines ou bien des superpositions post-thérapeutiques.

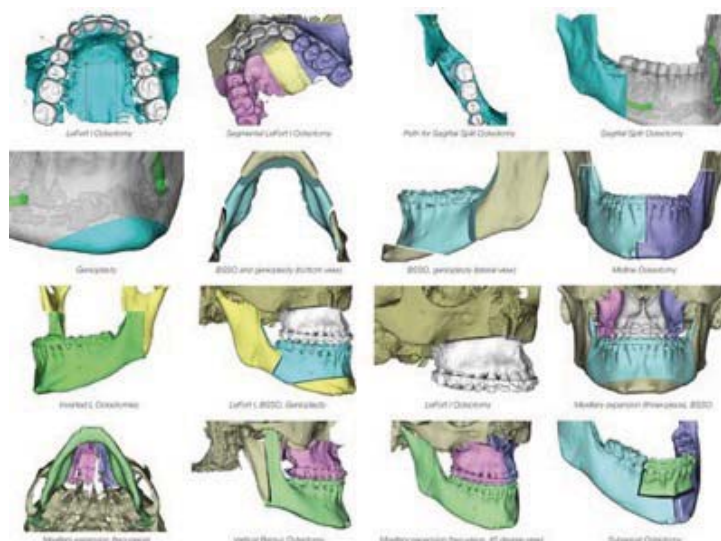
Ainsi, grâce à des acquisitions de données en 3D, cela a permis de s'affranchir des limites de la céphalométrie en 2D (superpositions de structures, flou de certaines zones, plans dans les mauvaises dimensions) et de développer la céphalométrie 3D. Cette analyse 3D, se base sur le même fonctionnement qu'en 2D, c'est-à-dire le repérage de points clés par le praticien permettant par la

suite au logiciel de calculer et fournir des mesures entre deux points, de surfaces, d'angles.(49) Des logiciels tels que Cépha3DT® ou SimPlant O&O® permettent de réaliser ce type d'analyse.



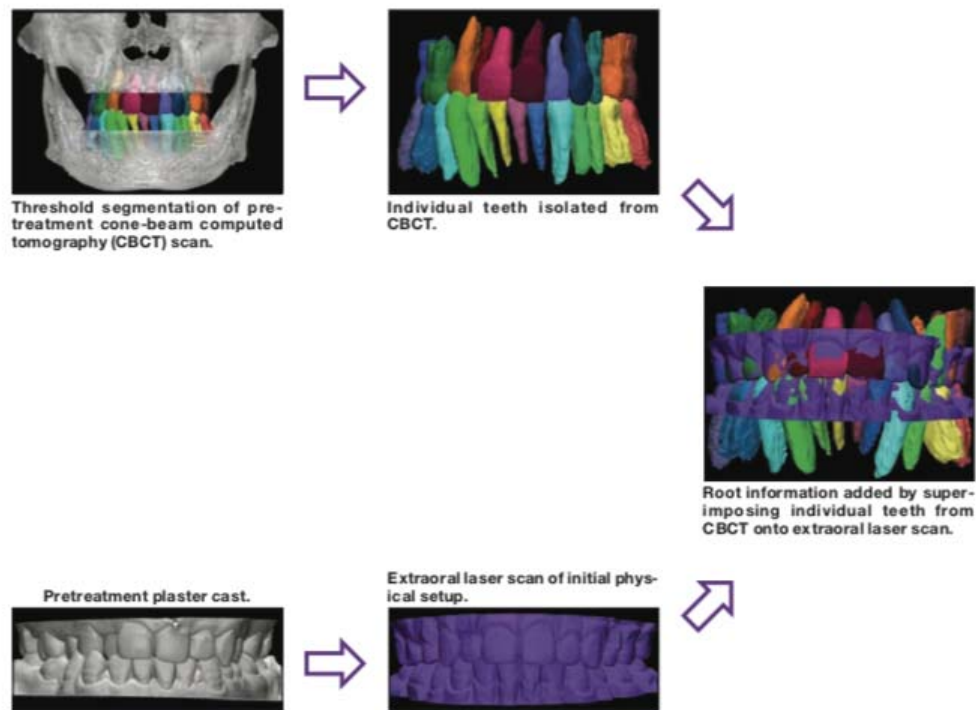
Analyse céphalométrique 3D(49)

Dans le cadre de la planification chirurgicale, les logiciels permettent la visualisation 3D de modèles numériques. Conçus de manière simple et intuitive, ils permettent l'analyse du patient, la quantification de la chirurgie à effectuer et la simulation du résultat final. Ces outils sont un bon moyen de communication avec le patient via cette visualisation si celui-ci est un peu réticent. Le logiciel le plus puissant du marché est Dolphin 3D Surgery™. (50)



Simulation de traitement via Dolphin3D Surgery™

L'apport du CBCT dans la visualisation des racines, permet de réaliser des setups numériques plus précis et plus proches de la réalité. Les logiciels sont déjà capables de calculer les collisions entre les racines et d'avertir le praticien qu'une simulation n'est pas réalisable. Mais l'absence des racines dans le calcul des mouvements peut engendrer des erreurs entre le numérique et la réalité. Ainsi pour améliorer la concordance entre ces deux entités, des praticiens(51) s'intéressent à pouvoir réaliser des fusions et simulations de traitement impliquant les racines.



Fusion de données via CBCT et scan pour créer un setup(51)

2.3.3. Évaluation du risque lié à la dose

Dans le cadre de la réalisation d'un examen radiologique, il existe deux principes de base de la protection des patients exposés aux rayonnements ionisants à respecter :

- La justification : c'est la confirmation argumentée de l'indication clinique et du choix de la technique radiographique
- L'optimisation : l'information recherchée devra être obtenue avec une exposition la plus faible possible.

Ainsi, la Fédération Française d'Orthodontie a émis des recommandations en 2016 à l'égard de l'utilisation du CBCT dans le cadre de l'examen du patient :

« Le CBCT est indiqué quand les informations apportées par la radiographie conventionnelle sont insuffisantes ou bien ne peuvent être apportées par des alternatives non radiographiques (par ex, modèle d'étude virtuel); Le CBCT est contre-indiqué pour obtenir une téléradiographie de profil et/ou

une vue panoramique si les rayonnements ionisants qu'il produit, sont supérieurs à ces derniers. Lorsque l'examen clinique indique que le CBCT est d'emblée recommandé pour le diagnostic ou pour planifier le traitement, la radiographie 2D doit être évitée. » (52)

De plus ils ajoutent que « selon les règles de radioprotection, il n'est pas recommandé de recourir au CBCT si les informations utiles sont apportées ou peuvent être apportées par la radiographie conventionnelle 2D moins irradiante (par ex téléradiographie de profil et/ou panoramique) ou par des alternatives non irradiantes (par ex, modèle d'étude virtuel) ». (52)

L'autre paramètre à prendre en compte est l'âge du patient. En effet, d'après la FFO « le risque est trois fois plus élevé pour le jeune âgé de moins de 10ans et 2 fois plus élevé entre 10 et 20ans. Il est important de prendre en compte les effets cumulés des expositions aux rayonnements ionisants durant l'enfance et l'adolescence, ainsi que la radiosensibilité des glandes salivaires et de la thyroïde. » (52) A la vue de ces éléments, on se rend compte de l'importance de l'examen clinique initial afin de poser les bonnes indications en termes d'examen radiographique. Dans un cas d'anomalie purement occlusales, il ne sera pas nécessaire de réaliser un CBCT et la radiographie 2D suffira. Mais au contraire, si dès l'examen clinique, la réalisation d'un CBCT semble nécessaire (anomalies osseuses ou gros décalages), il est impératif de limiter la dose reçue par l'enfant et ainsi ne pas réaliser de radiographie 2D.

Enfin la FFO recommande de « prendre en compte les résultats à venir des études d'évaluation concernant les bénéfices des protocoles basse dose ; ces derniers pourraient ultérieurement se substituer aux radiographies conventionnelles 2D (panoramique et/ou téléradiographie) » (52)

2.4. Photographie numérique et scanner facial

2.4.1. Acquisition de données en deux dimensions

Une autre étape importante lors du recueil des données cliniques du patient, est la photographie. Ces données sont d'origine endobuccale et exobuccale, ainsi la prise de clichés endobuccaux se fait avec au minimum 5 photos différentes : en occlusion de face, latéral gauche et latéral droite, occlusale maxillaire et occlusale mandibulaire. Ces clichés sont réalisés au fauteuil, à l'aide d'écarteurs et de miroirs pour certains. Ils ont pour but de permettre au praticien d'évaluer :

- La formule dentaire ;
- L'état de santé des dents ;
- Le recouvrement et le surplomb incisif ;
- L'alignement des milieux incisifs ;
- L'engrènement dentaire afin de déterminer la classe d'Angle ;
- L'alignement, la symétrie d'arcade et les rotations ;

- L'état parodontal.

Les clichés exobuccaux sont au nombre de 4 minimum : de face sans sourire, de face en souriant, de profil, et de $\frac{3}{4}$ en souriant. Les photos sont réalisées avec l'enfant debout, avec un fond blanc ou très clair de préférence. Ces prises de vues ont pour but d'évaluer :

- La typologie faciale ;
- L'équilibre facial entre les 3 étages et le parallélisme des lignes de référence ;
- La symétrie faciale par rapport au plan sagittal médian ;
- Le type de profil ;
- Le contour frontal ;
- Les différents rapports labio-nasal, labio-labiale, labio-mentonnier ;
- La position du menton ;
- Certains marqueurs d'anomalies fonctionnelles.

La prise de tous ces clichés se fait le plus souvent grâce à un appareil photo numérique, équipé d'un objectif Macro et d'un flash annulaire. Mais les dernières innovations technologiques ont fait entrer les téléphones portables dans la cour des grands en termes de prise de photos. En effet certains smartphones se démarquent par la qualité de leurs photos, c'est le cas par exemple du Huawei P30 pro ou encore du Google Pixel 3. De plus la facilité d'utilisation et de prise en main d'un smartphone pour les nouvelles générations, favorisera peut-être un jour le remplacement de l'appareil photo numérique classique. Pour l'instant, les meilleurs appareils photos réalisent des photos de meilleure qualité que les smartphones, mais à prix équivalent ces smartphones, couplés à un flash annexe rivalisent.

2.4.2. Acquisition de données 3D : le scanner facial

D'après la définition : « Un scanner facial 3D est un instrument de mesure optique, sans contact, permettant d'acquérir des modèles faciaux 3D (dans un format de données ouvert), avec une texture de peau réelle et en un temps d'acquisition très court. » (53)

Dans une partie précédente nous avons vu ce dont sont capables les caméras intrabuccales dans l'enregistrement des données cliniques. La possibilité d'enregistrer les arcades dentaires en couleur leur permet d'apporter les mêmes renseignements cliniques que les photographies intra-buccales. Ces caméras peuvent suppléer voire remplacer la prise de photos intrabuccales, permettant ainsi un gain de temps intéressant. En effet, ces deux étapes distinctes se regroupent en une seule.(54)

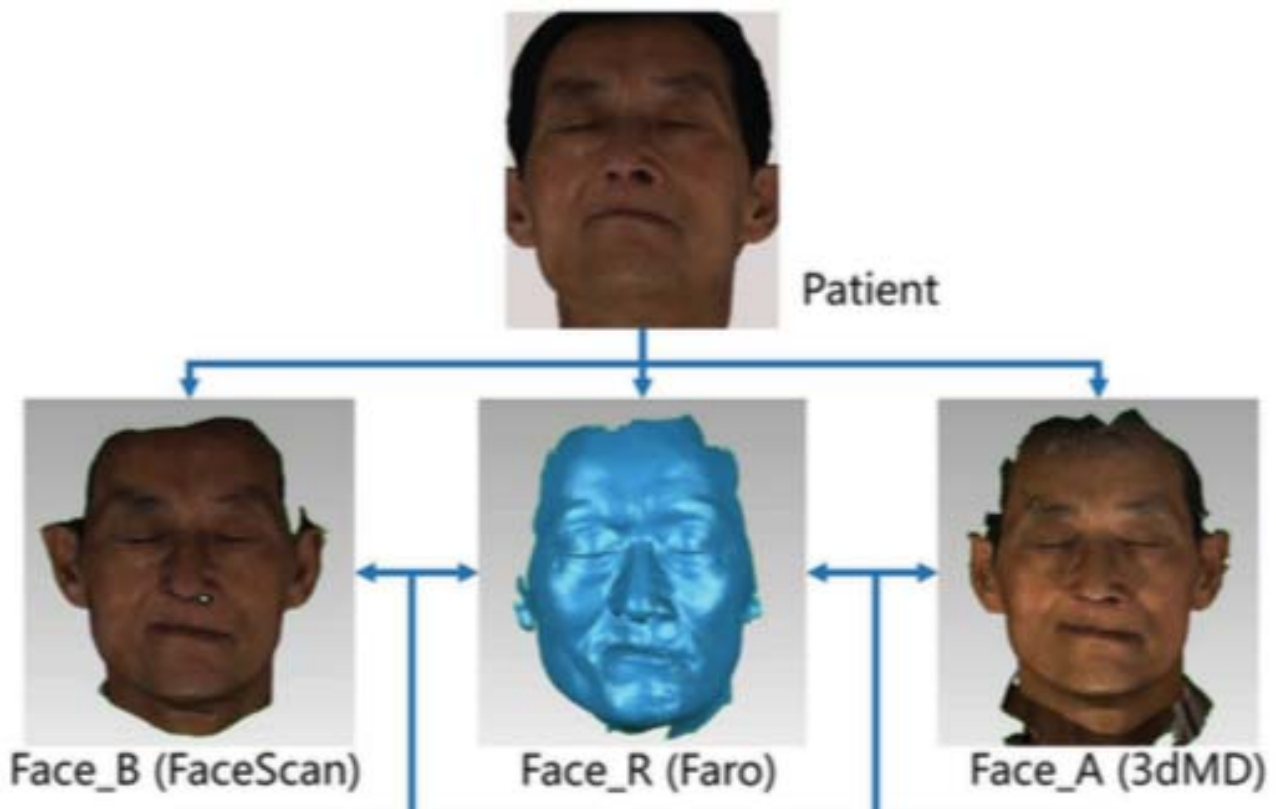
Pour ce qui est de l'acquisition de données extraorales en trois dimensions (3D), il existe des scanners faciaux. Non invasif et non ionisant, leur utilisation est de plus en plus courante, permettant la

reconstruction de la tête et de la face du patient. Ces données numérisées (comme pour la photographie 2D) permettront une analyse des déformations craniofaciales, d'aider à poser un diagnostic, la planification d'un plan de traitement et le suivi dans le temps de l'évolution des traitements. (55)

Il existe deux types de scanners faciaux, selon la technologie employée :

- La stéréophotogrammétrie. Cette technique est basée sur la prise de plusieurs photographies, selon des points de vue différents et combinées afin de réaliser un modèle 3D. Ainsi il est nécessaire d'avoir plusieurs objectifs qui prennent une photo simultanément afin d'obtenir une position similaire du patient sur les différentes photos. (56)
- Le scanner à lumière structurée et scanner laser. La différence entre ces deux techniques est la longueur d'onde d'émission de la lumière. Le scanner laser émet de la lumière à des longueurs d'ondes invisibles contrairement au scanner à lumière structurée. Une source projette la lumière et une caméra enregistre la déformation de cette lumière.(57)

Plusieurs études s'accordent à dire que la stéréophotogrammétrie et le scanner à lumière ont une précision similaire, mais que la stéréophotogrammétrie est supérieure par son temps d'acquisition. En effet il n'est nécessaire que de 1,5ms pour scanner la face entière du patient contre une dizaine de secondes pour le scanner à lumière. (53,56,58)



Comparaison de différentes techniques d'acquisitions(53)

Parmi les avantages du scanner facial par rapport aux photographies 2D on trouve :

- La possibilité de manipulation sur l'ordinateur du scan facial (zoom, rotations), permettant ainsi une meilleure analyse, dans tous les sens de l'espace, ainsi que la modification des données numériques dans le cadre d'une planification de chirurgie orthognatique ;
- La possibilité de fusionner ces données avec les modèles numérique issus de CBCT et empreinte numérique ;
- Des mesures linéaires jugées plus précises, surtout au niveau des lèvres et du menton grâce à l'acquisition de données 3D ;
- La possibilité de réaliser des superpositions en cours et à la fin du traitement d'un patient ;
- D'après certains auteurs, l'acquisition de données serait plus simple chez les jeunes patient grâce à la prise rapide de données et nécessitant moins de coopération que pour des photographies classiques, surtout pour la stéréophotogrammétrie.(27,55,56,58,59)

Les inconvénients majeurs de cette technique sont :

- Le coût des scanners, surtout pour ceux utilisant la stéréophotogrammétrie (entre 3000€ et 30 000€)
- La nécessité d'une pièce spécialement conçue pour le scanner à cause de l'installation et des réglages stricts.

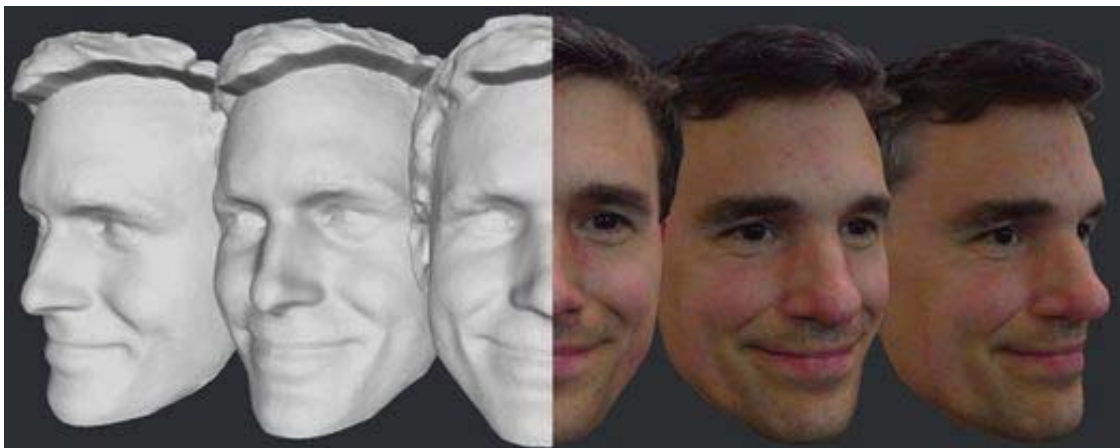
Exemple de scanners faciaux :

- Stéréophotogrammétrie : 3dMDface System® (3dMD, Atlanta, GA, USA), Vectra® H1 (CANfiel Imaging Systems, Fairfield, NJ, USA), Face Shape 3D Maxi Line (Polishape 3D Srl, Bari, Italie);
- Scanner à lumière : DAVID SLS (DAVID Vision Systems GmbH), FaceSCAN3D®, ProMax® 3D Mid (Planmeca, Helsinki, Finlande).

Une autre solution existe, beaucoup plus abordable, mais dont la précision n'a pas encore été documentée dans des recherches cliniques. Il s'agit de Bellus3D™ (Campbell, CA, USA), entreprise qui a développé une application, Dental Pro, de scanner facial fonctionnant directement avec les iPhones de la gamme X (X, Xr, Xs) et iPad Pro. Ils ont par la suite développé une caméra annexe, Face Camera Pro, permettant un scan via Android ou sur Windows.

Ils annoncent un scan total de la face du patient en 15-20 secondes, précision de 0,4mm et permettent une exportation des données en format ouvert afin de créer des fusions avec d'autres données comme un CBCT. Niveau prix, la caméra coute 500\$ et l'application possède deux versions pour 700\$ ou

1200\$ par an. Cette application semble intéressante, mais le prix reste élevé et des études complémentaires sont nécessaires afin de valider sa précision et les caractéristiques énoncées.(60)



Scan facial réalisé à partir de Bellus3D (60)

2.5. Les modèles numériques

2.5.1. Présentation

Le modèle d'étude numérique est la finalité de la numérisation des différents éléments cliniques. Que ce soit via le scanner intra-oral, le scanner extra-oral, le CBCT ou le scanner facial, toutes ces techniques aboutiront à des modèles numériques, étudiables et analysables via les logiciels adéquats. Certains logiciels proposent même la fusion des différents modèles obtenus via différentes techniques (scanner intra-oral et CBCT le plus couramment). Ainsi, avec l'apport de tout cela, il devient possible de créer un patient numérique avec toutes les informations nécessaires pour réaliser son diagnostic et établir au mieux le plan de traitement.



Modèle numérique des arcades en occlusion dans OrthoAnalyzer de 3Shape®

Le point le plus important dans cette procédure d'obtention de données cliniques sous forme de modèles numériques est la qualité de l'enregistrement obtenu et donc la précision proposée par les différents matériels. Cette précision est importante à différentes étapes de travail : lors du diagnostic, lors du set-up numérique et de la visualisation des objectifs de traitement, lors de la conception et fabrication des moyens thérapeutiques. Une mauvaise précision d'enregistrement et ainsi une mauvaise concordance entre la réalité et le modèle numérique se répercutera sur toute la chaîne de travail. La recherche de la meilleure précision se fera par l'étude des différentes techniques d'enregistrement et la comparaison du matériel proposé par les nombreux acteurs du marché.

Le Dr B. ROGER(61), dans un article paru en 2016, faisait un calcul des valeurs numériques d'imprécision, grâce à un logiciel de conception mécanique, entre le point numérisé et le point imprimé selon différentes méthodes. Il en ressort plusieurs valeurs selon la méthode :

- Empreinte, coulée du plâtre, scan du modèle en plâtre, conception puis impression : valeur de 100
- Empreinte classique, scan de l'empreinte, conception puis impression : valeur de 50
- Empreinte numérique, conception puis impression : valeur de 20

On voit grâce à cela que la valeur de l'imprécision est divisée par 5, et l'importance que prend cette chaîne numérique dans la mise en place de thérapeutiques numériques.

2.5.2. Avantages et intérêts des modèles numériques

En comparaison aux méthodes de prise d'empreinte physique classique et à la coulée des modèles en plâtres, les modèles numériques présentent comme avantages (27,62–65) :

- Ils ne sont pas sujet à des dommages physiques ou dégradation (problème lors du transport, de la coulée de l'empreinte ou lors du démoulage de l'empreinte)
- La communication et l'envoi sont facilités avec le prothésiste
- Ils permettent de communiquer avec le patient plus facilement
- Ils libèrent un espace de stockage qui était nécessaire pour les modèles en plâtre
- Ils offrent la possibilité de faire des set-ups virtuels des objectifs de traitement
- Les modèles d'études numériques permettent de faire des superpositions/fusions provenant de différentes techniques d'acquisitions
- Grâce aux empreintes optiques, il y a la possibilité de visualiser directement l'empreinte et donc le modèle numérique
- Grâce à certains logiciels, il est possible d'obtenir des diagnostics calculés par ordinateur
- Le flux numérique permet une réduction du nombre d'étapes entre l'empreinte et le modèle d'étude ou de travail

- Les modèles numériques permettent la manipulation, en zoomant, tournant, sélectionnant les zones souhaitées

2.5.3. Inconvénients et limites :

A contrario, les modèles numériques présentent quelques inconvénients par rapport aux techniques d’empreinte et de coulée classique (62,64,65) :

- L’achat du matériel représente un coût élevé pour les différentes techniques, qui de plus évoluent vite et peuvent vite se retrouver désuètes
- Il existe un risque de perte de données informatiques à cause de défaillances informatiques, provoquant une perte importante des enregistrements réalisés
- Il est parfois nécessaire d’obtenir un modèle physique pour la conception et fabrication de certains appareils orthodontiques, ce qui ainsi, ne réduit pas le nombre d’étapes et nécessite même du matériel supplémentaire pour le prothésiste.
- Il est nécessaire de prendre le temps de s’adapter afin de bien maîtriser ces technologies. Ce temps d’adaptation représente une perte de temps et d’argent.
- La fiabilité des logiciels ou matériel dans l’enregistrement et la mesure des données cliniques est importante et inégale selon les moyens choisis. De plus s’il est nécessaire de réaliser l’impression de modèle physique, se pose la question de la précision de l’imprimante.

2.5.4. Comparaison entre modèles numériques et modèles en plâtre

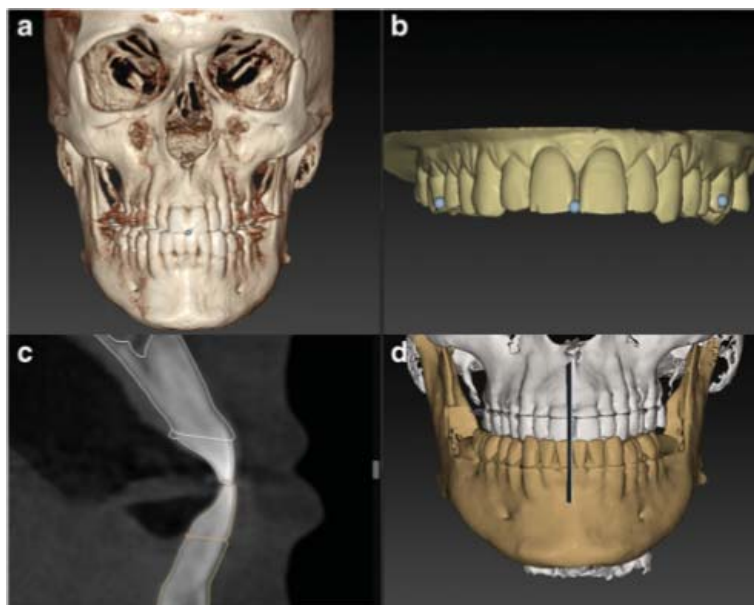
Comme explique précédemment, le point crucial lors de l’utilisation de modèle numérique est de savoir si l’on peut se fier à la précision à la fois du software et du hardware (caméra intra buccale et CBCT essentiellement) utilisés. Plusieurs études se sont penchées sur cette interrogation, en comparant des mesures réalisées sur des plâtres et des mesures réalisées sur des modèles numériques des mêmes arcades. De ces études il en ressort que :

- Il existe des différences de mesures, mais elles sont cliniquement acceptables. (27,62,62,66–70)
- Une étude a trouvé des différences significatives mais les attribue à un souci logiciel ou un manque d’application dans la prise de l’empreinte numérique. (63)
- Les mesures sur les modèles numériques sont meilleures et plus précises que sur des modèles en plâtre. (71)

2.5.5. Possibilités des logiciels

Afin de visualiser, analyser et permettre la conception d'appareils orthodontiques, il est nécessaire de posséder un logiciel puissant adapté. Il existe presque autant de logiciels que de scanners, chaque fabricant essayant de se placer au mieux dans cette concurrence de marché. Malgré cela, certains logiciels sont plus intuitifs, plus puissants, mieux conçus et offrent plus de possibilités que d'autres. L'uniformisation des formats des fichiers (en «.stl » pour tous les scanners et « DICOM » pour les CBCT), a permis l'utilisation de software (logiciel) et hardware (matériel) de fabricant différents. Pour qu'un logiciel soit intéressant à utiliser, il faut qu'il permette :

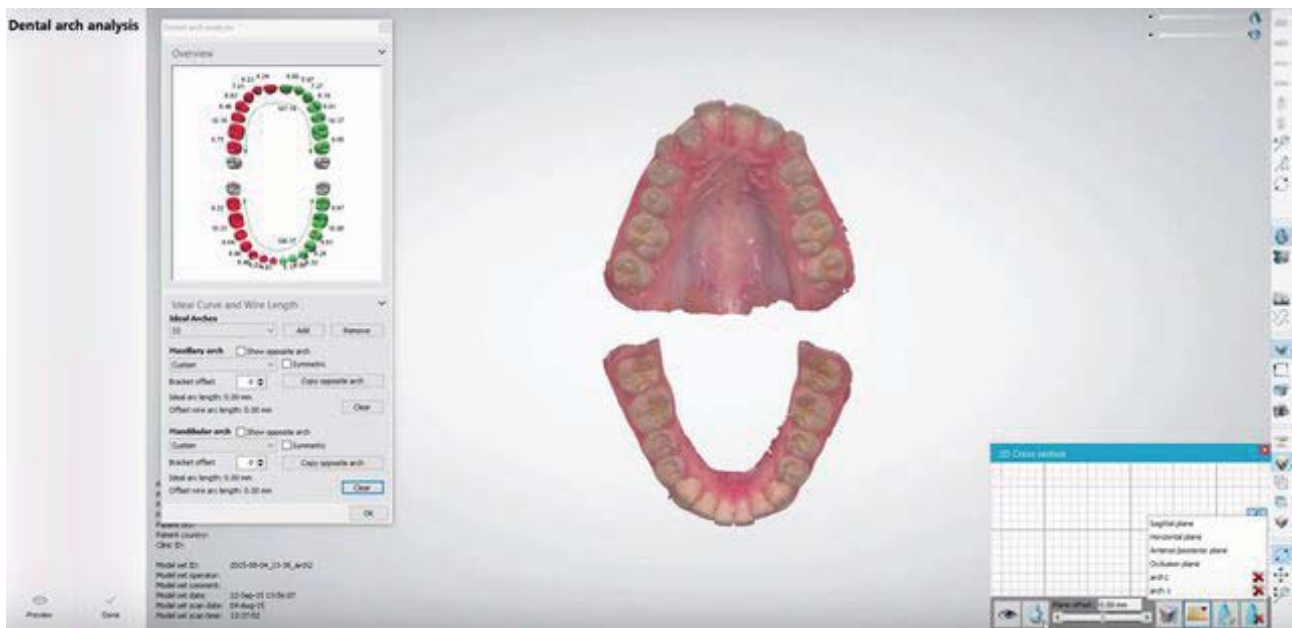
- La visualisation et manipulation des modèles sous tous ces angles
- Le calcul de mesures linéaires et angulaires, ainsi que la génération de différentes analyses orthodontiques
- La simulation des traitements
- Idéalement la possibilité de mettre en œuvre les traitements via la configuration d'aligneurs ou gouttières de transfert.



Fusion entre images provenant d'un CBCT et d'un scan intra-oral(72)

Parmi les logiciels les plus répandus sur le marché, on retrouve :

- OrthoAnalyzer de 3Shape
- OrthoCAD de AlignTechnology
- Romexis de Planmeca
- CS Model de Carestream



Exemple d'interface avec le logiciel OrthoAnalyzer de 3Shape(73)

3. Apport du numérique aux applications thérapeutiques

Dans la lignée des évolutions technologiques, la mise en place des thérapeutiques évolue. Que ce soit pour l'amélioration de la mise en place des thérapeutiques fixes ou l'utilisation d'aligneurs, l'utilisation du numérique a pour but de faire gagner en précision et rapidité les thérapeutiques orthodontiques. Des solutions permettant de se passer de prothésistes pour la majorité des traitements sont aussi développées.

3.1. Le setup numérique

A la suite de l'étude des modèles et la pose d'éléments diagnostiques, vient l'étape de planification de traitement. Cette étape indispensable pour un bon déroulement du traitement et afin d'obtenir les résultats escomptés passe par la réalisation d'un « Setup ».

Ce setup est une simulation des mouvements dentaires du début à la fin du traitement selon des objectifs déterminés. La simulation de la correction des malocclusions du patient permettra de mettre en évidence l'importance du traitement, s'il est nécessaire de réaliser des avulsions ou non.

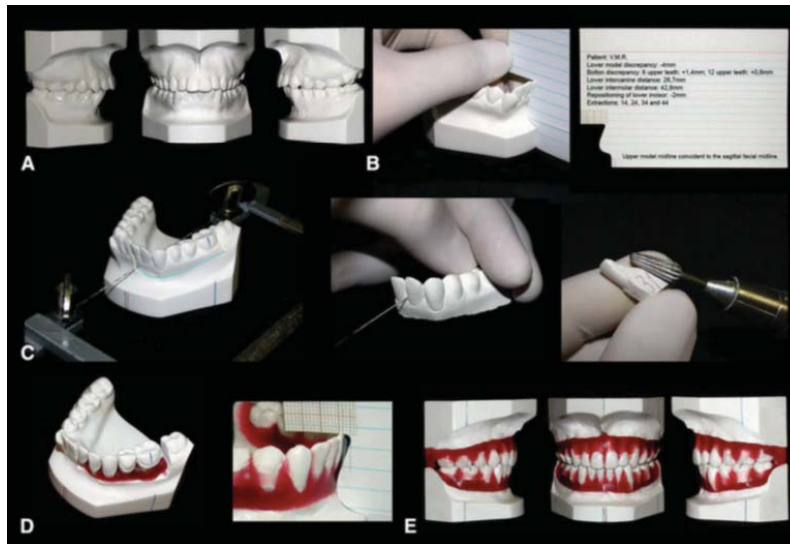
Traditionnellement réalisées sur des modèles en plâtre, il est maintenant possible de faire ces simulations via les logiciels d'analyse orthodontique à partir des modèles numériques préalablement créés.

3.1.1. Le setup traditionnel

Cette technique a été introduite par Harold Kesling, afin de fabriquer un positionneur de fin de traitement. Pour mettre en place cette technique, il faut séparer chaque dent en plâtre du modèle et les refixer dans de la cire collée sur le modèle en plâtre, et ce dans la position souhaitée.

La première étape consiste à positionner l'incisive centrale mandibulaire selon la correction céphalométrique, puis placer les dernières molaires (ou des butées de cire) selon la dimension verticale du patient. Ensuite le reste des dents est placé selon les critères occlusaux déterminés.

(65,74)



Exemple de setup traditionnel(65)

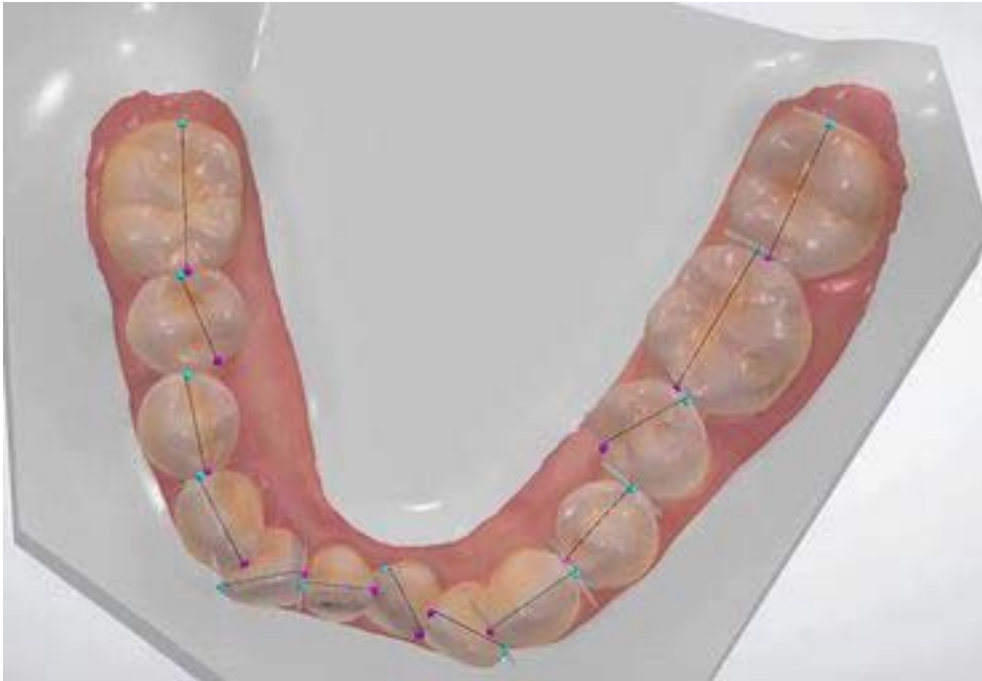
L'inconvénient principal de cette technique est que les superpositions ne sont pas possibles. Lorsqu'un nouveau setup est réalisé, l'ancien est forcément détruit, rendant la comparaison à différents temps de traitement difficile. De plus cette technique se révèle très chronophage, décourageant souvent les praticiens, qui choisiront souvent de se fier plus simplement à leur expérience et leur intuition.(65)

3.1.2. Le setup numérique

Dans la lignée de l'acquisition des données cliniques du patient et la construction de modèles numériques, la création d'un setup virtuel est un outil indispensable pour l'orthodontiste dans la planification de son traitement. Grâce à l'utilisation de logiciels adaptés comme OrthoAnalyzer (3Shape), OrthoCAD et Clincheck (Align Technology) ou encore SureSmile (Dentsply Sirona) le setup est généré à partir des modèles numériques et selon différents critères établis par l'orthodontiste. En effet, pour aboutir à des simulations de traitement cohérentes, il conviendra d'effectuer une étape de préparation des modèles numériques. Ainsi cela nécessitera plusieurs étapes (75) :

- Définir le plan d'occlusion, le plan sagittal, le plan horizontal et le plan antéro-postérieur ;
- Fractionner les modèles maxillaire et mandibulaire. Ce fractionnement aura pour objectif de
 - Définir la composition de la rangée de dents, indiquer les dents manquantes, en cours d'éruption ou n'ayant pas commencée leur éruption afin de calculer l'espace requis.
 - Segmenter les dents en fonction de leurs caractéristiques
 - Définir l'axe de la couronne qui sera utilisé comme base pour tous les déplacements de dents
 - Modifier la position du centre de rotation de la dent

- Il est possible de définir une arcade idéale dans certains logiciels.

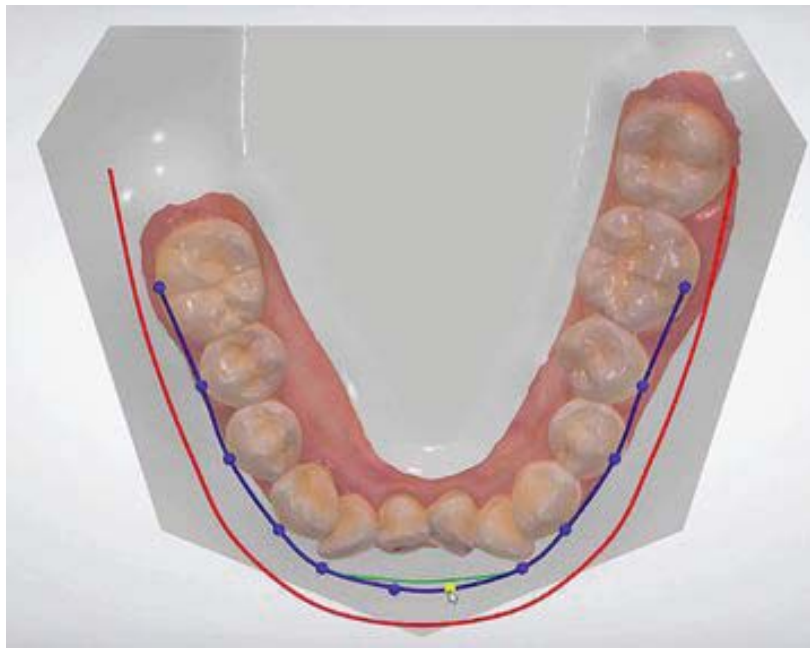


Délimitation des dents de l'arcade sur Clear Aligner Studio de 3Shape®(76)

Après avoir indiqué ces éléments, la simulation peut commencer. Soit le praticien laisse le logiciel simuler pour arriver à une arcade idéale préalablement définie, soit il bouge lui-même les dents pour arriver à l'arcade souhaitée. Les mouvements proposés vont dans tous les sens de l'espace (torque, tipping, ingression et égression, rotation, translation antéro-postérieur). Une fonction de collision permet au praticien de se rendre compte des dents qui se chevauchent lors de sa simulation, de l'ampleur de ce chevauchement et ainsi de décider d'une thérapeutique particulière pour ces chevauchements (stripping ou extraction).(75)



Indication de stripping entre les dents sur Clear Aligner Studio de 3Shape®(76)



Positionnement des dents selon une arcade « idéale » Clear Aligner Studio de 3Shape®(76)

3.1.3. Setup traditionnel VS setup virtuel

Après l'explication de ces deux techniques, il apparaît que les setups virtuels présentent de nombreux avantages vis à vis des setups traditionnels (65,74):

- Ils possèdent tous les avantages des modèles numériques par rapport à des modèles en plâtres, décrits dans les parties précédentes.
- Ils sont moins chronophages, même si leur réalisation nécessite un peu d'entraînement afin de sa faire rapidement
- Facile à dupliquer, permettant ainsi de recommencer plusieurs fois différentes simulations.
- Il est possible de comparer le modèle initial au modèle final grâce à des superpositions.
- Ils permettent une expertise diagnostique grâce aux outils logiciels et de mieux se rendre compte de ce qui est possible ou non.
- Ils permettent aussi une meilleure communication avec le patient qui visualise facilement le but de son traitement. Cela permet de mieux le faire participer à son traitement et d'augmenter sa coopération.
- Ces setups serviront aussi de base pour la création et fabrication d'appareils orthodontiques fixes ou amovibles par la suite.

Comme lors de l'enregistrement des données cliniques du patient grâce aux caméra optiques ou CBCT, il est nécessaire de se poser la question de la fiabilité et de la précision de ces setups. Plusieurs études se sont penchées sur la question :

- Une thèse C. Blais de l'Université de Montréal en 2016 (77), compare les résultats après un traitement avec Invisalign® et la simulation ClinChek®. La différence trouvée entre les deux n'est pas statistiquement significative.
- Une étude de M. Barreto et al. (78) comparant la fiabilité des setups traditionnel et numérique conclut : « Sur la base de ces résultats, il peut être déduit que les setups numériques sont aussi efficaces et précis que les setups manuels et constituent un outil de diagnostic et de planification de traitement qui peut être reproduit de manière fiable dans les traitements orthodontiques. »
- Fabels et Nijkamp (79) ont comparé la fiabilité intra et inter examinateur dans la création de setups virtuels. Ils en viennent à la conclusion qu'il existe une différence significative selon leur score statistique lors de la création des setups, qui pourrait avoir des répercussions cliniques (paramètres non testés).
- Une étude comparant des setups virtuels et manuels avec des modèles numériques et de plâtre dans des cas d'extraction de Im et al. (80) conclut que « Les setups numériques et manuels conduisent à des mesures similaires pour les variables occlusales intra-arcade et interarcade. »
- Enfin une étude s'intéressant à la précision des processus de traitement SureSmile®, estime que les setups virtuels peuvent être utilisés à des fins cliniques via la fabrication de solutions assistées par ordinateur.(81)

A la vue de toutes ces études, il apparaît que les setups virtuels semblent aussi précis et fiables que les setups traditionnels et peuvent être utilisés pour réaliser des simulations de traitement fiables. Malgré tout, plusieurs éléments doivent être pris en compte pour la bonne réalisation de ces derniers. En effet, la possibilité de placer la dent comme on le souhaite dans le logiciel peut conduire à des situations non réalisables cliniquement. De plus, l'absence de la racine et de son angulation occulte une partie importante de la dent et de ses possibilités de mouvement. Il est de ce fait possible de se retrouver avec des mouvements possibles sur le logiciel mais impossibles cliniquement à cause des racines.

C'est pour cela qu'une étude (51) s'est intéressée à la réalisation de setup virtuel comprenant les modèles numériques fusionnés à des images de CBCT permettant la fusion et la visualisation des racines. Bien que chronophage et nécessitant plus de matériel, ces données sont intéressantes et posent les bases d'une évolution des techniques afin d'augmenter la précision et la fiabilité des setups pour se rapprocher au maximum de la réalité.

3.2. Traitement par aligneurs

3.2.1. Principe

Le principe de traitement par des gouttières d'alignement est apparu au milieu du 19^{ème} siècle, après la découverte de mouvement résiduel lors d'un port de gouttières dont le but était de masser les gencives chez les patients atteints de parodontites. Par la suite, les gouttières ont été limitées à des traitements ne nécessitant que de très faibles corrections de DDM ou pour des phases de contention. C'est en 1997 que fut créée et développée la société Align Technology, leader du marché et pionnière des traitements orthodontiques par gouttières d'alignement grâce à sa solution Invisalign. Cette technique basée sur une séquence de gouttières transparentes, permettait de réaliser de faibles corrections au début des années 2000. Grâce au développement des technologies et le besoin de rester leader, Invisalign permet de nos jours de corriger presque toutes les malocclusions.

D'autres solutions qu'Invisalign existent, elles sont nombreuses et de nouvelles apparaissent tous les jours, mais son plus gros concurrent actuellement est le système TwinAligners de OrthoCaps. Il existe aussi une solution, encore très marginale dans le monde de l'orthodontie, qui consiste à effectuer la fabrication de ses gouttières directement au cabinet grâce à un matériel spécifique.

Les gouttières d'alignement présentent plusieurs avantages par rapport aux thérapeutiques fixes :

- Esthétique : en effet, ces gouttières sont transparentes et de ce fait presque invisibles lorsque le patient les porte.
- Plus grand confort
- Meilleur contrôle de plaque grâce à leur amovibilité
- Diminution du nombre de rendez-vous pour le patient, et les rendez-vous de renouvellement de jeux de gouttières sont plus courts que les rendez-vous de thérapeutique fixe.

Mais les aligneurs comportent des inconvénients ou limites :

- Système amovible : il est nécessaire que le patient soit très coopérant pour que le traitement se déroule correctement. S'il ne porte pas ses gouttières comme il faut (20h par jour), le traitement sera inévitablement rallongé.
- Coût : Il oscille entre 3500 et 5000 euros le traitement pour la version comprehensive package, ce qui représente une dépense plus importante que pour les techniques fixes.
- Les aligneurs ne permettent pas de traiter tous les cas de malocclusions pour le moment. En effet, même si les fabricants d'aligneurs promettent de tout traiter, en réalité, certains mouvements sont difficiles à effectuer avec des aligneurs (82):

- Fermeture d'espaces d'extractions
- Mouvement de translation
- Mouvement d'extrusion/ingression
- Mouvement de grande rotation
- Le contrôle des mouvements parasites des racines
- L'ajustement de l'occlusion

3.2.2. Invisalign de Align Technology (83)

Comme évoqué précédemment, le système repose sur le port de gouttières d'alignement, qui sont changées toutes les deux semaines. Le temps de traitement dépendra de l'importance et de la complexité du cas. Il existe ainsi 5 types de traitement :

- InvisalignGo : destiné aux omnipraticiens, il ne permet de corriger que de faibles décalages et comporte une séquence allant jusqu'à 20 jeux de gouttières différentes
- Invisalign I7 : ce traitement concerne les corrections mineures de canine à canine, et ne comporte que 7 jeux de gouttières
- Invisalign Lite : pour les cas un peu plus complexes, comportant jusqu'à 14 jeux de gouttières
- Invisalign Teen : traitement classique mais dédié aux adolescents. Ces gouttières comportent des spécificités de la denture mixte (languette d'éruption et compensateur d'éruption)
- Invisalign Comprehensive package : Traitement classique, utilisé pour la majorité des cas.



Gouttières Invisalign®

Comme lors de tous les traitements orthodontiques, la première phase est la phase de recueil des données du patient : examen clinique et radiographique, photographies, empreintes. Lors de la phase d'empreinte il existe deux solutions, l'empreinte physique ou l'empreinte numérique. Si le praticien réalise une empreinte physique, Invisalign met à disposition des porte empreintes en plastique de

différentes tailles. Pour ce qui est de l’empreinte numérique, bien qu’Align Technology ait développé une caméra optique (iTéro), il est maintenant possible de réaliser son empreinte avec n’importe quelle caméra optique, grâce au format de fichier ouvert («.stl »).

La réalisation du setup et la planification du traitement du patient se font sur un logiciel dédié, ClinCheck. Le praticien a deux possibilités :

- Réaliser lui-même son setup ;
- Envoyer l’empreinte vers un laboratoire, où un technicien de laboratoire fera un setup. Ensuite le praticien validera ou modifiera lui-même le setup.

En complément des gouttières, il est nécessaire de placer des attachements sur les dents afin que les gouttières puissent exercer leurs forces. Ces attachements ont évolué et on distingue les attachements standards des attachements personnalisés et optimisés. Ainsi ils peuvent être actifs pour déplacer une dent ou bien seulement servir de moyen de rétention pour la gouttière. Ces attachements sont créés par Invisalign et ensuite collés par le praticien.

Les gouttières sont ensuite créées par Invisalign, dans un matériau permettant des forces douces (technologie appelée « SmartTrack »). Le processus de fabrication est automatisé et réalisé à grande échelle, tout en étant personnalisé selon chaque cas. Dans un premier temps, des modèles physiques sont créés par impression 3D (stéréolithographie apparatus) pour chaque étape de traitement, puis les gouttières sont fabriquées par thermoformage. Un robot va ensuite amener les gouttières à une machine automatique qui va couper et séparer la gouttière. Enfin les gouttières sont polies, nettoyées, désinfectées et emballées.

Après ces étapes de conception et fabrication des aligneurs, arrive l’étape de la remise des gouttières au patient (plusieurs jeux car il change lui-même toutes les semaines ou deux semaines). Il est nécessaire lors de cette visite, de lui rappeler les conseils primordiaux pour que le traitement atteigne son efficacité maximale :

- Hygiène buccodentaire irréprochable, nettoyage des gouttières quotidiennement pour s’assurer de les garder transparentes
- Porter les gouttières 20h sur 24h au minimum.

Le suivi du patient se déroulera avec des visites de contrôle toutes les 6 à 8 semaines pour s’assurer du bon déroulement du traitement.

3.2.3. TwinAligners de OrthoCaps

Développé par une société allemande en 2006, ce système repose sur le port alterné de gouttières rigides et souples. En effet, une première gouttière rigide et mince est portée le jour (10h environ) et une seconde gouttière souple et épaisse est portée la nuit (10h environ aussi).

L'entreprise propose 3 types de traitement différents :

- Orthocaps classic : pour les traitements de classe II et III nécessitant des élastiques
- Orthocaps pro : pour les cas nécessitant des taquets ou patins de friction
- Orthocaps MxD : pour les traitements en denture temporaire avec réévaluation et nouveau setup à chaque phase de traitement.

Les enregistrements cliniques et les phases de fabrication sont identiques au système Invisalign. Mais la société se différencie de son concurrent par une innovation dans les taquets avec des surfaces rugueuses collées sur les dents presque invisibles et ainsi plus discrètes que les taquets collés sur les dents.



Système TwinAligners

3.2.4. Conception et fabrication des aligneurs au cabinet

La conception et la fabrication de gouttières d'alignement directement au cabinet existent. Comme pour les solutions précédentes, il est nécessaire de faire une anamnèse et un enregistrement des données cliniques du patient. Lors de l'étape de conception des aligneurs il est nécessaire d'utiliser un logiciel adapté comme OrthoAnalyzer de 3Shape et son extension Clear Aligner Studio. Le logiciel permet d'effectuer un setup, de programmer le nombre de gouttières nécessaire au traitement. Cette étape est souvent réalisée par le prothésiste, dans un laboratoire spécialisé, mais il est tout à fait possible de la réaliser au cabinet. Il sera nécessaire pour cela de se former ou bien de former une de ses assistantes afin de comprendre toutes les fonctionnalités du logiciel et ainsi de pouvoir réaliser le traitement de la meilleure des manières.

L'étape suivante est la réalisation des gouttières. Celle-ci se fait la plupart du temps en 2 phases :

- Impression d'un modèle physique correspondant à l'étape du setup, grâce à une imprimante 3D
- Thermoformage de la gouttière puis découpage, polissage et nettoyage de celle-ci.

Comme lors de l'étape de conception numérique des gouttières, il est possible de déléguer cette étape à une assistante formée à cette tâche. En effet, la réalisation d'aligneurs au cabinet est un processus très chronophage pour le praticien. Il nécessite la manipulation du logiciel, puis l'utilisation de l'imprimante et enfin la dernière étape de mise en forme de la gouttière. L'impression de la gouttière directement grâce à l'imprimante est possible mais plus compliquée à mettre en place, cette partie sera mieux développée dans le 3.4.

3.3. Thérapeutiques fixes par collage indirect

L'apport du numérique dans les techniques de conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) a apporté un nouvel élan aux techniques de collage indirect. Ces techniques se décomposent en deux groupes, les techniques fixes vestibulaires et les techniques fixes linguales. L'apport du numérique permet un gain de temps et de précision considérable par rapport aux techniques traditionnelles.

3.3.1. Thérapeutique fixe vestibulaire par collage indirect

Cette thérapeutique, introduite en 1972, a pour but de créer une gouttière de transfert afin de pouvoir positionner toutes les attaches orthodontiques en un seul temps. L'objectif de cette technique est d'améliorer la précision et la qualité du collage des attaches orthodontiques.

Afin de comprendre l'apport du numérique à cette technique, nous allons décrire les étapes de la technique conventionnelle (84) :

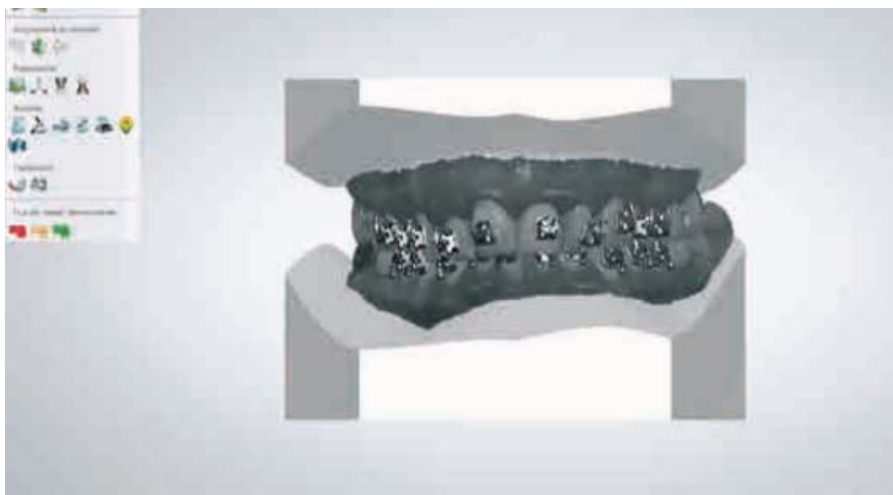
- Réalisation d'une empreinte classique en alginate
- Coulée de l'empreinte en plâtre ou silicone
- Positionnement des attaches orthodontiques par l'orthodontiste ou un technicien expérimenté. Ces attaches sont collées car elles ne doivent pas bouger lors de la réalisation de la gouttière de transfert, ce qui pourra induire des erreurs lors du placement en bouche si elles ont été mal nettoyées.
- Réalisation de la gouttière de transfert. Plusieurs matières sont possibles, avec des avantages et inconvénients pour chaque : silicone opaque, silicone transparent, matériau thermoplastique monocouche ou bicouche.
- Transfert en bouche : positionnement de la gouttière sur l'arcade du patient et collage des attaches orthodontiques.



Placement des attaches orthodontiques sur le modèle en plâtre(85)

Pour ce qui est des techniques développées récemment grâce au numérique, les étapes de réalisation de la gouttière de transfert se déroulent ainsi (86):

- Réalisation d'une empreinte numérique grâce à une caméra optique ou réalisation d'un scan de l'empreinte classique en alginate (ou du modèle en plâtre)
- Positionnement des attaches orthodontiques numériquement. Deux possibilités s'offrent au praticien dans ce cas :
 - Positionner lui-même les brackets via un logiciel adapté (OrthoAnalyzer®, OrthoCAD®)
 - Passer par un laboratoire spécialisé afin de réaliser le positionnement numérique puis de valider par la suite ce travail (Insigna™, SureSmile®, 3Shape®)
- Réalisation de la gouttière de transfert ou des boîtiers de positionnement (« jigs ») via imprimante 3D. Différents systèmes existent selon les marques disponibles.



Placement virtuel des attaches orthodontiques(86)

Peu importe la technique utilisée afin de réaliser les gouttières de transfert, la réalisation d'un collage indirect des attaches orthodontiques présente différents avantages vis à vis du collage direct (84,86,87):

- Gain de temps au fauteuil pour le praticien
- Confort pour le praticien et le patient
- Diminution de la contamination liée à l'humidité et ainsi augmentation de la qualité du collage, réduisant de ce fait les chances de décollement des attaches orthodontiques.
- Certains avancent une meilleure précision dans le placement des brackets, essentiellement en postérieur, mais aucune étude n'arrive à démontrer une différence significative. Cela est essentiellement dû à une difficulté de réalisation d'une étude in-vivo sur ce thème. Cela reste très subjectif et praticien dépendant.
- Un autre avantage supposé découlant du point précédent est la réduction du temps de traitement. Ce point est surtout avancé par les laboratoires, mais sans études concrètes pour le prouver.

Comme toutes nouvelles techniques, celle-ci présente aussi des inconvenients vis à vis de la technique classique (84,86,87):

- Le coût supérieur de la mise en place de cette technique car en effet, cela nécessite un matériel en plus :
 - Achat d'une caméra optique pour réaliser ses empreintes numériques
 - Étapes supplémentaires via un laboratoire ou achat d'une imprimante 3D
- Cela nécessite aussi un temps d'apprentissage pour prendre en main le logiciel de CFAO, ce qui peut donner l'impression d'être perdu dans un premier temps.
- Enfin, même si le temps au fauteuil est plus faible, il peut se révéler plus long dans l'ensemble de la mise en place du traitement (surtout au début de l'apprentissage de la technique)

Comme évoqué précédemment, lors de la mise en place du flux numérique dans les étapes de collage indirect, il est nécessaire pour la réalisation des gouttières de transfert de soit passer par un laboratoire, soit de réaliser soi-même cette gouttière, grâce à une imprimante 3D (protocole de CFAO). Ci-dessous je vais décrire un exemple de laboratoire proposant cette solution et un exemple de réalisation de gouttières directement au cabinet.

Insignia™ (88,89)

Développé par la société ORMCO™, Insignia™ est le leader mondial et pionnier du collage indirect. Cette solution propose un « système de brackets entièrement personnalisé qui s'appuie sur une technologie de pointe en orthodontie numérique ». Après l'envoi par le praticien des empreintes réalisées (qu'elles soient physiques ou numériques), le laboratoire réalise lui-même le setup numérique et ainsi propose une simulation de traitement au praticien. Cette simulation doit être validée par le praticien grâce au logiciel Insigna Approver.

Une fois la simulation approuvée, Insignia™ fabrique les brackets et l'arc propres au patient. Les boîtiers sont des boîtiers auto-ligaturant Damon™ fabriqués sur-mesure permettant d'obtenir une meilleure précision grâce à des imprimantes 3D laser. Des boîtiers de positionnement (« jigs ») s'adaptant à l'anatomie de la dent (et n'ayant qu'une seule position) sont aussi créés, grâce à des imprimantes 3D, pour permettre le collage indirect des attaches orthodontiques.

Le praticien reçoit par la suite un paquet contenant les brackets personnalisés, 5 arcs maxillaires et mandibulaire pour la durée du traitement, les jigs transparents pour le collage (un set original et un de rechange). Il ne lui reste plus qu'à effectuer le collage des brackets grâce aux jigs, tout en contrôlant qu'il n'y ait pas d'erreurs.



Jigs pour transfert en bouche réalisés par Insignia(88)

Protocole de CFAO au cabinet utilisant OrthoAnalyzer® de 3Shape

Ce protocole a été décrit dans un article par P. Pichon et A. Cavaré en 2019 (86). Le but de l'article est de décrire un protocole répondant à un certain cahier des charges :

- Le flux numérique est présent dans les trois étapes
- Sans intervention extérieure, en autonomie au cabinet d'orthodontie
- Positionnement automatisé plus rapide que le collage indirect conventionnel
- Positionnement plus précis
- Sous le contrôle direct de l'orthodontiste
- La gouttière de transfert doit être entière et non parcellaire

- Protocole reproductible
- Surcout modéré par rapport au collage direct

Deux protocoles ont été décrits afin d'essayer de mettre en évidence laquelle de ces deux méthodes est la plus fiable, précise, facile à réaliser et répondant au mieux au cahier des charges. La différence majeure entre ces deux protocoles est le type de gouttière utilisée :

- La première méthode réalise des gouttières de transfert par thermoformage selon la méthode des doubles gouttières, sur un modèle imprimé où les attaches ont été placées préalablement.
- La seconde méthode réalise la gouttière via l'impression 3D puis cuisson afin d'assurer la biocompatibilité.

Le transfert en bouche est identique pour les deux méthodes et ces deux protocoles sont décrits plus en détails sur le schéma ci-dessous.



A gauche la gouttière thermoformée, à droite la gouttière imprimée

Après réalisation de ces deux protocoles, les auteures trouvent plusieurs avantages :

- Contrôle direct du positionnement des attaches par rapport à l'intervention d'un laboratoire extérieur
- Ergonomie améliorée
- Augmentation de la précision par rapport au collage indirect conventionnel
- Limitations de la nécessité de recollage en cours de traitement à cause d'un mauvais positionnement initial.
- Moins de risques de contamination par rapport au collage indirect conventionnel car le talon des attaches n'est jamais collé et reste ainsi toujours propre

Mais plusieurs inconvénients ou limites technologiques subsistent :

- Durée de conception et de fabrication plus longue que pour un collage direct, même si le temps en bouche est fortement réduit (une dizaine de minutes)
- Pour le protocole avec le thermoformage de la gouttière, cela nécessite un temps supplémentaire pour le praticien ou la formation d'une assistante pour réaliser la gouttière (dix minutes environ)
- Pour le protocole par impression stéréo-lithographique de la gouttière, les résines existant sur le marché ne semblent pas très pratiques à utiliser (surtout lors de la désinsertion de la gouttière) par manque d'élasticité. De plus le post-traitement afin de rendre la gouttière biocompatible nécessite un bac à UV supplémentaire.
- Coût supplémentaire non négligeable pour la réalisation soi-même des gouttières au cabinet, surtout pour la solution par impression stéréo-lithographique (imprimante entre dix et cinquante mille dollars selon le modèle)

Pour conclure, ces protocoles semblent intéressants et s'inscrivent dans une évolution numérique globale du métier d'orthodontiste. Mais pour le moment, ils restent coûteux et demandent une réorganisation du flux de travail dans le cabinet orthodontique. En attendant l'évolution des technologies et du matériel, les solutions permettant le placement des attaches orthodontiques ainsi que les simulations du traitement par l'orthodontiste (afin de garder au plus la main), tout en déléguant la réalisation des gouttières à un laboratoire semble les plus adaptées. C'est ce que propose 3Shape grâce à des laboratoires affiliés, utilisant les mêmes logiciels que le praticien et ne s'occupant que de la réalisation des gouttières(90).

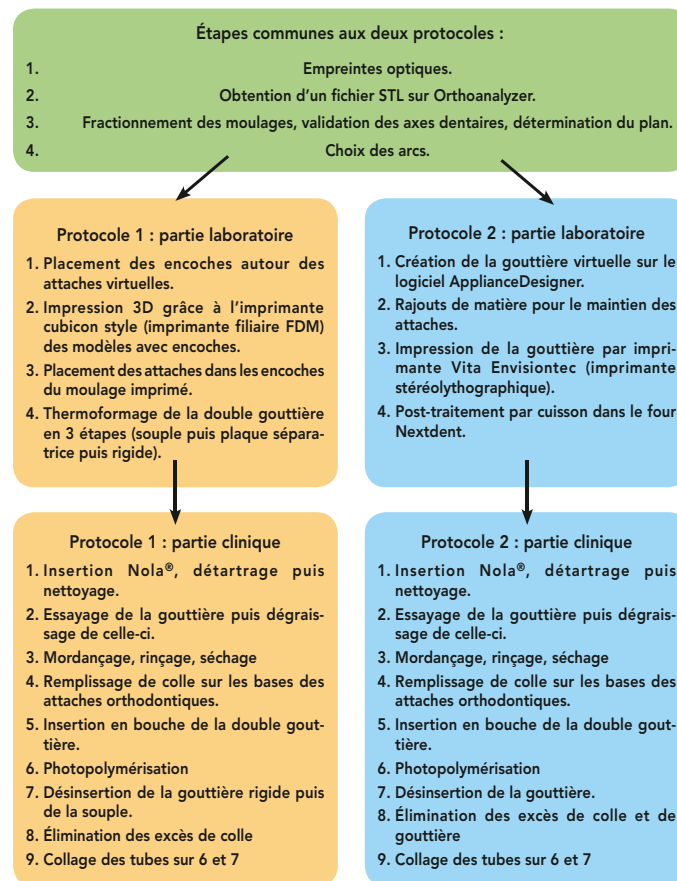


Tableau récapitulatif des deux méthodes

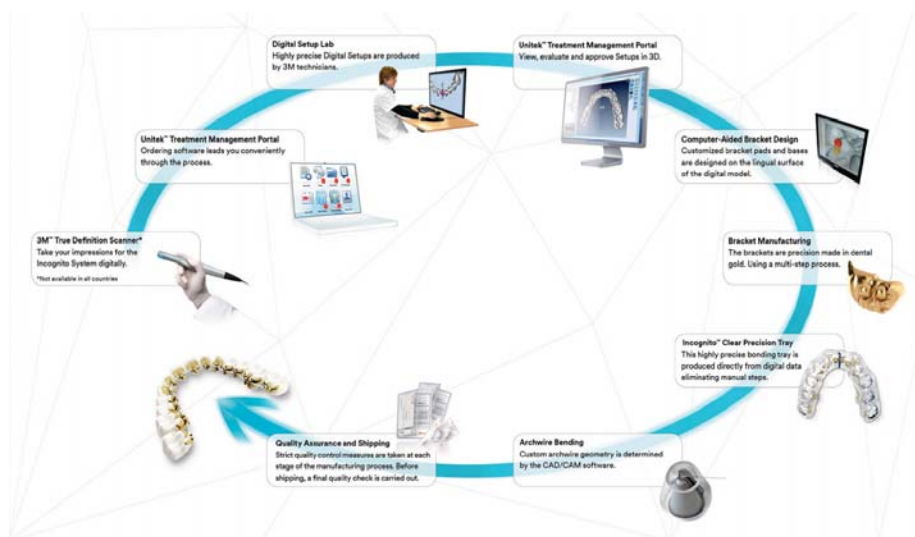
3.3.2. Thérapeutique fixe linguale par collage indirect

Introduites depuis plus de 30ans les techniques fixes linguales ne se sont jamais imposées comme étant le traitement de référence. Cette thérapeutique a pour principe de coller les attaches orthodontiques sur les faces linguales des dents. Plus compliquée à mettre en place et plus onéreuse que la technique vestibulaire, la thérapeutique fixe linguale a pour gros avantage de ne pas être visible. C'est pourquoi, ces dernières années on observe un nombre croissant de demande de patients (majoritairement adultes) optant pour cette solution. Ce qui nous intéresse dans cette technique de traitement, c'est qu'il est nécessaire de passer par un collage indirect et ainsi une phase de CFAO afin de mettre en place la thérapeutique.

Plusieurs industriels se sont penchés sur cette technique afin de proposer des systèmes différents : Incognito© (3M™), Win© (DW Lingual Systems) et Harmony© (AO). Grâce aux évolutions technologiques, ils réussissent à rendre les attaches orthodontiques moins volumineuses et permettent au patient de mieux les supporter. Car le défaut majeur de cette thérapeutique est qu'elle est inconfortable et entraîne des douleurs et gênes notamment lors de la phonation essentiellement(91).

Leader mondial des solutions fixes linguales, Incognito propose des attaches orthodontiques en or, façonnées sur mesure afin de s'adapter au mieux au patient et aux dysmorphoses à traiter. L'or est en effet un matériau très intéressant grâce à ses propriétés hypoallergéniques. La mise en place de cette technique est très similaire aux techniques de collage indirect vestibulaire :

- Prise d'empreinte numérique avec une caméra optique
- Setup et positionnement des brackets numériquement par le praticien ou le laboratoire
- Fabrication des attaches sur mesure, des gouttières de transfert et pliage du fil robotiquement
- Collage précis grâce à la gouttière de transfert



Flux numérique par Incognito

Il existe aussi une solution « Lite », qui permet de corriger des encombrements antérieurs grâce au collage de seulement 6 ou 8 attaches orthodontiques.



Système Incognito

Les autres systèmes existants sont différents par le design, la matière et mode de fabrication des attaches orthodontiques, la gouttière de transfert peut être différente (utilisation de jigs pour Harmony), mais le principe reste le même et ne mérite pas d'être développé ici.

Ainsi, les thérapeutiques fixes linguales se développent et deviennent de plus en plus facile à mettre en place grâce aux innovations technologiques. Rappelons que l'intérêt principal de cette technique est son avantage esthétique. Mais elles comportent différents inconvénients par rapport aux techniques vestibulaires (91):

- Temps adaptation et d'acceptation long pour le patient, la langue est sans arrêt gênée par l'appareil.
- Difficultés lors de la phonation
- Douleurs plus importantes
- Maintien d'une hygiène orale plus compliquée
- Coût important

De plus avec l'évolution et l'amélioration grandissante des gouttières d'alignement transparentes, l'intérêt principal de cette technique est déjà présent dans une autre technique présentant moins d'inconvénients.

3.4. Imprimante 3D

L'imprimante 3D correspond à la fin de la chaîne numérique en orthodontie et permet l'impression et la mise en place des solutions thérapeutiques. Largement démocratisée dans les laboratoires de prothèses, l'imprimante 3D n'est pourtant que très peu présente dans les cabinets orthodontiques. Le prix, la nécessité d'entretien et la formation nécessaire à son utilisation sont autant de freins pour que celle-ci arrive enfin dans les cabinets. L'évolution des technologies, que ce soit au niveau des logiciels ou des imprimantes en elles-mêmes, ainsi que des prix plus abordables permettent d'envisager l'achat de ce matériel.

3.4.1. Différents types d'impression 3D

Par définition, l'impression 3D est une technique de fabrication additive. La machine (l'imprimante en l'occurrence) va créer un objet par superposition de matière. Plusieurs technologies ont été mises en place par différents fabricants, je ne détaillerai dans ce travail que celles qui ont un intérêt en orthodontie (61,94,95):

- La stéréolithographie (SLA) : Cette technologie est considérée comme l'origine de l'impression 3D. Elle consiste en un plateau mobile, baigné dans une cuve de monomère liquide. Un faisceau fixe va polymériser le monomère grâce à son rayonnement UV ou laser. A chaque couche, le plateau descend, jusqu'à ce que l'objet soit terminé. Après cela, on place l'objet dans un four à UV pour terminer la polymérisation.
- Le procédé Digital Light Processing (DLP) : le procédé est le même que pour la SLA, mais cette fois-ci le plateau ne bouge pas horizontalement. L'image de la couche entière est projetée en une seule fois sur le monomère liquide, rendant le processus plus rapide que la SLA
- Technologie Polyjet : cette technologie injecte et durcit instantanément, par photopolymérisation, de la résine sur un support adapté. Son fonctionnement se rapproche d'une imprimante 2D où la tête de buse projette l'encre sur le papier. Après qu'une couche ait été posée, un faisceau lumineux permet de polymériser une fois de plus le matériau.
- La modélisation par dépôt fondu (FDM) : il s'agit là d'un matériau sous forme de bobine est chauffée dans la buse et déposé sur le support. Ce matériau durcit instantanément lors de sa sortie de la buse. La buse bouge de manière horizontale et une fois qu'une couche est terminée, le plateau descend, pour qu'une nouvelle couche soit mise en place. Ce type d'imprimante représente l'offre d'imprimante 3D grand public pour imprimer des petits objets, sans grand besoin de précision. En orthodontie cela servira juste à l'étude d'un modèle sans besoin précis (comme l'étude d'un modèle en plâtre)

Des nouvelles technologies, dérivant de ces dernières ont fait leur apparition dernièrement, mais le manque de recul ne permet pas d'établir si elles ont une réelle utilité dans le domaine dentaire.

3.4.2. Utilisation, intérêt et limite des imprimantes 3D

Dans les parties précédentes il a été développé de nouvelles manières de mettre en place les traitements orthodontiques grâce aux technologies numériques. Les imprimantes 3D tiennent une place particulière sans ces nouveaux procédés permettant aux praticiens de faire évoluer leur pratique. L'apport des imprimantes 3D dans la mise en place des solutions thérapeutiques, est l'impression des modèles physiques :

- Comme modèle d'étude : possible mais très onéreux juste pour cela
- Impression des différents modèles correspondant aux différentes phases du traitement pour les cas de traitement avec aligneurs
- Impression du modèle, avec emplacement des attaches pour le collage indirect

Sur ces modèles, il suivra ensuite la phase de réalisation de la gouttière (aligneurs ou pour le transfert en bouche des attaches orthodontiques) grâce à une machine permettant le thermoformage du « plastique » sur le modèle imprimé. Il est aussi possible d'imprimer directement les gouttières grâce à des imprimantes 3D plus performantes.



Exemple de modèle imprimé grâce à une imprimante 3D(96)

Une étude très intéressante de JINDAL et Al. (97) en 2019 a comparé des aligneurs réalisés par thermoformage (technique 1) et d'autres directement par impression 3D via stéréolithographie (technique 2). Ils ont calculé les déviations géométriques entre les aligneurs et les modèles numériques, ainsi que leur résistance mécanique. Il s'est avéré que la technique 2 permet d'avoir des aligneurs avec une déviation de 2,55% contre 4,41% pour la technique 1. Pour ce qui concerne la résistance mécanique, l'aligneur thermoformé présente une déformation linéaire jusqu'à 8,6mm sous 584Newton. Contrairement aux aligneurs imprimés, qui eux présentent une déformation maximale de 2,93mm sous 662N (force à laquelle il casse d'un coup). Les auteurs en ont conclu, d'après ces résultats, que le procédé d'impression des gouttières (technique 2) semble plus adapté aux impératifs des aligneurs. En effet, une déformation aussi importante des résines thermoformées est source d'imprécision et de déplacement parasite lors du traitement. De plus l'impression directe des aligneurs est un gain de temps contrairement à la technique 1 (diminution des étapes intermédiaires). Il est nécessaire de réaliser des tests complémentaires afin de confirmer cette étude.

3.4.3. Les différentes offres d'imprimantes

Il existe toutes sortes d'imprimantes 3D, allant de la simple imprimante grand public à 1500€ jusqu'à des imprimantes professionnelles avoisinant les 100 000€. Il est facile de se perdre devant un si grand panel d'offre et ainsi de se décourager dans cet achat. Ainsi le choix d'une imprimante se fera plus facilement si l'on détermine plusieurs critères(96) :

- Le besoin du praticien/cabinet : il peut aller de la simple impression de modèle afin d'étudier un cas sans applications thérapeutiques, jusqu'à la possibilité de se passer d'un laboratoire de prothèse.
- Le coût de l'imprimante et son retour sur investissement : le coût par gouttière est un critère important et il en prend en compte le coût de l'imprimante effectivement, mais aussi le prix du consommable, de l'entretien, le personnel engagé sur cette tâche (que ce soit le praticien ou une assistante formée). Ce coût de revient, est ensuite à comparer à ce que cela coûte de déléguer ce travail à un laboratoire de prothèse.
- La volume d'impression pour un certain temps : ce critère de choix découle des besoins du praticien. Plus il est nécessaire d'avoir un gros volume d'impression, plus il faudra aller chercher dans les imprimantes haut de gamme.
- Sa rapidité/exactitude d'impression : il est nécessaire que celle-ci soit de 100µm ou meilleure
- Les besoins d'entretien et maintenance de l'imprimante : plus il est important, moins il sera adapté à une utilisation de cabinet.
- Il conviendra aussi de faire attention au matériel d'impression proposé par le fabricant, il est nécessaire que celui-ci soit biocompatible et comporte des caractéristiques mécaniques intéressantes.

De nombreux fabricants existent sur le marché, avec des offres variées selon les besoins et il est difficile de tous les énumérer et départager. De plus de nouvelles offres voient le jour chaque semaine. Ce travail se limitera à présenter l'imprimante jugée la plus intéressante dans la pratique orthodontique.

Il s'agit d'une imprimante de la société américaine FormLabs, la Form3B(98). Basée sur la technologie Low Force Stereolithography (LFS), dérivée de la stéréolithographie, elle revendique une résolution de 25microns (axe X ; Y). FormLabs propose une riche gamme de résines biocompatibles, selon les besoins. Le volume de production dépendra de la résine choisie, ainsi que de la précision requise. Pour donner un ordre d'idée, cela va de 9 modèles par impression (3h30) à 20 modèles pour aligneurs transparent par impression (8h).

Le prix d'entrée de cette imprimante est de 5800€ pour le pack complet permettant l'impression et le post-traitement automatisé. On trouve des packs moins complets à des tarifs inférieurs. De plus, FormLabs estime leur cout matériel à 50-75euros pour un traitement par aligneurs en 10étapes.



Imprimante Form3B

Grâce à cette solution d'imprimante, on se rend compte que l'utilisation d'une imprimante 3D au cabinet peut se faire à des coûts raisonnables, et s'intégrer parfaitement dans une pratique quotidienne grâce à la formation du praticien et/ou d'une assistante.

Conclusion

Tout au long de ce travail nous avons vu les différentes possibilités offertes par le numérique et ses évolutions dans le domaine de l'orthodontie. Les avancées technologiques permettent une meilleure communication entre le patient et son praticien. De plus, grâce aux smartphones, des méthodes de suivi à distance se développent et permettent d'ouvrir des perspectives de gestion à distance de sa patientèle.

La mise en place du flux numérique au cabinet répond à la pratique et aux envies des praticiens. Il est possible de ne choisir qu'une partie des solutions technologiques existantes afin de moderniser son cabinet. En effet, il existe maintenant de nombreuses possibilités concernant la numérisation des données cliniques du patient, ainsi que la mise en place de solutions thérapeutiques. Les caméras optiques représentent souvent l'entrée dans le monde du numérique au cabinet dentaire et le début de la mise en place d'un flux numérique. Celles-ci représentent sûrement la technologie la plus utile et la plus facile à mettre en place dans la pratique quotidienne.

L'utilisation d'une imprimante 3D au cabinet est l'aboutissement de la chaîne numérique. Pour le moment, peu de praticiens ont passé le pas et réalisent eux-mêmes leurs gouttières de transfert ou d'alignement. Grâce à l'évolution des technologies, cette technologie tendra à se démocratiser, mais il sera nécessaire de rester rigoureux dans la mise en place des protocoles afin de proposer aux patients ce qu'il y a de mieux pour eux.

Un autre aspect de l'évolution technologique existe, notamment aux États-Unis avec des entreprises comme Smile Direct Club®. C'est la mise en place de solutions thérapeutiques à faire à la maison (Do It Yourself). Le concept repose sur la prise de photographies grâce à une application dédiée, celles-ci seront analysées à distance par un technicien de laboratoire. Selon le « diagnostic » posé, plusieurs solutions seront proposées au « patient » qui devient plutôt comme un client. Celui-ci recevra dans un second temps un kit permettant de faire ses empreintes chez lui qu'il renverra. L'entreprise enverra enfin des aligneurs à changer selon un calendrier établi. Ce concept est dangereux car la pratique de l'orthodontie nécessite un examen clinique et radiologique approfondi, et ne peut se reposer seulement sur la seule prise de quelques photographies.(99)

Bibliographie

1. Beckouche P. La révolution numérique est-elle un tournant anthropologique ? Le Débat. 2017;193(1):153.
2. Christiane. Du web 1.0 au web 4.0: l'évolution du web depuis 1990. [Internet]. C-Marketing. 2012 [cité 21 mars 2019]. Disponible sur: <https://c-marketing.eu/du-web-1-0-au-web-4-0/>
3. Klempler L, Epstein A. The future is now: how millennials, tech, and a chess-playing computer are changing orthodontics. J Clin Orthod 2017;51(10):661-666.
4. Binhas E. Optimiser les aspects relationnels en orthodontie : les bases d'une coopération réussie. Orthod Fr. sept 2009;80(3):279-90.
5. Jorgensen G. Attracting orthodontic patients via the Internet: A 20-year evolution. Am J Orthod Dentofac Orthop déc 2015;148(6):939-42.
6. Aghasiyev R, Yilmaz BŞ. The accuracy of information about orthodontics available on the internet. Turk J Orthod. déc 2018;31(4):127-32.
7. Ordre National des chirurgiens-dentistes, Charte ordinale applicable aux sites internet professionnels des chirurgiens dentiste, Novembre 2019, disponible sur <http://www.ordre-chirurgiens-dentistes.fr/index.php?id=449>
8. Doctolib, Communiqué de presse. Mars 2019. Disponible sur : <https://res.cloudinary.com/djqdp2tlr/image/upload/v1553057184/1903%20-%20Fundraising/190320%20-%20CP%20-%20Lev%C3%A9e%20de%20fonds%20Doctolib.pdf>
9. Service — Logiciel médical Doctolib : optimisez l'organisation de votre activité avec Doctolib. [Internet]. [cité 14 oct 2019]. Disponible sur: <https://info.doctolib.fr/offre.html>
10. Alix C. Doctolib, une santé d'affaires [Internet]. Libération.fr. 2019 [cité 16 sept 2019]. Disponible sur: https://www.liberation.fr/france/2019/03/20/doctolib-une-sante-d-affaires_1716454
11. URPS Ile-de-France. Les plateformes de prise de rendez-vous en ligne utilisées par la majorité des patients et des médecins d'Île-de-France. 2019 mars. Disponible sur : <https://www.urps-med-idf.org/wp-content/uploads/2019/03/URPS-CP-Usages-et-Pratiques-e-RDV.pdf>
12. Legrand B. La lettre ouverte de Doctolib à ses médecins détracteurs [Internet]. egora.fr. 2018 [cité 5 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.egora.fr/actus-pro/conditions-d-exercice/43123-la-lettre-ouverte-de-doctolib-a-ses-medecins-detrateurs>
13. Haute Autorité de santé. Efficience de la télémédecine : état des lieux de la littérature internationale et cadre d'évaluation [Internet]. [cité 15 mai 2020]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/upload/docs/application/pdf/2011-06/cadrage_telemedecine_vf.pdf
14. Ameli.fr Téléconsultation : coup d'envoi le 15 septembre [Internet]. [cité 27 sept 2019]. Disponible sur: https://www.ameli.fr/fileadmin/user_upload/documents/Dossier-de-presse_Teleconsultation_12092018.pdf

15. Doctolib, Communiqué de presse. Septembre 2019. Disponible sur : https://res.cloudinary.com/djqdp2tlr/image/upload/v1568275846/190912_-_CP_-_Te%CC%81le%CC%81consultation_gdppdq.pdf
16. Roisin L-C, Brézulier D, Sorel O. Contrôle à distance en orthodontie : fondements et description de la solution Dental Monitoring™. *Rev Orthop Dento-Faciale*. juin 2016;50(3):303-13.
17. Siddiqui NR, Hodges S, Sharif MO. Availability of orthodontic smartphone apps. *J Orthod*. sept 2019;46(3):235-41.
18. Sharif MO, Siddiqui NR, Hodges SJ. Patient awareness of orthodontic mobile phone apps. *J Orthod*. mars 2019;46(1):51-5.
19. Scheerman JFM, van Empelen P, van Loveren C, van Meijel B. A mobile app (WhiteTeeth) to promote good oral health behavior among dutch adolescents with fixed orthodontic appliances: intervention mapping approach. *JMIR MHealth UHealth* [Internet]. 17 août 2018 [cité 13 mars 2019];6(8). Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6119215/>
20. Gandet C. Évaluation et quantification de différents facteurs influençant le temps de traitement orthodontique. Université de Montréal, Département de santé buccale, section orthodontie. Février 2017.
21. Groupe VYV. Actualités. Mon Coach Ortho, l'application mobile dédiée à l'orthodontie [Internet]. VYV Care. 2019 [cité 1 oct 2019]. Disponible sur: <https://info.vyv-care.fr/metiers/mon-coach-ortho-lapplication-mobile-dediee-a-lorthodontie/>
22. Loum - Professionnels de santé [Internet]. [cité 15 oct 2019]. Disponible sur: loum.fr
23. Dental Monitoring - Connect with all your patients [Internet]. Dental Monitoring. [cité 6 mars 2019]. Disponible sur: <https://dental-monitoring.com/?lang=fr>
24. Kravitz ND, Burris B, Butler D, Dabney CW. Teledentistry, do-it-yourself orthodontics, and remote treatment monitoring. *J Clin Orthod*. déc 2016;50(12):718-26.
25. Hansa I, Semaan SJ, Vaid NR, Ferguson DJ. Remote monitoring and “Tele-orthodontics”: Concept, scope and applications. *Semin Orthod*. 1 déc 2018;24(4):470-81.
26. Morris RS, Hoye LN, Elnagar MH, Atsawasuwon P, Galang-Boquiren MT, Caplin J, et al. Accuracy of Dental Monitoring 3D digital dental models using photograph and video mode. *Am J Orthod Dentofac Orthop* sept 2019;156(3):420-8.
27. Taneva E, Kusnoto B, Evans CA. 3D Scanning, Imaging, and Printing in Orthodontics. *Issues Contemp Orthod* [Internet]. 3 sept 2015 [cité mai 2019]; Disponible sur: <https://www.intechopen.com/books/issues-in-contemporary-orthodontics/3d-scanning-imaging-and-printing-in-orthodontics>
28. Maestro3d.com - 3D Professional Scanner - 3D Dental Scanner - Scanner Dentale 3D [Internet]. [cité 9 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.maestro3d.com/dental.scanner.aspx>

29. 3Shape, L'orthodontie avec 3Shape. Janvier 2019 [cité mai 2019]. Disponible sur : <https://3shape.widen.net/view/pdf/5gxbjhwovu/3Shape-Orthodontics-Lab-Brochure-2019-FR.pdf?t.download=true&u=6xmdhr>
30. Lanoiselée E. L’empreinte optique pour enregistrer l’occlusion [Internet]. [cité 4 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.dentalespace.com/praticien/actualites/empreinte-optique-enregistrer-occlusion/#>
31. Casas T. Banc d’essais 2019 7 scanners intra-oraux [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2019 [cité 13 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/banc-d-essais-2019-7-scanners-intra-oraux/>
32. Lecocq G. Digital impression-taking: fundamentals and benefits in orthodontics. *Int Orthod.* juin 2016;14(2):184-94.
33. 3Shape.com. Scanner intra-oral 3Shape TRIOS® – découvrez le scanner et le logiciel [Internet]. 3shape. [cité 4 mars 2020]. Disponible sur: <https://ww2.3shape.com:443/fr-fr/products/trios/intraoral-scanner>
34. iTero.com. iTero Element Flex | Scanner intra-oral iTero [Internet]. [cité 4 mars 2020]. Disponible sur: http://www.itero.com/fr-fr/products/itero_element_flex
35. iTero.com. Ortho iTero Element 2 Flex Brochure [Internet]. [cité 6 mai 2019]. Disponible sur: <http://storagy-itero-production-eu.s3.amazonaws.com/download/en/Ortho-iTero-Element-2-Flex-Brochure.pdf>
36. 3M Espe dental. Open connections and the 3m true definition scanner [Internet]. [cité 6 mai 2019]. Disponible sur: <http://multimedia.3m.com/mws/media/1073688O/open-connections-and-the-3m-true-definition-scanner.pdf>
37. DentsplySirona. Sirona connect, Prise d’empreinte optique du cabinet au laboratoire [Internet]. [cité 6 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/Dentsply-Sirona-Flagship/France/solutions/sujets/sirona-connect/M43-B991-01-7700-Sirona-Connect-Prise-d-empreinte-optique-du-cabinet-au-laboratoire.pdf>
38. 3Shape. Exportez des fichiers STL depuis votre solution 3Shape TRIOS [Internet]. [cité 6 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.3shape.com/fr-fr/knowledge-center/news-and-press/news/2017/export-stl-files-from-your-3shape-trios>
39. 3Shape. Pourquoi TRIOS Orthodontics ? L’orthodontie numérique expliquée [Internet]. [cité 4 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.3shape.com:443/fr-fr/discover/orthodontist>
40. Lecocq G. Les caméras intra-oraux : choix et intégration au cabinet. *Rev Orthop Dento-Faciale.* juin 2016;50(3):223-8.
41. Cantayre G, Nasr K. Sept caméras d’empreintes optiques intra-oraux au banc d’essai [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2018 [cité 23 avr 2019]. Disponible sur:

<https://www.lefildentaire.com/articles/analyse/materiel/sept-cameras-d-empreintes-optiques-intra-orales-au-banc-d-essai/>

42. González de Villaumbrosia P, Martínez-Rus F, García-Orejas A, Salido MP, Pradíes G. In vitro comparison of the accuracy (trueness and precision) of six extraoral dental scanners with different scanning technologies. *J Prosthet Dent.* oct 2016;116(4):543-550.e1.
43. Duvert R, Gebeile-Chauty S. La précision des empreintes numériques intra-orales en orthodontie est-elle suffisante ? *Orthod Fr.* 1 déc 2017;88(4):347-54.
44. Jacob HB, Wyatt GD, Buschang PH. Reliability and validity of intraoral and extraoral scanners. *Prog Orthod.* 2015;16:38.
45. Bohner LOL, De Luca Canto G, Marció BS, Laganá DC, Sesma N, Tortamano Neto P. Computer-aided analysis of digital dental impressions obtained from intraoral and extraoral scanners. *J Prosthet Dent.* nov 2017;118(5):617-23.
46. Lambert A, Setbon O, Salmon B, Sebban V. Analyse céphalométrique. *Datatraitesod123-57179* [Internet]. 22 févr 2010 [cité 15 mai 2019]; Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/en/article/244038>
47. Frèrejouand E. Intérêt de l'imagerie tridimensionnelle dans la pratique clinique de l'orthodontie. *Orthod Fr.* 1 déc 2016;87(4):393-410.
48. Machado GL. CBCT imaging - A boon to orthodontics. *Saudi Dent J.* janv 2015;27(1):12-21.
49. Faure J, Oueiss A, Marchal-Sixou C, Braga J, Treil J. Céphalométrie tridimensionnelle : applications en clinique et en recherche. *Orthod Fr.* mars 2008;79(1):13-30.
50. Starrsjö C. Apport du numérique dans le diagnostic et la planification 3D des chirurgies orthognatiques. Nantes; 2018 [cité 23 mai 2019]. Disponible sur : <http://archive.bu.univ-nantes.fr/pollux/fichiers/download/ba1f66bc-05b2-4ebd-a1f9-40393942c382>
51. Lee RJ, Pham J, Weissheimer A, Tong H. Generating an ideal virtual setup with three-dimensional crowns and roots. *J Clin Orthod JCO.* nov 2015;49(11):696-700.
52. Fédération Française d'Orthodontie. Indications et champ d'application du Cone Beam (CBCT) en Orthodontie. Recommandations de Bonne Pratique [Internet]. [cité 24 avr 2019]. Disponible sur: <http://www.orthodontie-ffo.org/sites/default/files/inline-files/Reco%20cone%20beam.pdf>
53. Zhao Y-J, Xiong Y-X, Wang Y. Three-dimensional accuracy of facial scan for facial deformities in clinics: a new evaluation method for facial scanner accuracy. *PloS One.* 2017;12(1):e0169402.
54. 3Shape. TRIOS Color, astounding the industry with realistic colors. [Internet]. [cité 30 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.3shape.com/en/knowledge-center/news-and-press/news/2013/trios-color-astounding-the-industry-with-realistic-colors>
55. Zogheib T, Jacobs R, Bornstein MM, Agbaje JO, Anumendem D, Klazen Y, et al. Comparison of 3D scanning versus 2D photography for the identification of facial soft-tissue landmarks. *Open Dent J.* 2018;12:61-71.

56. Erten O, Yılmaz BN. Three-dimensional imaging in orthodontics. *Turk J Orthod.* sept 2018;31(3):86-94.
57. Secher JJ, Darvann TA, Pinholt EM. Accuracy and reproducibility of the DAVID SLS-2 scanner in three-dimensional facial imaging. *J Cranio-Maxillo-fac Surg* oct 2017;45(10):1662-70.
58. Dindaroğlu F, Kutlu P, Duran GS, Görgülü S, Aslan E. Accuracy and reliability of 3D stereophotogrammetry: A comparison to direct anthropometry and 2D photogrammetry. *Angle Orthod.* mai 2016;86(3):487-94.
59. Fink M, Hirschfelder U, Hirschinger V, Schmid M, Spitzl C, Detterbeck A, et al. Assessment of facial soft-tissue profiles based on lateral photographs versus three-dimensional face scans. *J Orofac Orthop* janv 2017;78(1):70-6.
60. Bellus3D: High-quality 3D face scanning [Internet]. [cité 28 mai 2019]. Disponible sur: <http://www.bellus3d.com/>
61. Roger B, Roger J-B. Apports de l'impression numérique 3D en ODF. *Rev Orthop Dento-Faciale.* 1 juin 2016;50(3):229-36.
62. Ferreira JB, Christovam IO, Alencar DS, da Motta AFJ, Mattos CT, Cury-Saramago A. Accuracy and reproducibility of dental measurements on tomographic digital models: a systematic review and meta-analysis. *Dento Maxillofac Radiol.* oct 2017;46(7):20160455.
63. Darroudi AM, Kuijpers-Jagtman AM, Ongkosuwito EM, Suttorp CM, Bronkhorst EM, Breuning KH. Accuracy of a computed tomography scanning procedure to manufacture digital models. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* mai 2017;151(5):995-1003.
64. Brown GB, Currier GF, Kadioglu O, Kierl JP. Accuracy of 3-dimensional printed dental models reconstructed from digital intraoral impressions. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* nov 2018;154(5):733-9.
65. Camardella LT, Rothier EKC, Vilella OV, Ongkosuwito EM, Breuning KH. Virtual setup: application in orthodontic practice. *J Orofac Orthop.* nov 2016;77(6):409-19.
66. Camardella LT, Breuning H, Vilella O de V. Are there differences between comparison methods used to evaluate the accuracy and reliability of digital models? *Dent Press J Orthod.* févr 2017;22(1):65-74.
67. Liang Y-M, Rutchakitprakarn L, Kuang S-H, Wu T-Y. Comparing the reliability and accuracy of clinical measurements using plaster model and the digital model system based on crowding severity. *J Chin Med Assoc.* sept 2018;81(9):842-7.
68. Nawi N, Mohamed AM, Marizan Nor M, Ashar NA. Correlation and agreement of a digital and conventional method to measure arch parameters. *J Orofac Orthop.* janv 2018;79(1):19-27.
69. Koretsi V, Tingelhoff L, Proff P, Kirschneck C. Intra-observer reliability and agreement of manual and digital orthodontic model analysis. *Eur J Orthod.* 2018;40(1):52-7.

70. Lippold C, Kirschneck C, Schreiber K, Abukiress S, Tahvildari A, Moiseenko T, et al. Methodological accuracy of digital and manual model analysis in orthodontics - A retrospective clinical study. *Comput Biol Med.* juill 2015;62:103-9.
71. Kiviahde H, Bukovac L, Jussila P, Pesonen P, Sipilä K, Raustia A, et al. Inter-arch digital model vs. manual cast measurements: Accuracy and reliability. *Cranio J Craniomandibul Pract.* juill 2018;36(4):222-7.
72. Baan F, de Waard O, Bruggink R, Xi T, Ongkosuwito EM, Maal TJJ. Virtual setup in orthodontics: planning and evaluation. *Clin Oral Investig.* 2020;24(7):2385-2393.
73. 3Shape Ortho Analyzer - How to make a dental arch analysis [Internet]. [cité 4 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=fN1KWVm7Vhs>
74. Dahan D, Boissi N. Le set-up numérique la révolution de l'orthodontie digitale [Internet]. *LEFILDENTAIRE magazine dentaire.* 2019 [cité 13 sept 2019]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/orthodontie/le-set-up-numerique-la-revolution-de-l-orthodontie-digitale/>
75. 3Shape. User Manuals : Manuels d'utilisation Anatomy Design [Internet]. [cité 29 janv 2020]. Disponible sur: <https://ww2.3shape.com:443/fr-fr/knowledge-center/user-manuals>
76. 3Shape Clear Aligner Studio workflow with Bernhard Egger [Internet]. [cité 4 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=TWVMrHoc7jY>
77. Blais C. Comparaison entre la simulation d'alignement du ClinCheck® et les modèles numériques finaux des patients traités par la technique Invisalign® avec ou sans l'appareil AcceleDent®. 8 nov 2016 [cité 15 oct 2019]; Disponible sur: https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/16433/Blais_Caroline_2016_memoire.pdf?sequence=2&isAllowed=y
78. Barreto MS, Faber J, Vogel CJ, Araujo TM. Reliability of digital orthodontic setups. *Angle Orthod.* mars 2016;86(2):255-9.
79. Fabels LNJ, Nijkamp PG. Interexaminer and intraexaminer reliabilities of 3-dimensional orthodontic digital setups. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* déc 2014;146(6):806-11.
80. Im J, Cha J-Y, Lee K-J, Yu H-S, Hwang C-J. Comparison of virtual and manual tooth setups with digital and plaster models in extraction cases. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* avr 2014;145(4):434-42.
81. Müller-Hartwich R, Jost-Brinkmann P-G, Schubert K. Precision of implementing virtual setups for orthodontic treatment using CAD/CAM-fabricated custom archwires. *J Orofac Orthop.* janv 2016;77(1):1-8.
82. Chaudret F. Biomécanique des aligneurs en orthodontie. Paris Descartes 2018. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01938617/document>

83. Buffat M. Les gouttières esthétiques en orthodontie : entre fiction thérapeutique et réalité clinique, état des lieux. Nantes; 2019 [cité 17 février 2020]. Disponible sur : <http://archive.bu.univ-nantes.fr/pollux/fichiers/download/1ab22e9c-362a-4df9-b446-ebb8207cc8fa>
84. Pasquier W. Le collage indirect en orthodontie. Nantes; 2008. Disponible sur : <http://archive.bu.univ-nantes.fr/pollux/fichiers/download/54735f50-0c5d-45b2-ac01-bd01476bda50>
85. Nojima LI, Araújo AS, Alves Júnior M. Indirect orthodontic bonding--a modified technique for improved efficiency and precision. *Dent Press J Orthod.* juin 2015;20(3):109-17.
86. Pichon P, Cavaré A. Perspectives d'application du flux numérique au collage indirect. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* sept 2019;53(3):233-47.
87. Li Y, Mei L, Wei J, Yan X, Zhang X, Zheng W, et al. Effectiveness, efficiency and adverse effects of using direct or indirect bonding technique in orthodontic patients: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health.* 2019;19(1):137.
88. Ormco. Insignia™ [Internet]. [cité 5 févr 2020]. Disponible sur: <https://ormco.ch/produits/brackets/brackets-digitales/insignia/>
89. Bücco Orthodontistes. Insignia™ l'orthodontie sur mesure. [Internet]. [cité 5 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.orthodontisteenligne.com/insignia-lorthodontie-mesure/>
90. 3Shape. Placement des brackets avec prédiction du résultat en temps réel. [Internet]. [cité 7 févr 2020]. Disponible sur: <https://ww2.3shape.com:443/fr-fr/indirect-bonding>
91. Ata-Ali F, Ata-Ali J, Ferrer-Molina M, Cobo T, De Carlos F, Cobo J. Adverse effects of lingual and buccal orthodontic techniques: A systematic review and meta-analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* juin 2016;149(6):820-9.
92. 3M™ Incognito™ [Internet]. [cité 11 févr 2020]. Disponible sur: https://www.3mfrance.fr/3M/fr_FR/notre-societe-fr/tous-les-produits-3M/~3M-Incognito-/?N=5002385+8707795+8707799+87110666+87111017+87111755+8716968+8717527+3290412345&preselect=3293786499&rt=rud
93. 3M France.fr Le système Incognito™ signifie un processus de travail numérique – novembre 2015 [Internet]. [cité 11 févr 2020]. Disponible sur: https://www.3mfrance.fr/wps/portal/fr_FR/3M/orthodontics-fr/resources/incognito-journal/incognito-journal-articles/?storyid=badeb30e-fddf-48c2-a8e6-851c37e857d7
94. Rizzo M. Apport de l'impression numérique 3D en orthodontie. Lille 2017. Disponible sur : <http://pepite.univ-lille2.fr/notice/view/UDSL2-workflow-11371>
95. Palau J. L'impression 3D ou fabrication additive en odontologie, actualités et perspectives. Aix-Marseille 2017. Disponible sur : <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01616146/document>
96. Formlabs.com Comment choisir une imprimante 3D dentaire? [Internet]. [cité 21 févr 2020]. Disponible sur: <https://dental.formlabs.com/fr/blog/choisir-imprimante-3D-cabinet-labo-dentaire/>

97. Jindal P, Juneja M, Siena FL, Bajaj D, Breedon P. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop* nov 2019;156(5):694-701.
98. Formlabs.com Form 3B : imprimante 3D dentaire de qualité industrielle [Internet]. Formlabs. [cité 21 févr 2020]. Disponible sur: <https://dental.formlabs.com/fr/form-3b/>
99. Kandil S. Illusions or reality of do it yourself DIY invisible braces named clear aligners — straighten your... [Internet]. Medium. 2018 [cité 18 mai 2020]. Disponible sur: <https://medium.com/@dr.sherifkandil/illusions-or-reality-of-do-it-yourself-diy-invisible-braces-named-clear-aligners-straighten-your-81bf5e0b2e96>

LEROUX (Thomas) : Nouvelles technologies et orthodontie : état des lieux et perspectives en 2020. – 75 f. ; ill. ; tabl. ; 99 ref. ; 30 cm (Thèse : Chir. Dent. ; Nantes ; 2020)

RESUME :

Ce travail s'intéresse à l'apport récent des technologies du numérique et comment celles-ci modifient le métier d'orthodontiste en intégrant un flux numérique à l'intérieur du cabinet. Dans un premier temps, les apports dans la relation praticien-patient sont étudiés et comment cela tend à faciliter le contact entre les deux grâce à des applications mobiles par exemple. Deuxièmement, c'est l'apport technologique dans l'acquisition des données cliniques du patient qui est développé, notamment les caméras optiques, les CBCT et scanner facial. Enfin la dernière partie, sur les thérapeutiques orthodontiques, développe et explique des méthodes de traitement améliorées et optimisées grâce aux récentes innovations.

RUBRIQUE DE CLASSEMENT : Orthopédie dentofaciale

MOTS CLES MESH:

Orthodontie – Orthodontics

Télémédecine – Telemedicine

Imagerie tridimensionnelle – Imaging three-dimensional

Conception d'appareil orthodontique – Orthodontic appliance design

JURY :

Président : Professeur GIUMELLI B.

Directeur : Docteur NIVET M-H.

Assesseur : Docteur JORDANA F.

Assesseur : Docteur BOUCHET X.

ADRESSE DE L'AUTEUR :

44 bis rue de Saint- Cloud 44700 Orvault

thomas.leroux@laposte.net