



HAL
open science

Collage des attaches orthodontiques vestibulaires : une évolution logique vers le collage indirect numérique ?

Michel Khetsomphou

► To cite this version:

Michel Khetsomphou. Collage des attaches orthodontiques vestibulaires : une évolution logique vers le collage indirect numérique ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. dumas-04000278

HAL Id: dumas-04000278

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04000278v1>

Submitted on 22 Feb 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

FACULTÉ DE SANTÉ

UFR D'ODONTOLOGIE

Année 2023

N° D001

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 03 janvier 2023

Par

Michel KHETSOMPHOU

**Collage des attaches orthodontiques vestibulaires : une évolution
logique vers le collage indirect numérique ?**

Dirigée par M. le Docteur Nemrod Shamri
et par Mme le Professeur Elvire Le Norcy

JURY

Mme le Professeur Elvire Le Norcy

M. le Docteur Pascal Garrec

M. le Docteur Philippe François

M. le Docteur Nemrod Shamri

Mme le Docteur Laïla Hitmi

Président

Assesseur

Assesseur

Assesseur

Invité



L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse d'exercice comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation, auprès du ou des titulaires des droits. Le droit de citations doit s'exercer avec rigueur et discernement. Certaines citations peuvent comporter un extrait textuel de la source. Cet extrait textuel doit être relativement court (une quinzaine de lignes tout au plus), mis entre guillemets ou clairement séparé du corps du texte et bien évidemment référencé en citation. En ce qui concerne la citation sans extrait textuel (mention d'idées ou concepts originaux, données chiffrées, figures, etc.), il faut également en citer la source. Toute figure, tableau, graphique reproduit doit également être accompagné de la citation de la source. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse d'exercice. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers.

Michel KHETSOMPHOU

Tableau des enseignants de l'UFR d'Odontologie

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
1. DÉVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRÉVENTION	ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE	Mme M. AUJAY DE LA DURE-MOLLA Mme É. DURSUN Mme S. VITAL	M. P.-J. BERAT (MCU associé) Mme A.-L. BONNET M. F. COURSON Mme M. RIOU (MCU associé) Mme A. VANDERZWALM
	ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE	Mme E. LE NORCY	M. C. DUNGLAS M. P. GARREC Mme A. KAMOUN Mme B. VI-FANE
	PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ ET ODONTOLOGIE LÉGALE	Mme S. AZOGUI-LEVY M. P. PIRNAY	Mme A.-C. BAS Mme A. GERMA Mme V. SMAIL-FAUGERON Mme A. TENENBAUM
2. CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE	PARODONTOLOGIE	Mme F. ANAGNOSTOU M. M. BIOSSE DUPLAN Mme M.-C. CARRA Mme M.-L. COLOMBIER Mme M. GOSSET	M. A. BRUN M. D. GUEZ M. S. JUNGO (MCU associé) M. S. KERNER
	CHIRURGIE ORALE	Mme G. LESCAILLE M. L. MAMAN Mme L. RADOÏ M. Y. ROCHE	Mme V. BAAROUN M. B. COURRIER Mme A.-L. EJEIL M. F. GAULTIER M. N. MOREAU M. T. NGUYEN Mme J. ROCHEFORT Mme I. TAÏHI M. H. TARRAGANO
	BIOLOGIE ORALE	Mme A. C. AZEVEDO (PU associée) Mme C. BARDET (PR) Mme A. BERDAL Mme C. CHAUSSAIN M. V. DESCROIX M. B. FOURNIER M. B. GOGLY Mme R. KOZYRAKI Mme S. SÉGUIER	Mme C. ANDRIQUE (MCU associée) M. C.-D. ARRETO M. J. BOUCHET (MCF) Mme H. CHARDIN M. P. COLLIN Mme M.-H. COTTET Mme A. COUDERT (MCF) M. F. FERRÉ Mme C. GORIN Mme S. HOUARI-MEJRI Mme J. ISAAC (MCF) M. O. LE MAY M. G. LIGNON (MCU associé) Mme N NOWWAROTE (MCU associé) M. B. PAIVA (MCF)
3. RÉHABILITATION ORALE (DÉBUT)	DENTISTERIE RESTAURATRICE ENDODONTIE	Mme T. BOUKPESSI M. P. COLON Mme C. GAUCHER	Mme F. BERÈS Mme C. BESNAULT M. É. BONTE Mme A.-M. COLLIGNON M. F. DECUP Mme A. HARTMANN M. G. KUHN Mme C. MESGOUÉZ-MENEZ Mme C. MOCQUOT Mme N. PRADELLE PLASSE Mme M. ZANINI

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
3. RÉHABILITATION ORALE (SUITE)	PROTHÈSES	Mme M.-V. BERTERETCHE Mme A. BRAUD M. O. FROMENTIN M. C. RIGNON-BRET M. B. TAVERNIER Mme C. WULFMAN	M. J.-M. CHEYLAN Mme H. CITTERIO Mme M.-J. CRENN M. M. DAAS M. D. DOT M. L. DUPAGNE (MCU associé) M. N. EID M. S. ESCURE Mme I. FOUILLOUX Mme L. FRIEDLANDER M. P. GATEAU M. D. MAURICE M. P. MOULIN M. P. RENAULT Mme É. SARFATI M. J.-E. SOFFER M. P. TRAMBA
	FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX	M. Y. BOUCHER Mme L. JORDAN M. J.-F. N'GUYEN M. B. SALMON	M. J.-P. ATTAL M. C. AZEVEDO Mme R. BENBELAÏD Mme A. BENOÎT A LA GUILLAUME (MCF) Mme J. BOSCO M. D. BOUTER M. J.-L. CHARRIER M. M. CHERRUAU M. H. DIAKONOFF (MCU associé) M. R. FELIZARDO M. B. FLEITER M. P. FRANÇOIS Mme F. MANGIONE M. A. PORPORATI (MCU associé) Mme F. TILOTTA
PROFESSEURS ÉMÉRITES		M. C. BÉRENHOLC M. P. BOUCHARD Mme M.-L. BOY-LEFÈVRE Mme M. FOLLIGUET Mme M. WOLIKOW M. R. GARCIA M. J.-J. LASFARGUES M. A. LAUTROU M. G. LEVY	M. B. PELLAT Mme A. POLIARD M. J.-L. SAFFAR

Liste mise à jour le 28 septembre 2022

Remerciements

À Mme le Professeur Elvire le Norcy ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Spécialiste qualifiée en Orthopédie dento-faciale ; Docteur de l'Université Sorbonne Paris Cité ; Habilitée à Diriger des Recherches ; Professeur des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris.

Pour l'honneur que vous me faites de présider le jury de cette thèse d'exercice et d'avoir accepté de diriger ce travail. Je vous remercie sincèrement pour la grande qualité de vos enseignements et de votre implication dans notre formation et pour notre spécialité. Veuillez trouver ici l'expression de ma gratitude et de mon plus profond respect.

À M. le Docteur Pascal Garrec ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Spécialiste qualifié en Orthopédie dento-faciale ; Docteur de l'Université Paris Diderot ; Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris.

Pour me faire l'honneur d'être membre de ce jury. Je vous remercie grandement d'avoir accepté d'évaluer mon travail. Soyez assuré de ma sincère reconnaissance.

À M. le Docteur Philippe François ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Docteur de l'Université Paris 13 ; Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris.

Pour me faire l'honneur de siéger dans ce jury. Je te remercie grandement de ta pédagogie et pour l'intérêt que tu portes pour le numérique. Ton implication m'a permis d'accomplir le travail que je présente aujourd'hui. Trouve ici l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements les plus profonds.

À M. le Docteur Nemrod Shamri ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Spécialiste qualifié en Orthopédie dento-faciale ; Chef de Clinique des Universités - Assistant des Hôpitaux, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité.

Pour m'avoir fait l'honneur de diriger cette thèse d'exercice. Je te remercie pour ta rigueur et pour ton implication. Trouve ici l'expression de mes remerciements les plus sincères.

À Mme le Docteur Laïla Hitmi ; Docteur de Chirurgie dentaire ; Spécialiste qualifiée en Orthopédie dento-faciale.

Pour me faire l'honneur de votre présence dans ce jury. Vos travaux et vos communications ont grandement inspiré cette thèse. Merci de l'intérêt que vous avez manifesté pour mon travail. Soyez assurée de ma sincère gratitude et de mon plus profond respect.

Résumé et indexation en français et anglais

Résumé :

L'utilisation des appareils multi-attaches vestibulaires s'est largement développée et permet à l'orthodontiste de contrôler la position des dents dans les trois dimensions de l'espace. Depuis ses débuts, la technique a connu deux révolutions : le collage et le développement des attaches pré-informées. Le collage en orthodontie a permis de positionner les attaches avec beaucoup plus de facilité et de précision. Toutes les innovations qui ont suivi avaient pour but principal d'augmenter l'efficacité de ce type d'appareil, en recherchant toujours plus de précision et de confort. En parallèle, le numérique s'est beaucoup développé, prenant une place de plus en plus importante dans les cabinets d'orthodontie. Les évolutions les plus récentes, avec les empreintes numériques et les imprimantes 3D, ouvrent de nouvelles perspectives de positionnement des attaches. Après la présentation des principes et des techniques de collage conventionnelles, nous traiterons l'intégration progressive du numérique dans les cabinets d'orthodontie, jusqu'à la numérisation du collage indirect. Nous montrerons en quoi le collage indirect numérique constitue une évolution logique, et pourquoi il est intéressant de le considérer.

Discipline ou spécialité :

Orthopédie dento-faciale

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

fMeSH : Conception assistée par ordinateur ; Orthodontie

Rameau : Impression 3D ; CFAO, Systèmes de

Forme ou Genre :

fMeSH : Dissertation universitaire

Rameau : Thèses et écrits académiques

Abstract :

The use of buccal fixed orthodontics appliances has been widely developed and allows the orthodontist to control teeth position in the three dimensions of space. Since its inception, the technique has undergone two revolutions : bracket bonding and preinformed brackets. Bracket bonding allows bracket placement with much greater ease and precision. All the innovations that followed had the main goal of improving efficiency, by seeking more precision and comfort. At the same time, digital technology has developed a lot, taking an increasingly important place in orthodontic practices. The latest developments, with digital impression and 3D printers, open up new perspectives for bracket placement. After the presentation of the principles and techniques of conventional bonding, we will discuss the progressive integration of digital technology in orthodontic practices, up to the digitization of indirect bonding. We will show how indirect digital bonding is a logical evolution of the technique, and why we should consider it.

Branch or specialty :

Orthodontics

English keywords (MeSH) :

Computer-Aided Design ; Orthodontics

Publication type (MeSH) :

Academic Dissertation

Liste des abréviations

- 3D : tridimensionnel, tridimensionnelle, en 3 dimensions ;
- ABO : *american board of orthodontics*, board américain d'orthodontie ;
- ABO-OGS : *american board of orthodontics - objective grading system* ;
- ABS : acrylonitrile butadiène styrene ;
- CBCT : *cone beam computed tomography*, tomographie volumique à faisceau conique ;
- CFAO : conception et fabrication assistées par ordinateur ;
- CVIMAR : ciment verre ionomère modifié par addition de résine ;
- DLP : *digital light processing*, traitement numérique de la lumière ;
- DMD : *digital micromirror device*, matrice de micro-miroirs ;
- FA : *facial axis* ;
- FACC : *facial axis of the clinical crown* ;
- FDM : *fused deposition modeling* ; dépôt de fil fondu ;
- LCU : *light curing unit*, chambre à UV ;
- PLA : *polylactic acid*, acide polylactique ;
- PMMA : polyméthacrylate de méthyl ;
- SLA : *stereolithography*, stéréolithographie ;
- UV : ultraviolets ;
- VPS : vinyl-poly-siloxane.

Table des matières

INTRODUCTION	3
1 : DEPUIS QUAND ET POURQUOI COLLE-T-ON DES ATTACHES ORTHODONTIQUES ?	4
1.1 DU SCELLEMENT DES BAGUES AU COLLAGE DES ATTACHES	4
1.2 CONCEPT DE L'ARC DROIT	5
1.2.1 La technique de l'Edgewise.....	5
1.2.2 Andrews et son concept de l'arc droit	6
1.2.3 Évolution du système.....	7
1.3 CRITERES DE COLLAGE	7
1.3.1 Position idéale des attaches	7
1.3.2 Erreurs dans le positionnement des attaches.....	8
2 : TECHNIQUES DE COLLAGE CONVENTIONNELLES	10
2.1 CHOIX DU SYSTEME DE COLLAGE.....	10
2.1.1 Systèmes résineux.....	10
2.1.2 Ciments verres ionomères modifiés par addition de résine	11
2.1.3 Colles auto-adhésives	11
2.2 COLLAGE DIRECT	12
2.2.1 Positionnement des attaches	12
2.2.2 Repositionnement des attaches et réalisation de courbures de compensation	12
2.2.3 Avantages.....	13
2.2.4 Inconvénients.....	13
2.3 COLLAGE INDIRECT CONVENTIONNEL.....	19
2.3.1 Évolution de la technique	19
2.3.2 Mise en œuvre	19
2.3.3 Apport du collage indirect conventionnel.....	23
2.3.4 Limites du collage indirect conventionnel	27
3 : DEVELOPPEMENT DU NUMERIQUE DANS LES CABINETS D'ORTHODONTIE	29
3.1 LES CAMERAS INTRA-ORALES	29
3.1.1 Principe et fonctionnement	30
3.1.2 Précision et validité clinique	31
3.1.3 Intégration au cabinet.....	32
3.2 LES IMPRIMANTES 3D.....	33
3.2.1 Les imprimantes à filaments et leurs applications	34

3.2.2 Les imprimantes à résine et leurs applications.....	35
3.3 PERCEPTION DU NUMERIQUE PAR LE PATIENT	37
4 : APPORT DU NUMERIQUE DANS LE COLLAGE DIRECT DES ATTACHES ORTHODONTIQUES	38
4.1 GUIDE DE COLLAGE GENERE PAR ORDINATEUR.....	38
4.2 COLLAGE DIRECT ASSISTE PAR ORDINATEUR	39
5 : COLLAGE INDIRECT NUMERIQUE	40
5.1 DIFFERENTES TECHNIQUES DE COLLAGE INDIRECT NUMERIQUE « IN-OFFICE ».....	40
5.1.1 Méthode 1 : Positionnement des attaches sur un modèle numérique imprimé.....	40
5.1.2 Méthode 2 : Positionnement numérique des attaches et impression du maître-modèle.....	41
5.1.3 Méthode 3 : Positionnement numérique des attaches et impression des gouttières de transfert.....	42
5.2 APPORT DU NUMERIQUE DANS LE COLLAGE INDIRECT	44
5.2.1 Les mêmes avantages que le collage indirect conventionnel.....	44
5.2.2 Utilisation de l'imagerie 3D pour le parallélisme des racines.....	44
5.2.3 Positionnement numérique des attaches : personnalisation, set-up et reproductibilité.....	47
5.2.4 Personnalisation de la forme d'arcade.....	50
5.2.5 Guides de transfert des attaches.....	51
5.2.6 Avantage dans le choix du système de collage.....	56
5.2.7 Réduction du temps au fauteuil et de la durée du traitement	56
5.3 LIMITES DU COLLAGE INDIRECT NUMERIQUE	57
5.4 UNE TECHNIQUE EN CONSTANTE EVOLUTION	58
6 : MISE EN APPLICATION DU COLLAGE INDIRECT NUMERIQUE A L'HOPITAL BRETONNEAU AVEC ORTHOANALYZER® ET CAS CLINIQUES.....	61
6.1 APPLICATION DU COLLAGE INDIRECT CONVENTIONNEL	61
6.2 APPLICATION DU COLLAGE INDIRECT NUMERIQUE	61
CONCLUSION.....	70
BIBLIOGRAPHIE	71
TABLE DES FIGURES.....	77
ANNEXES.....	79

Introduction

L'utilisation des appareils multi-attaches vestibulaires s'est largement développée à partir des années 1960. Grâce à ces dispositifs, l'orthodontiste peut contrôler la position des dents dans les trois dimensions de l'espace (1). Depuis, la technique a connu deux révolutions : le collage et le développement des attaches pré-informées.

La mise en place des attaches est un des facteurs clés du traitement car c'est la position de ces attaches qui transmet à la dent les informations de sa position finale. Le collage en orthodontie a permis de positionner les attaches avec beaucoup plus de facilité et de précision, en diminuant fortement le recours au scellement de bagues.

Toutes les innovations qui ont suivi avaient pour but principal d'augmenter l'efficacité de ce type d'appareil, en recherchant toujours plus de précision et de confort.

En parallèle, le numérique s'est beaucoup développé, prenant une place de plus en plus importante dans nos vies et également dans les cabinets d'orthodontie.

Cela a débuté par la numérisation des agendas, de la photographie puis de la radiographie. Avec le développement des technologies, notamment des caméras intra-orales et des imprimantes 3D, de nouvelles perspectives de positionnement d'attaches s'ouvrent aux orthodontistes.

Après la présentation des principes et des techniques de collage conventionnelles, nous traiterons l'intégration progressive du numérique dans les cabinets d'orthodontie, jusqu'à la numérisation du collage indirect. Nous montrerons en quoi le collage indirect numérique constitue une évolution logique, et pourquoi il est intéressant de le considérer.

1 : Depuis quand et pourquoi colle-t-on des attaches orthodontiques ?

1.1 Du scellement des bagues au collage des attaches

Jusqu'à dans les années 80, il n'existait qu'une seule façon de mettre en place des attaches fixes sur les dents : le scellement des bagues. Ces bagues ont permis de déplacer les dents avec précision, ce qui a largement contribué au développement de l'orthodontie.

Les premiers orthodontistes, au début des années 1900, réalisaient et ajustaient eux-mêmes les bagues. Une attache était soudée sur ces bagues avant leur mise en place. Les bagues préformées se sont ensuite répandues dans les années 60, ce qui permettait de réduire le temps nécessaire à leur ajustement.

Malgré tout, leur mise en place reste difficile et nécessite au moins 2 séances (1) :

- Une première **étape de séparation** est nécessaire, avec la mise en place de séparateurs, car en présence de contacts interproximaux étroits, il est impossible d'insérer la bague correctement. C'est une séance inconfortable voire douloureuse pour le patient.
- La deuxième étape correspond à **l'essayage et à l'ajustement des bagues**. Elle est techniquement difficile. Une fois ajustée, la bague peut être scellée.

Par ailleurs, les bagues peuvent se révéler iatrogéniques pour le parodonte et augmenter le risque carieux. Enfin, elles sont très visibles et présentent un coût financier important (2)(3).

Figure 1 : Cas bagué avec des attaches d'Angle



Source : Planché, « Concept de l'arc droit de Lawrence Andrews. Principes et évolution », 2002.

Au milieu des années 60, Newman aux Etats-Unis et Miura au Japon ont été les pionniers du collage en orthodontie (2). Le fait de pouvoir coller des attaches a révolutionné l'orthodontie : les bagues ont alors été progressivement abandonnées, à mesure que le collage et les matériaux se sont développés. De nos jours, les bagues ne servent que dans certaines situations spécifiques : faible hauteur coronaire, forces extra-orales, auxiliaires, etc.

Le collage des attaches présente de nombreux avantages : c'est une technique plus performante, plus précise, plus fiable que celle qui précédait, et qui permet de réduire le temps au fauteuil, le temps de traitement, et évite d'avoir à repositionner ou à resceller des bagues devenues lâches (3).

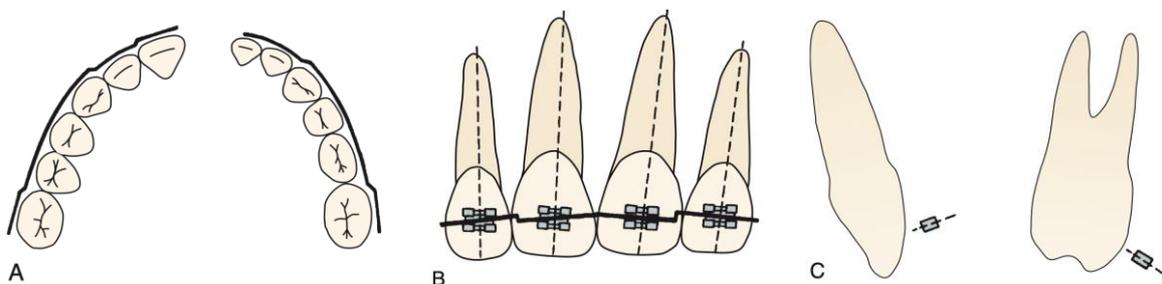
1.2 Concept de l'arc droit

1.2.1 La technique de l'Edgewise

Angle peut être considéré comme le père de l'orthodontie moderne (1). Il a inauguré l'appareil multi-attaches tel qu'on le connaît aujourd'hui : la technique de l'Edgewise. Les attaches d'Angle sont d'une **conception simple** : uni-plot, sans angulation ni inclinaison, mais permettaient de déplacer les dents dans les trois dimensions de l'espace.

Cette technique est très exigeante car il est nécessaire d'adapter l'arc aux particularités anatomiques du système dento-alvéolaire. Il est donc nécessaire de réaliser pour chaque dent des déformations sur l'arc pour transmettre les informations nécessaires dans les trois ordres. Au total, la confection des deux arcs nécessite la réalisation de **76 déformations** de premier, deuxième et troisième ordre, auxquelles il faut ajouter un certain nombre de courbures supplémentaires : omégas, boucles de fermeture... Aussi pour prévenir des mouvements de va-et-vient, ces déformations sont à reproduire d'un arc à l'autre tout en les modifiant progressivement (4).

Figure 2 : Déformations de premier (A), deuxième (B) et troisième (C) ordre en Edgewise



Source : Proffit et al., *Contemporary orthodontics*, 6th ed, 2019.

1.2.2 Andrews et son concept de l'arc droit

En 1970, Andrews a développé et introduit son concept qu'il a nommé : **The Straight Wire Appliance** ou concept de l'arc droit (5).

Ce concept vise à atteindre les 6 clés de l'occlusion d'Andrews, qui caractérisent une occlusion satisfaisante (cf. Annexe 1).

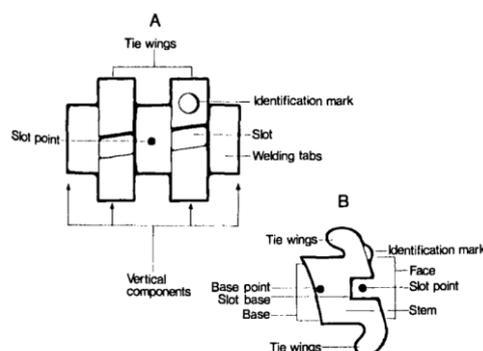
Le principe est novateur, même révolutionnaire : incorporer les informations dans les trois ordres directement dans l'attache. Les **attaches sont pré-informées**.

Les informations de premier ordre sont exprimées par l'épaisseur de l'attache, les informations de deuxième ordre le sont par l'angulation de la gorge par rapport à la base, et les informations de troisième ordre le sont par l'inclinaison de l'attache par rapport à sa base.

Andrews a réalisé une moyenne sur 120 moulages de dentures adultes afin de déterminer les valeurs d'épaisseur et reliefs vestibulaires, d'angulation et d'inclinaison des couronnes. Il est parti du principe que la variation inter-individuelle est très limitée et qu'il est donc possible d'utiliser des attaches avec des valeurs standards.

La technique de l'arc droit présente le grand avantage de permettre la mise en place d'arcs exempts de toute déformation. Ainsi, l'information est éminemment reproductible, sans ajustement aléatoire d'un arc à l'autre. Le terme d'arc droit incite à penser qu'il n'y aura aucune déformation de l'arc à réaliser au cours du traitement, mais ce n'est pas le cas car la mécanique mise en œuvre peut nécessiter de plier l'arc, et aussi car des pliures de finition sont parfois nécessaires.

Figure 3 : Conception d'une attache d'Andrews



Source : Andrews, « The straight-wire appliance », 1979.

Cette technique permet de soulager le praticien dans la confection de ses arcs, et les ajustements nécessaires pour une meilleure individualisation sont grandement facilités puisque réalisés sur un arc plat et sans déformation. La technique est prometteuse, elle permettrait de **réduire la durée de traitement** et d'**améliorer la qualité moyenne d'un traitement** tout en réduisant le temps nécessaire au fauteuil.

Les boîtiers pré-informés sont standardisés et cette standardisation ne permet pas de répondre aux variations inter-individuelles de morphologie dentaire. Ainsi, des imprécisions dans les résultats de traitement peuvent survenir. Il est alors souvent nécessaire de personnaliser le traitement en phase de finitions, en effectuant des courbures de compensation.

Cette **phase de finitions est souvent indispensable** : elle est exigeante en temps, en dextérité et en expérience du praticien.

Les premiers résultats obtenus par Andrews étaient cependant décevants, notamment en raison des informations choisies. Il s'agit d'une technique **très exigeante en termes de positionnement des attaches**, pour que les informations programmées soient fidèlement restituées.

1.2.3 Évolution du système

En 1975, Roth a fait évoluer le système, avec des informations différentes de celles d'Andrews, mieux adaptées aux contraintes thérapeutiques, avec notamment un meilleur contrôle de la partie antérieure de l'arcade maxillaire et un renfort d'ancrage généralisé (4). Sa prescription est la plus diffusée actuellement dans le monde entier. D'autres auteurs ont proposé des prescriptions différentes : McLaughlin, Bennett, Hilgers...

Le concept de l'arc droit a permis de simplifier les procédures thérapeutiques et de soulager le praticien d'actes fastidieux. Ainsi, ce concept s'est **universellement répandu**.

Les attaches pré-informées et la possibilité de coller les attaches ont permis le développement considérable de la spécialité.

1.3 Critères de collage

1.3.1 Position idéale des attaches

Depuis la généralisation de la technique en arc droit, **le positionnement précis des attaches est le facteur clé de nos traitements orthodontiques** (6), au même niveau que le diagnostic et le plan de traitement, car c'est la position des attaches qui transmet à la dent les informations de sa position finale.

La précision est essentielle pour mettre en place les mécaniques souhaitées (3), elle permet une meilleure qualité de traitement, de réduire sa durée et le temps nécessaire au fauteuil.

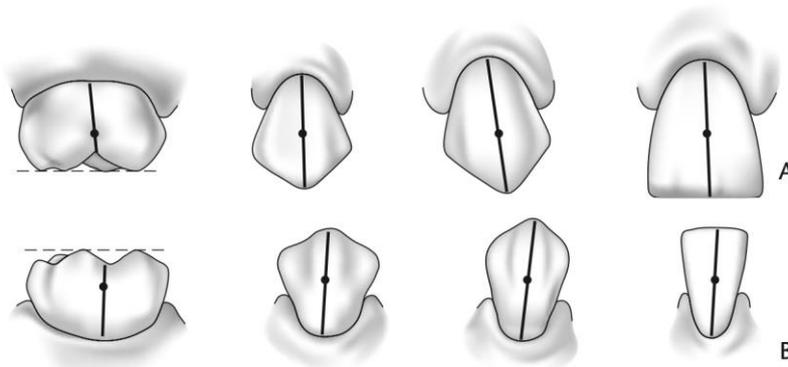
Andrews a décrit le positionnement idéal des attaches (5) : l'attache doit être au milieu de la couronne clinique, au niveau du point FA (pour *Facial Axis*), et orientée parallèlement au grand axe de la couronne clinique (FACC pour *Facial Axis of the Clinical Crown*).

La base des attaches d'Andrews sont incurvées dans le sens horizontal et dans le sens vertical pour faciliter leur positionnement et avoir un site de collage reproductible.

La mise en place de chaque attache requiert de **contrôler 4 éléments** : l'adaptation de la base, le centrage mésio-distal, la position verticale et l'angulation de la gorge (7).

Les **attaches sont conçues pour être positionnées à un endroit précis**, sinon les informations délivrées sont altérées (5). Cette position varie en fonction des auteurs et des informations contenues dans les attaches. Certains auteurs tels que McLaughlin et Bennett ont montré que les points FA de chaque dent n'étaient pas forcément situés sur le même plan et proposent des hauteurs de collage mesurées à partir du bord libre (8).

Figure 4 : Point FA situé sur l'axe vestibulaire (FACC) pour chaque catégorie de dents maxillaires (A) et mandibulaires (B)



Source : Planché, « Concept de l'arc droit de Lawrence Andrews. Principes et évolution », 2002.

1.3.2 Erreurs dans le positionnement des attaches

Une imprécision dans le positionnement des attaches entraîne une mauvaise position de la dent, qui peut être associée à une pression indésirable sur le ligament parodontal, une proximité radiculaire, ou encore une occlusion finale instable.

Une imprécision au-delà de 0,25 mm au niveau des incisives et une imprécision supérieure à 0,5 mm pour les autres dents ont une incidence significative cliniquement (8). De la même façon, une imprécision supérieure à 0,13 mm dans le sens opposé de deux attaches adjacentes a une incidence clinique (9).

Concernant les valeurs angulaires pour le tip et le torque, une imprécision inférieure à 2° est cliniquement acceptable (10).

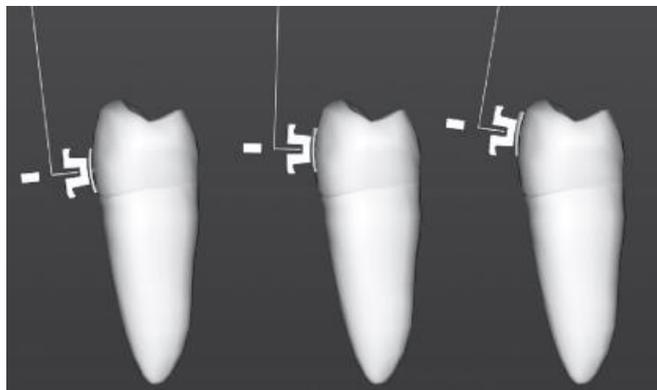
Les facteurs d'erreur de collage peuvent être liés à l'anatomie de la dent : couronne clinique courte, degré d'usure des dents, variations inter-individuelles, angulation corono-radiculaire, etc.

Une **erreur dans le centrage** de l'attache dans le sens mésio-distal va entraîner une rotation de la dent.

Une **erreur dans l'angulation** de celle-ci, avec un non-parallélisme au grand axe de la dent va entraîner une erreur de tip, c'est-à-dire une angulation de la racine et de la couronne.

Enfin une **erreur de hauteur de collage** va modifier les premier, deuxième et troisième ordres. Cette différence d'expression du torque est croissante des incisives aux molaires, et augmente avec le degré de convexité de la face vestibulaire des dents (11). On peut avoir une variation entre 5 à 40° de torque en fonction de la hauteur de collage (5).

Figure 5 : Variation du torque en fonction de la position verticale de l'attache



Source : Mestriner, Enoki et Mucha, « Normal torque of the buccal surface of mandibular teeth and its relationship with bracket positioning : a study in normal occlusion », 2006.

Lorsque l'attache n'est pas parfaitement plaquée sur la surface amélaire, et qu'il y a une **épaisseur de colle hétérogène**, alors cela peut entraîner une rotation ou une modification du torque.

Une erreur de positionnement de l'attache oblige le praticien à réaliser des déformations sur l'arc pour compenser, ou bien à décoller et repositionner l'attache (7).

2 : Techniques de collage conventionnelles

2.1 Choix du système de collage

Depuis les débuts du collage dans les années 60, les matériaux et les traitements de surface ont bien évolué : de nombreux systèmes ont été développés (2).

De nos jours, sur le marché orthodontique, on peut différencier **trois grandes familles de système de collage des attaches orthodontiques**, avec chacune leurs avantages et leurs inconvénients (12) :

- Les colles à base de résine ;
- Les ciments verres ionomères modifiés par addition de résine (CVIMAR) ;
- Les colles auto-adhésives.

2.1.1 Systèmes résineux

Les systèmes résineux sont composés de deux éléments :

- Un liquide (adhésif) : qui assure le rôle d'adhésion par son infiltration dans l'épaisseur de l'émail. Il s'agit d'une adhésion purement micromécanique ;
- Une pâte composite : résine chargée qui comble le hiatus entre la base de l'attache et la surface de collage de la dent.

Parmi les systèmes résineux il y a deux grandes catégories : les systèmes avec mordantage préalable et les systèmes automordançants.

Les **systèmes résineux avec mordantage** sont les plus utilisés en technique directe.

Le mordantage a pour objectif de **créer à la surface de l'émail un relief rétentif** par des attaques intra et interprismatiques. Des brides résineuses se forment autour et dans les prismes d'émail permettant d'assurer une excellente rétention micromécanique de l'assemblage.

Un assemblage avec un système résineux et mordantage préalable présente des propriétés mécaniques élevées, assurant une bonne tenue de l'assemblage.

Cependant, le nettoyage de la colle après la **dépose de l'attache est difficile avec un risque d'altération de l'intégrité du substrat**. La pénétration de la résine dans les zones déminéralisées par le traitement acide et la rigidité de la colle sont à l'origine de la perte non négligeable de l'émail après nettoyage (13).

Les **systèmes automordançants** ne nécessitent pas de mordantage préalable. L'acidité de l'adhésif crée un léger relief amélaire par déminéralisation superficielle. L'infiltration de résine dans l'émail est très peu profonde et témoigne de la faible agressivité du traitement de surface de l'émail, Comparé aux systèmes avec mordantage acide préalable, ils offrent un **meilleur respect de l'intégrité de l'émail**, une dépose plus facile des attaches et une élimination plus facile de la colle (12).

2.1.2 Ciments verres ionomères modifiés par addition de résine

Les ciments verres ionomères modifiés par addition de résine (CVIMAR) peuvent être employés. L'utilisation à privilégier est l'**association d'un CVIMAR et d'un adhésif automordançant**.

En effet, un assemblage réalisé avec l'association d'un système automordançant et d'un CVIMAR présente des valeurs d'adhérence similaires à celles obtenues lors de l'utilisation d'un adhésif automordançant en association à un composite de collage, et très proche des valeurs d'adhérence obtenues par les systèmes résineux avec mordantage préalable (cf. Annexe 2) (12).

L'utilisation d'un ciment verre ionomère présente de nombreux avantages : bioactivité (relargage de fluor) (1), respect de l'intégrité de l'émail, facilité de dépose des attaches, facilité d'élimination de la colle, tolérance à l'humidité.

Cependant, sa présentation en capsule ou en mélange à spatuler, sa texture filamenteuse, son temps de travail limité, rendent son **utilisation en collage direct contraignante**.

2.1.3 Colles auto-adhésives

Selon les fabricants, les colles auto-adhésives ne nécessitent ni traitement de surface ni adhésif car elles sont automordançantes et auto-adhésives.

Dans les faits il a été montré que ces colles ne pouvaient être utilisées en orthodontie que si les surfaces étaient traitées au préalable par de l'acide orthophosphorique.

Les colles auto-adhésives présentent de nombreux avantages. Il s'agit d'un système **monocomposant** permettant une meilleure ergonomie, diminuant les risques d'erreur. De plus, c'est une colle à **prise duale, hydrophile**, et présentant une texture idéale. Leur viscosité n'est cependant **pas adaptée à une utilisation en collage direct** (12).

2.2 Collage direct

Le collage direct correspond au **positionnement des attaches directement en bouche**. Il n'y a qu'une seule étape, clinique, et pas d'étape de laboratoire.

Il s'agit de la première technique mise au point, et reste la plus employée pour la mise en place des attaches orthodontiques en vestibulaire (1). La mise en place des attaches par collage direct se fait donc directement en bouche, en une ou deux séances.

Le collage des attaches nécessite dans un premier temps le nettoyage des surfaces amélaire puis la mise en place d'un champ opératoire afin de contrôler les téguments et l'humidité : il peut se composer de triangles salivaires (Dry Tips®), écarteur pour joues et lèvres (OptiView® ou écarteur de Nolla), repousse langue...

2.2.1 Positionnement des attaches

Les attaches sont positionnées une à une par le praticien. Il est nécessaire pour le praticien de trouver la bonne position de l'attache rapidement. Afin d'augmenter le temps de travail, et pour avoir plus de flexibilité, **la colle utilisée est de préférence photopolymérisable** (1).

Pour aider le praticien à positionner au mieux l'attache dans le sens vertical, il existe des **auxiliaires de collage** : jauge étoilée, jauge de hauteur, jauge d'extrémités, laser, etc. Cela permet de minimiser les erreurs de collage (14), mais reste source d'approximations, en fonction de l'inclinaison de la jauge retenue (15).

La qualité du positionnement direct des attaches peut être influencée par l'expérience du praticien, son acuité visuelle et sa dextérité manuelle (14).

2.2.2 Repositionnement des attaches et réalisation de courbures de compensation

En technique directe, les attaches sont collées initialement dans la position idéale selon les préférences de l'opérateur. Le résultat du collage ne peut être apprécié qu'après l'expression des premiers arcs d'alignement. Il est recommandé de déceler rapidement les erreurs de positionnement au cours du traitement, et de repositionner les attaches, afin de minimiser les courbures de compensation nécessaires.

Carlson et Johnson ont proposé un protocole (7) : il s'agit d'inclure à tout traitement une **séance de réévaluation au cours du traitement**. Cette réévaluation a lieu après l'expression complète des informations contenues dans les attaches, selon leur position initiale. Elle a lieu généralement dans les 6 premiers mois de traitement, quatre à huit semaines après avoir mis en place un fil de pleine section, remplissant presque complètement la gorge de l'attache. Lors de cette séance, le praticien réalise un

examen clinique de la position des attaches, évalue l'alignement et le nivellement obtenus. Le parallélisme des racines est vérifié à l'aide d'une radiographie panoramique ou d'un bilan long cône. Toutes les attaches mal positionnées sont notées avec les modifications à apporter, et une séance de repositionnement est programmée. Elle dure **environ une heure au fauteuil**. Toutes les attaches notées précédemment sont décollées, la colle est nettoyée, et de nouvelles attaches sont collées en prenant en compte les modifications souhaitées. C'est une séance longue et fastidieuse.

2.2.3 Avantages

Le collage direct est la technique la plus employée en vestibulaire, car cette technique a fait ses preuves et présente certains avantages. En effet, c'est la technique **la plus facile à mettre en place** dans un cabinet, et c'est aussi **la moins coûteuse** (1).

Il est plus aisé de s'assurer que la base de l'attache est **bien plaquée sur la surface de la dent**, ce qui réduit le risque de hiatus entre la base et la surface amélaire par manque de colle. Il est aussi plus aisé d'**éliminer les excès de colle** (16), avant la polymérisation : cela permet d'éviter de solidariser deux dents, de minimiser les colorations et de réduire les risques l'inflammation gingivale.

L'âge et l'expérience de l'orthodontiste ne semblent pas influencer la précision du collage. En effet, les étudiants collent même avec plus de précision dans le sens vertical. Cependant, le placement des attaches par les étudiants est moins reproductible et prend quasiment deux fois plus de temps (17).

Enfin, le collage direct est la **technique la plus efficace pour repositionner une attache**. C'est la technique la plus facile à mettre en œuvre et surtout la plus rapide quand il y a peu de dents à coller (1).

2.2.4 Inconvénients

2.2.4.1 Une technique exigeante

Le collage direct est relativement difficile, car il requiert de la **concentration au praticien**, davantage de **coopération au patient** (18) et est une source potentielle de stress (15).

La mise en place des attaches en collage direct est un processus qui prend du temps au fauteuil, ce qui augmente considérablement les risques de contamination des surfaces dentaires préparées (19).

Il est donc nécessaire pour le praticien de trouver la bonne position de l'attache, rapidement et précisément, directement dans la bouche du patient dans laquelle les ajustements fins sont plus difficiles à réaliser car il n'y a pas de repère sur les dents et reposent sur le contrôle visuel.

La **position idéale de l'attache est parfois difficile à trouver** en raison de la diversité de la morphologie des dents. Certaines dents sont difficiles à positionner en collage direct : c'est le cas des incisives latérales maxillaires, qui sont positionnées de façon très différentes selon les praticiens (20).

Les dents postérieures sont également difficiles à coller et le taux d'erreur en postérieur est plus élevé qu'en antérieur. Ces erreurs de positionnement peuvent être expliquées par **l'effet optique de « la parallaxe »**. Le fait de voir la dent et l'attache d'un certain angle entraîne des erreurs d'appréciation. Avoir une vision directe sur l'attache, sans angulation permet de limiter les erreurs de positionnement. Or l'accès visuel est plus difficile en postérieur et il est parfois même impossible d'avoir un accès visuel direct. De plus, il arrive aussi que l'attache glisse avant la polymérisation, ce qui ajoute à l'imprécision du collage (21).

2.2.4.2 Précision et reproductibilité

En collage direct, sur presque toutes les dents, il y a des **erreurs de collage dans les trois dimensions**. Même si les erreurs sont faibles dans la plupart des cas, la combinaison de ces petites erreurs peut causer une malposition de la dent dans les trois dimensions de l'espace, ce qui peut affecter l'occlusion finale (21). Le **positionnement des boîtiers est approximatif** : en moyenne il y a une erreur d'environ 0,58 mm dans les sens vertical, 0,33 mm dans le sens mésio-distal et 3,19° dans l'angulation (22), jusqu'à 10° dans l'angulation mésio-distale des dents postérieures.

Par ailleurs, il est plus difficile de positionner correctement les boîtiers autoligaturants que les boîtiers conventionnels aussi bien verticalement qu'horizontalement : il y a 10 fois plus d'erreurs avec des attaches Damon® qu'avec des boîtiers conventionnels (23). De plus, la tendance va vers la miniaturisation des attaches ce qui peut compliquer encore leur ajustement (15).

Le collage direct ne permet donc pas de positionner les attaches de façon idéale, et c'est **une technique peu reproductible**. Les erreurs de positionnement des attaches ont une **incidence sur la durée du traitement**, et notamment les étapes de finitions (24).

2.2.4.3 Risques iatrogéniques associées

Mordancage et leucomes

Les leucomes sont un des **effets indésirables de traitements orthodontiques** par appareil multi-attaches : ils correspondent au premier stade des lésions carieuses amélares et sont inesthétiques, plus particulièrement au niveau antérieur. Ils se traduisent par une **opacification et une perte de translucidité de l'émail**.

Ils apparaissent dans **45 à 55 % des cas**, et **plus le traitement est long, plus le risque est important** (25).

Figure 6 : Patient présentant des leucomes au niveau des incisives latérales maxillaires

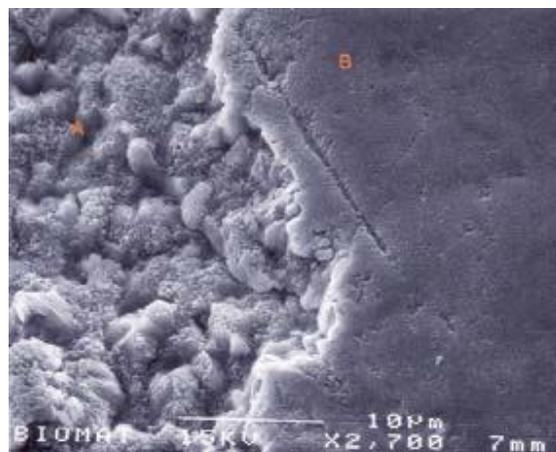


Source : Auteur, 2021.

L'appareil orthodontique complique l'hygiène orale, ce qui entraîne l'accumulation de plaque bactérienne autour de la jonction attache-adhésif-émail et augmente le risque d'apparition de leucomes.

De plus, le mordançage, étape indispensable au collage des attaches en technique directe, induit la création de rugosités sur la surface amélaire pour permettre la rétention micromécanique. Cet émail rugueux a l'inconvénient d'être **favorable à l'adhésion de la plaque bactérienne** (26), d'autant plus lorsqu'il est associé à un sablage préalable. Cela a pour conséquence directe la déminéralisation des surfaces amélaire adjacentes aux attaches par la production acide de la plaque bactérienne.

Figure 7 : Surface amélaire observée au microscope électronique à balayage : (A) après mordançage à l'acide orthophosphorique pendant 30 secondes, (B) côté « intact »



Source : Hitmi, « Risque iatrogène sur l'émail de la dépose des attaches orthodontiques et du nettoyage de la colle », 2015.

Bien que l'hygiène orale et les habitudes alimentaires jouent un rôle prépondérant dans l'apparition de leucomes, il est indispensable de mettre tout en œuvre pour les prévenir, car ces taches blanches ne disparaissent pas spontanément (1).

Par conséquent, il est recommandé de **restreindre la zone de mordançage** à la zone de collage afin de limiter la zone déminéralisée rugueuse. Le mordançage sélectif limite l'accumulation de plaque en début de traitement, bien qu'il n'y a pas d'effet significatif à long terme (27).

Aussi, il est recommandé de bien **recouvrir toute la surface mordancée** de matériel de collage, mais la question subsiste de savoir s'il existe un risque accru d'apparition de leucomes après la disparition du matériau de collage.

Enfin, il est recommandé de **limiter la durée de mordançage à 15 secondes** : cette durée est suffisante pour obtenir une force de collage adéquate aux exigences d'un traitement orthodontique, et une durée supérieure engendre un risque accru de formation de leucomes (28).

Repositionnement des attaches

La nécessité de repositionner des attaches, parfois plusieurs fois, est un autre des inconvénients du collage direct.

Outre **l'inconfort et la durée de la séance de repositionnement**, les systèmes résineux qui nécessitent un mordançage préalable utilisés en collage direct présentent un **très haut risque iatrogène** sur l'émail à cause de l'association d'un traitement amélaire agressif, d'une profonde infiltration de résine dans l'émail et des propriétés mécaniques élevées (13).

Le fait de déposer une attache peut s'avérer iatrogénique. Il est nécessaire que les forces de collage soient suffisantes pour résister aux cycles de mastication, mais cette force de collage peut être à l'origine de **complications au niveau amélaire** au moment de la dépose des attaches : éclats d'émail ou formation de fêlures au sein de l'émail. Ces fractures peuvent survenir avec des attaches céramiques, mais aussi avec des attaches métalliques.

De plus, des cas de fracture complète de la couronne durant la dépose des attaches ont été décrits dans la littérature (29).

Figure 8 : Arrachement macroscopique d'émail à la dépose de l'attache



Source : Hitmi, « Risque iatrogène sur l'émail de la dépose des attaches orthodontiques et du nettoyage de la colle », 2015.

Afin de minimiser le risque de fracture amélaire, il est possible d'exercer un mouvement de rotation latérale sur l'attache. Mais cette technique exerce une pression importante sur le ligament parodontal et sur l'os alvéolaire, à l'origine de **douleurs ressenties** lors du retrait des attaches. Or 95 % des patients traités en orthodontie ressentent de la douleur au cours du traitement, ce qui peut être à l'origine de leur souhait d'interrompre le traitement (30).

Ensuite, il est nécessaire de retirer toute la colle résiduelle avant de pouvoir coller de nouveau. La colle est mécaniquement retirée. Il y a 2 aspects des effets iatrogéniques de la dépose de la colle résiduelle en termes de dégât sur l'émail : la **quantité d'émail perdu** après mordantage, fraisage et polissage ; et **l'augmentation de la rugosité de la surface amélaire** à cause des rayures générées (31).

L'acide orthophosphorique entraîne une perte nette de l'épaisseur de l'émail traité autour de 8 à 10 μm . Puis, se pose le problème de l'élimination de la résine.

Aujourd'hui, aucune technique ne permet de retirer le composite résiduel sans endommager l'émail, et pour plusieurs raisons. D'abord les attaches sont collées après mordantage, ce qui permet l'infiltration de résine au sein de l'émail. L'infiltration de résine après mordantage peut aller jusqu'à 50 μm de profondeur, ainsi l'élimination complète de l'adhésif nécessiterait l'élimination d'une couche d'émail.

Ensuite la dureté de l'émail est plus faible que les matériaux abrasifs utilisés (quartz, aluminium, acier au carbone, zircone ou carbure de tungstène) pour l'élimination de la colle résiduelle. Les lésions d'abrasion de l'émail engendrés dépendent de la composition des particules abrasives, la vitesse de rotation et de la pression appliquée sur la surface amélaire. C'est donc une procédure opérateur-

dépendante (31). Un nettoyage agressif de la colle peut entraîner une altération de l'émail qui va de la perte de sa brillance et de son poli jusqu'à la réduction de son épaisseur en passant par la création de rayures (13).

Figure 9 : Rayures de la surface amélaire après utilisation d'instruments rotatifs agressifs pour le nettoyage de la colle



Source : Auteur, 2021.

Au total, après mordantage à l'acide orthophosphorique, puis dépose de l'attache, élimination de la colle et polissage, une couche **d'environ 150 µm d'émail est perdue**. Or la couche externe de l'émail est plus dure et plus minéralisée que les couches profondes et il est indispensable de la préserver. L'élimination de cette couche entraîne une **diminution de la résistance** de l'émail avec une plus **grande susceptibilité à la déminéralisation** (31).

Enfin, pour coller une nouvelle attache sur l'émail, il faut passer par une nouvelle phase de mordantage, ce qui entraîne des microporosités de l'émail, à l'origine de la micro-rétention de l'adhésif infiltré dans l'émail. Puis il faudra la déposer de nouveau en fin de traitement.

Pour répondre aux effets iatrogéniques, **il faut tendre vers un système minimisant les agressions** envers l'émail avec :

- Une technique permettant l'emploi d'un système de collage sans mordantage, non agressif pour l'émail, dont l'élimination est facile ;
- Une technique limitant le besoin de repositionner les attaches ;
- Une technique performante et efficace, afin de réduire la durée du traitement.

2.3 Collage indirect conventionnel

Le collage indirect conventionnel est un **collage en deux temps** : il y a un **temps de laboratoire** pour le positionnement des attaches et la confection des gouttières de transfert, et un **temps au fauteuil** pour le transfert des attaches.

2.3.1 Évolution de la technique

Dans le but d'améliorer l'efficacité des traitements orthodontiques et de réduire leur durée, le collage indirect a été développé pour répondre à l'exigence de la précision de collage.

Le collage indirect conventionnel a été décrit en détails pour la première fois par **Silverman et Cohen en 1972** (32). Le concept de l'arc droit développé en 1976 par Andrews, renforce le besoin de précision dans le positionnement des attaches.

En 1979, Thomas a amélioré la technique de Silverman en y ajoutant une **base résine personnalisée** à l'attache (33). Il s'agit de talons de composite.

L'utilisation du collage indirect est majoritaire en technique linguale, mais demeure peu utilisée en vestibulaire.

Il semblerait que l'usage du collage indirect conventionnel gagne du terrain dans les cabinets passant de 13 % en 2008 à 18 % en 2014. Mais c'est une technique qui reste **peu utilisée en routine du fait de ses étapes de laboratoire complexes et de ses inconvénients** (34).

2.3.2 Mise en œuvre

Le collage indirect nécessite deux étapes cliniques : la prise d'empreinte et le collage. Entre ces deux étapes cliniques, il y a 3 étapes de laboratoire : la réalisation d'un modèle de travail, le collage des attaches sur le modèle et la réalisation de la gouttière de transfert.

2.3.2.1 Étapes de laboratoire (12)

Réalisation d'un modèle de travail

Après la prise de l'empreinte, celle-ci est envoyée au laboratoire. C'est alors qu'un technicien de laboratoire réalise la **coulée de l'empreinte avec du plâtre ou du silicone**. Le plâtre est relativement peu coûteux, mais est salissant, nécessite un temps de prise conséquent et d'avoir du matériel spécifique (taille-plâtre).

Le silicone présente l'avantage de ne pas être salissant, de ne pas nécessiter de matériel spécifique, et d'avoir une prise rapide, mais représente un coût plus élevé.

Figure 10 : Réalisation d'un moulage en silicone



Source : Hitmi, « Collage indirect des attaches orthodontiques vestibulaires », 2020.

Collage des attaches sur le modèle

Sur le modèle de travail obtenu, le technicien de laboratoire place les attaches une à une. Le travail en laboratoire permet d'avoir un accès visuel direct sur les dents, et permet de prendre le temps nécessaire au positionnement idéal des attaches. Il est possible sur les moulages en plâtre, de faire figurer des **repères visuels** pour aider au collage.

Figure 11 : Attaches positionnées sur le modèle de travail au niveau des repères visuels



Source : Nojima et al., « Indirect orthodontic bonding - a modified technique for improved efficiency and precision », 2015.

Réalisation des gouttières de transfert

Les gouttières de transfert en technique conventionnelle peuvent être **thermoformées** (simple ou double gouttière thermoformée), à **base de silicone en vinyl-poly-siloxane**, ou une **combinaison des deux** (35).

Les gouttières en silicone sont réalisées en 2 étapes : on dépose d'abord une couche de silicone faible viscosité (light) sur les attaches et les faces occlusales, puis après polymérisation, on y ajoute une couche de silicone de haute viscosité (putty)(36).

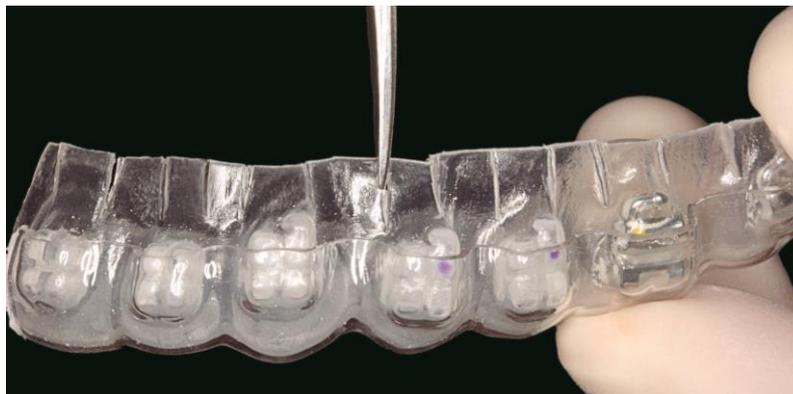
Figure 12 : Gouttière de transfert en silicone transparent



Source : Plattner et al., « Comparative study between the overall production time of digitally versus conventionally produced indirect orthodontic bonding trays », 2020.

Les doubles gouttières thermoformées sont constituées d'une gouttière thermoformée molle de 1 mm d'épaisseur, qui recouvre complètement les attaches avec des découpes en vestibulaire, et d'une gouttière dure de 0,75 mm d'épaisseur, qui s'arrête à mi-hauteur d'attache (36).

Figure 13 : Double gouttière thermoformée de transfert



Source : Nojima et al., « Indirect orthodontic bonding - a modified technique for improved efficiency and precision », 2015.

Précision du transfert des attaches

Une revue systématique réalisée par Sebbagh et al. en 2022 a cherché à évaluer la précision du collage indirect au moment du transfert des attaches.

Au total l'imprécision sur les **valeurs linéaires mésio-distale, vestibulo-linguale et verticale** a été en **moyenne de 0,08 mm, 0,09 mm et 0,14 mm** respectivement, et sur les **valeurs angulaires d'angulation, rotation et de torque** l'imprécision était en moyenne respectivement de **1,13°, 0,93° et 1,11°** (37).

L'imprécision dans le sens vertical s'explique par la pression appliquée qui peut être trop ou pas assez importante. En effet, la plupart des gouttières de transfert sont conçues avec une certaine flexibilité et ce qui requiert une pression digitale. Il est alors difficile de savoir si la gouttière est parfaitement insérée, pas assez insérée ou au contraire trop fortement appliquée (38).

Une gouttière insuffisamment insérée entraîne une imprécision dans le transfert, et les attaches sont alors collées trop en occlusal. Au contraire, une pression trop importante risque d'entraîner une position trop gingivale des attaches (39).

Dans le sens transversal, les attaches sont positionnées plus en vestibulaire : cela s'explique par une épaisseur excessive de colle (36).

La plupart des études se réfèrent à l'*American Board of Orthodontics* (ABO) qui juge acceptables une déviation de 0,5 mm pour les valeurs linéaires et une déviation de 2° pour les valeurs angulaires. Même si ces limites sont données pour la position de dents et non pour la position des attaches, cette revue systématique conclut que la précision du transfert des attaches est cliniquement acceptable.

Dans toutes les dimensions, linéaires et angulaires, les **gouttières en silicone sont plus performantes** que les doubles gouttières thermoformées

Malgré tout, ces deux types de gouttières restent performantes pour transférer en bouche les attaches à la position planifiée avec une bonne précision. Ce sont les deux techniques les plus couramment employées par les orthodontistes.

Cependant, la conception des gouttières, thermoformées ou en silicone, comporte de nombreuses étapes et est donc une **procédure à risque d'erreurs** (35).

2.3.2.2 Transfert clinique (12)

Le transfert en bouche des attaches se fait en 12 étapes (cf. Annexe 3).

Il est recommandé d'appliquer une pression suffisante et homogène lors de la polymérisation afin d'avoir une épaisseur de colle homogène. La pression est à moduler en fonction du matériau et la plupart des gouttières englobe en partie ou totalement les attaches, ce qui rend difficile le contrôle visuel de la position des attaches et empêche l'élimination des excès de colle.

Il existe une **courbe d'apprentissage importante** pour maîtriser le transfert en bouche des attaches à l'aide d'une gouttière de transfert, et aussi pour détecter les erreurs de fabrication ou d'adaptation (35).

2.3.3 Apport du collage indirect conventionnel

2.3.3.1 Confort du patient et du praticien

Le collage indirect permet de pallier certaines contraintes du collage direct : accès difficile et séances longues.

Le collage indirect permet de **réduire le temps au fauteuil** du collage ce qui diminue le risque de contamination du site. Selon plusieurs études, le temps nécessaire au fauteuil pour le collage indirect est **50 % moins important** que pour le collage direct. En effet, le temps nécessaire au fauteuil pour le collage indirect d'une arcade, après nettoyage et mordançage, est de **12,68 minutes contre 29,76 minutes pour le collage direct** (3).

Cette technique, plus rapide, augmente donc le confort du patient et est préférée par les patients.

Cette technique est aussi préférée par les orthodontistes car elle permet de **réduire la fatigue clinique et le stress** lié à la durée du collage et de s'affranchir du manque de visibilité occasionnée par la langue, les lèvres et les joues (36). Enfin, c'est une technique qui implique toute l'équipe soignante : assistants et orthodontistes.

2.3.3.2 Qualité du traitement

Précision dans le positionnement des attaches (6)

Il est admis que le positionnement des attaches est plus précis en collage indirect conventionnel qu'en collage direct, grâce à une meilleure visibilité et un temps de travail suffisant. Selon Zachrisson, le collage indirect est bien adapté au collage des dents difficiles d'accès, et plus particulièrement des dents postérieures (16).

De plus, le collage indirect permet plus facilement d'adapter les hauteurs de collage en fonction des malocclusions et anticiper les finitions en sur-corrigeant des rotations ou des tips.

Cependant, les résultats varient en fonction des études, et la plupart s'accorde sur l'**absence de différence cliniquement notable entre collage direct et indirect** dans le positionnement des attaches, mais la **marge d'erreur est moins importante** en technique indirecte.

Le positionnement est plus fidèle concernant la hauteur de collage, probablement lié aux différentes inclinaisons possibles de la jauge en technique directe (15).

Le **facteur humain** est toujours présent lors du positionnement des attaches, même en collage indirect. Une revue systématique réalisée en 2019 montre qu'il n'y a pas de preuve de la supériorité du collage indirect conventionnel comparé au collage direct en termes de précision. Cela peut s'expliquer par le fait qu'il y a des imprécisions lors du transfert des attaches. Cela peut être dû à une contamination, une interférence avec les tissus mous, ou une épaisseur hétérogène des matériaux de collage (6).

Reproductibilité

Bien que le collage indirect conventionnel ne parvienne pas à positionner les attaches de façon idéale, **l'avantage principal est qu'il est plus constant.**

L'étude de Nichols montre que le collage indirect est reproductible. Cela permet de **standardiser les collages** au sein du cabinet (18).

Qualité des finitions

Brown et al., en comparant le collage indirect et collage direct, suggèrent l'absence de différence significative sur la qualité des finitions (selon le score ABO-OGS)(40). Cependant, une autre étude menée par Yildirim montre que le score ABO-OGS en collage indirect conventionnel est significativement plus bas que lors du collage direct (score médian de 14.00 contre 17.00)(34) : cela indique que les patients traités avec collage indirect conventionnel ont de meilleures finitions. Le score est significativement plus faible pour le **nivellement des crêtes marginales**, qui va dans le sens d'un meilleur positionnement des attaches dans le sens vertical en collage indirect.

Temps de traitement

Concernant le temps de traitement, les études ne s'accordent pas non plus.

Selon Brown et al., le collage indirect permettrait de réduire le temps de traitement, et diminuerait la nécessité de réaliser des courbures de compensation et la nécessité de repositionner des attaches (40). Deahl et al. montrent en revanche que le temps de traitement et le nombre de séances ne diffèrent pas entre collage direct et collage indirect conventionnel (34).

Taux de décollement

Le succès d'un traitement orthodontique dépend de la fiabilité du dispositif : il faut un minimum de taux de décollement. La force de collage minimum requis est de 6 MPa (41).

Les décollements au cours du traitement rallongent le traitement et augmentent le temps de travail au fauteuil.

Zachrisson, en 1978, avait montré un taux de décollement de 2,5 % en collage direct contre 14 % en collage indirect. Le collage indirect était alors considéré comme inférieur du fait du taux de décollement, du temps nécessaire au placement des attaches et du temps nécessaire pour éliminer les excès. Il est possible que le collage direct permette une force de collage plus importante que le collage indirect car la base de l'attache est mieux appliquée sur la surface dentaire (16), mais surtout du fait de la contamination des talons de résine.

De plus, Cooper et al. ont rapporté un taux de décollement immédiat significativement plus important en collage indirect avec 15 attaches décollées dans les 24 heures sur 1090 : plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu : contamination des sites, pression appliquée sur la gouttière et contamination des talons... (42)

Il est difficile de comparer les taux d'échec des différentes études du fait des différents protocoles, systèmes de collages, matériaux utilisés ainsi que la durée d'observation.

Cependant, des études plus récentes dont une méta-analyse ne montrent **pas de différence dans la force de collage** entre collage direct et indirect (6) : cela peut s'expliquer par l'évolution de la technique.

Une étude récente a montré un taux moyen de survie à 6 mois des attaches de 98,6 % en technique directe contre 98,3 % en technique indirecte (43).

Choix du système de collage et prévention des risques iatrogènes

La technique de collage, directe ou indirecte, ne semble pas influencer sur l'accumulation de plaque autour des attaches et donc la formation de leucomes.

Cependant, le collage indirect offre la **possibilité de réaliser des masques de mordançage** afin de réaliser un mordançage très sélectif de l'émail (44).

Figure 14 : Masques de mordançage



Source : Cozzani et al., « Etching masks for precise indirect bonding », 2010.

Une étude en split-mouth, où la moitié de l'arcade est collée en technique directe, et l'autre moitié en technique indirecte a été réalisée avec des guides de mordançage. Ces guides correspondent à des gouttières thermoformées Duran® de 1 mm, avec des découpes suivant le contour des attaches. Les auteurs montrent qu'après un mordançage sélectif, il y a significativement moins de plaque autour des attaches durant les 4 premiers mois de traitement.

Une autre étude menée en split-mouth, en lingual, a montré une réduction de l'accumulation de plaque grâce aux masques de mordançage associé à **deux fois moins leucomes à 1 an** de traitement (26).

En 2010 Cozzani et al. ont même proposé une modification du protocole de collage indirect conventionnel pour y inclure la fabrication systématique de masques de mordançage, dans le but de réduire les excès de colle, et l'accumulation de plaque associée (45).

Cependant, la réalisation de guides de mordançage prend du temps et présente une certaine complexité, ce qui limite grandement son utilisation.

Par ailleurs, le collage indirect permet **l'utilisation de tous types de systèmes de collage**. Le choix se fait en fonction de la force de collage et de la difficulté à éliminer les excès, mais pas seulement.

Parmi les colles chémo-polymérisables ou à prise duale, les ciments verres ionomères (CVI) sont particulièrement intéressants. L'inconvénient du CVI est la force de collage qui est insuffisante (1).

Les **ciments verres ionomères modifiés par adjonction de résine** (CVIMAR) sont plus performants et nécessitent un traitement de surface de l'émail afin d'obtenir une force de collage satisfaisante.

En effet, l'utilisation d'un système automordançant avec les CVIMAR permet une très bonne tenue de l'assemblage (12).

L'utilisation d'un CVIMAR présente de nombreux avantages. En effet, ils permettent de **relarguer du fluor** tout au long du traitement et se rechargent par application topique de fluor, contenu notamment dans le dentifrice. Cela permet de protéger l'émail autour de l'attache, et diminue le risque de formation de leucomes.

De plus, ils sont **très respectueux de l'intégrité de l'émail**, avec une dépose des attaches et l'élimination de la colle facilitées (13).

2.3.4 Limites du collage indirect conventionnel

2.3.4.1 Organisation du cabinet

Gestion des rendez-vous

Les empreintes avant le collage indirect ne doivent pas être prises trop en avance, sinon il pourrait y avoir un manque d'adaptation des gouttières de transfert. En effet, chez les adolescents, il est recommandé de ne pas excéder 2 semaines entre le moment de la prise d'empreinte et le collage.

Dans les cas avec extractions, les dents ne peuvent pas être extraites avant le collage. De même les dents en cours d'éruption doivent être prises en compte (16).

Gestion du laboratoire et temps de travail total

Comme inconvénients du collage indirect conventionnel, on retrouve essentiellement les **inconvénients du travail en laboratoire** : le délai de traitement de l'empreinte, le travail du plâtre salissant, la nécessité d'avoir un matériel spécifique (taille plâtre), le temps de prise du plâtre.

Mais il y a la possibilité d'utiliser un silicone de coulée, non salissant, qui ne nécessite pas de matériel spécifique, et à prise rapide, mais plus coûteux (12).

Trois essais randomisés ont comparé le temps de travail (en laboratoire et au fauteuil) entre collage direct et collage indirect conventionnel : les trois études ont montré que le collage indirect nécessitait significativement **plus de temps de travail au total**, malgré un **temps au fauteuil réduit** comparé au collage direct. Le temps total nécessaire pour le collage indirect est de **38,92 minutes (dont 12,68 minutes au fauteuil) contre 29,76 minutes pour le collage direct (au fauteuil)** (3).

Coût

Le collage indirect conventionnel engendre un **coût supplémentaire** par rapport au collage direct. C'est une technique qui implique un nombre d'étapes supplémentaires par rapport au collage direct et cela nécessite du matériel supplémentaire (12). Ces étapes peuvent être déléguées à un laboratoire externe, ce qui engendrera des frais de laboratoire.

2.3.4.2 Qualité du traitement

Absence de rétrocontrôle

Sauf si l'orthodontiste positionne lui-même les attaches sur le moulage, le collage indirect conventionnel présente l'inconvénient de ne pas avoir de rétrocontrôle, c'est-à-dire que le praticien ne valide pas lui-même la position des attaches, alors que le collage est une étape clé qui conditionne le traitement orthodontique (6).

Précision

Au cours de la chaîne de préparation au laboratoire, il y a des variations dimensionnelles : en raison du matériau d'empreinte, du matériau de coulée, de l'utilisation d'un vernis isolant, de la dureté de la gouttière de transfert.

En collage indirect, l'épaisseur de colle est excessive : plus de trois quarts des boîtiers sont collés trop vestibulaire, ce qui joue sur le premier ordre et le torque. De plus, il est important d'appliquer une pression égale sur toutes les attaches lors de la polymérisation, pour ne pas avoir une épaisseur inégale de composite. Ainsi, le **protocole est complexe et le risque d'erreur est présent**.

Dans une étude, la position idéale de l'attache, qui a été prédéterminée, n'a pas pu être reproduite que ce soit en technique directe ou indirecte conventionnelle (15).

Excès de colle

En collage indirect, il est indispensable que la bonne quantité de colle soit utilisée, car l'élimination des excès peut être difficile et augmente le temps nécessaire au fauteuil (46).

Technique opérateur-dépendant

Enfin le collage indirect est plus **sensible à la technique et à l'expérience du praticien** (15). C'est une technique qui dépend aussi de **l'expérience du technicien de laboratoire**.

3 : Développement du numérique dans les cabinets d'orthodontie

Cela fait une quinzaine d'années que le numérique s'est invité dans les cabinets dentaires. Il y occupe une place de plus en plus importante.

En effet, avec le développement de l'informatique et l'essor du numérique, les cabinets médicaux et dentaires se sont équipés très rapidement d'ordinateurs et se sont orientés vers la dématérialisation, ce que les anglo-saxons appellent « *Paperless Office* ».

Cela a permis d'**informatiser les agendas et la prise de rendez-vous**, mais aussi les **dossiers des patients**.

En parallèle, avec l'amélioration de la **photographie numérique** et de la **radiographie numérique**, ces dernières ont progressivement remplacé leurs ancêtres argentiques dans les cabinets dentaires : en effet, ces technologies numériques sont devenues plus performantes, plus rapides et surtout plus pratiques. Il n'est plus nécessaire d'avoir un espace de stockage des dossiers et il n'y a plus le risque de vieillissement des documents.

Le développement du numérique dans les cabinets dentaires ne s'est pas arrêté là. Les **systèmes CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur)** sont de plus en plus utilisés en dentisterie : en prothèse conjointe et adjointe ou pour les guides chirurgicaux (47). L'orthodontie n'est pas en reste, le numérique a permis le développement et démocratisation des aligneurs, et des systèmes personnalisés en lingual et vestibulaire.

3.1 Les caméras intra-orales

Les orthodontistes utilisent des **moulages d'étude** pour poser un diagnostic, établir un plan de traitement, simuler des traitements (set-up diagnostique) et pour fabriquer des appareils. La technique conventionnelle de prise d'empreinte repose sur l'utilisation d'alginat, et la coulée de ces empreintes permet l'obtention de moulages en plâtre.

Les moulages en plâtre présentent un faible coût et peuvent être affrontés et mis en occlusion physiquement. Mais ils présentent des inconvénients majeurs : **la perte, la casse et la dégradation**. De plus, les moulages physiques sont surtout très encombrants : pour stocker les moulages de 1000 patients, il faut un espace de stockage de 17m³ (48).

Logiquement, les **moulages numériques** ont progressivement remplacé leur analogue en plâtre. Les premiers moulages virtuels remontent à 1999 par OrthoCAD® et 2001 par emodels®. A cette période les moulages numériques étaient obtenus soit par un scan des moulages en plâtre, soit par un scan des empreintes (48).

Avec l'essor du numérique et le développement des nouvelles technologies, sont apparues des **caméras intra-orales** : les premières nécessitaient l'application d'une couche de poudre de dioxyde de titane, ce qui augmentait le temps d'enregistrement, asséchait les muqueuses et diminuait le confort du patient (49).

Avec l'évolution des caméras intra-orales, il est devenu plus simple et aisé de scanner rapidement et précisément les arcades dentaires et l'occlusion, sans avoir à prendre d'empreinte physique en alginate, ni à appliquer de couche de poudre, afin d'obtenir des moulages dématérialisés.

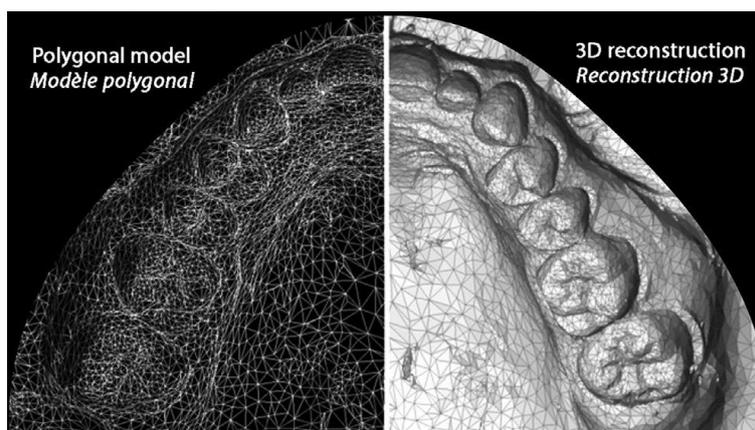
3.1.1 Principe et fonctionnement

Le principe de la prise d'empreinte numérique avec une caméra intra-orale est une **numérisation optique sans contact** des surfaces dentaires et des tissus mous adjacents par balayage d'un faisceau lumineux. En fonction des caméras, la technologie varie sensiblement. L'acquisition se fait soit par triangulation, soit par projection de franges de lumière, soit par imagerie parallèle confocale, soit par vidéo stéréophotogrammétrique.

Chaque point de la surface touchée par le faisceau de lumière est enregistré par la caméra et les coordonnées tridimensionnelles sont enregistrées. Les prises de vues sont répétées selon différents angles de vue pour couvrir toute la surface et les images de chaque prise de vue se superposent partiellement les unes aux autres afin de permettre la reconstruction précise et complète du modèle scanné.

L'ensemble des points enregistrés forme un nuage de points. Les points adjacents sont reliés pour former des facettes triangulaires continues et modélisent un modèle polygonal tridimensionnel, servant de base à la reconstruction 3D (50).

Figure 15 : Modèle polygonal (à gauche) et sa reconstruction 3D (à droite)



Source : Lecocq, « La Prise d’empreintes numériques : principes et intérêts en orthodontie », 2016.

3.1.2 Précision et validité clinique

La précision des caméras optiques les plus récentes est bien documentée et très acceptable cliniquement : l'imprécision est de l'ordre de 0,8 à 1,2 μm , ce qui est négligeable. Les modèles numériques sont **aussi précis et fiables que les modèles en plâtre** (51). L'enregistrement virtuel de l'occlusion est précis et permet de visualiser les contacts occlusaux, leur taille ainsi que leur intensité.

Les moulages numériques peuvent être utilisés pour établir les diagnostics et plans de traitement. Une revue systématique réalisée en 2010 par Fleming et al. a permis de valider l'utilisation des moulages numériques pour effectuer des mesures utiles au diagnostic : longueur d'arcade, dimension des dents, dysharmonies dents-arcade et dento-dentaire. Les moulages numériques permettent de réaliser des mesures aussi précises que les moulages en plâtre et en moins de temps, même s'il y a une **courbe d'apprentissage** conséquente (48).

Pour établir un plan de traitement, les moulages sont probablement les éléments le plus important du dossier orthodontique. Il y a **bonne concordance dans le choix des plans de traitement** avec les moulages physiques et les moulages numériques (52), et sans nécessiter plus de temps. Il a été rapporté qu'à mesure que l'orthodontiste gagne de l'expérience avec les modèles numériques, la fréquence de variation dans les diagnostics entre modèles numériques et modèles en plâtre diminue (53).

De plus, les moulages virtuels peuvent être imprimés si l'on souhaite un modèle physique comme pour les empreintes pré-chirurgicales.

3.1.3 Intégration au cabinet

Actuellement l'offre en caméras intra-orales est pléthorique, tous les grands fournisseurs en orthodontie proposent leur solution : Trios® de 3Shape, iTero® d'Align Technology, Cerec Omnicam® de Sirona, True Definition® de 3M, Medit®...

Il existe de nombreux modèles de caméras optiques et chacun présente des avantages, des inconvénients et des performances variées.

Le choix de la caméra intra-orale se fait en fonction de nombreux paramètres comme la taille des embouts, la taille et le poids de la pièce à main, l'ergonomie. Mais le côté logiciel n'est pas à négliger. La caméra intra-orale est fournie avec un logiciel interne, et s'intègre parfois dans une suite de logiciels (3Shape avec OrthoAnalyzer®, iTero® avec Invisalign...).

Figure 16 : Différents modèles de caméras intra-orales : iTero® Element 2, Medit® i700 et Trios® 4



Source : Girardie, « Les scanners 3D intra-oraux disponibles sur le marché », 2021.

La prise d'empreinte numérique change l'ergonomie de travail au sein des cabinets d'orthodontie car elle permet la création d'un **flux numérique d'information** qui va transiter au sein du cabinet et vers les laboratoires partenaires de manière totalement dématérialisée.

Ainsi, les caméras intra-orales s'intègrent très bien dans l'organisation d'un cabinet d'orthodontie. Les moulages virtuels obtenus sont archivés facilement et proprement. Ils sont **validés par la sécurité sociale et les sociétés scientifiques les acceptent** lors de la présentation de cas (50).

Cette généralisation de l’empreinte numérique s’explique par les nombreux avantages des modèles numériques. Ils sont plus **versatiles, plus durables, plus facilement stockables et archivables**. Ils sont **disponibles instantanément** après la prise d’empreinte. De plus, ces modèles dématérialisés présentent l’avantage d’être facilement **transférables**, pouvant être envoyés facilement à différents laboratoires pour la fabrication d’appareils. Ils sont devenus le **gold-standard en termes de précision** (54).

Les caméras intra-orales continuent de se développer, devenant de plus en plus performantes : plus petites et rapides à l’acquisition. Cependant, la prise d’empreintes numériques prend plus de temps au fauteuil que l’empreinte à l’alginate, mais c’est sans compter le temps de désinfection, de coulée et de prise du plâtre (49).

3.2 Les imprimantes 3D

Ces dernières années ont vu le développement des imprimantes 3D. L’impression 3D est un procédé de **fabrication par addition** : cela permet la fabrication d’objets par ajout de couches de matière successives depuis une modélisation 3D (47). Cette technique s’oppose aux techniques d’usinage, aussi appelées fabrications soustractives.

Cette technologie ouvre des perspectives en dentisterie et notamment dans le domaine de l’orthodontie. L’application de l’impression 3D en odontologie est large : impression de guide chirurgicaux implantaires, couronnes provisoires et couronnes d’usage, appareils orthodontiques, implants, protège-dents...

En orthodontie, la fabrication par addition est essentiellement utilisée pour la **création de modèles** à partir desquels sont élaborés différents appareils (aligneurs, gouttières de contention, plaque en résine...). La technologie ne permet pas encore d’imprimer directement les gouttières et aligneurs, mais il est possible **d’imprimer des gouttières de collage indirect**.

Deux principes de fabrication additive sont utilisés dans les cabinets d’orthodontie :

1) Le **dépôt de fil fondu (FDM pour *Fused Deposition Modeling*)** : technique basée sur le principe d’extrusion de matière. Le matériau est déposé couche par couche à travers une buse, et le balayage de la buse permet l’obtention de l’objet ;

2) La **photopolymérisation en cuve : SLA (*Stereolithography*) et DLP (*Digital Light Processing*)** : technique basée sur le principe de la photopolymérisation pour fabriquer un objet à partir d’une

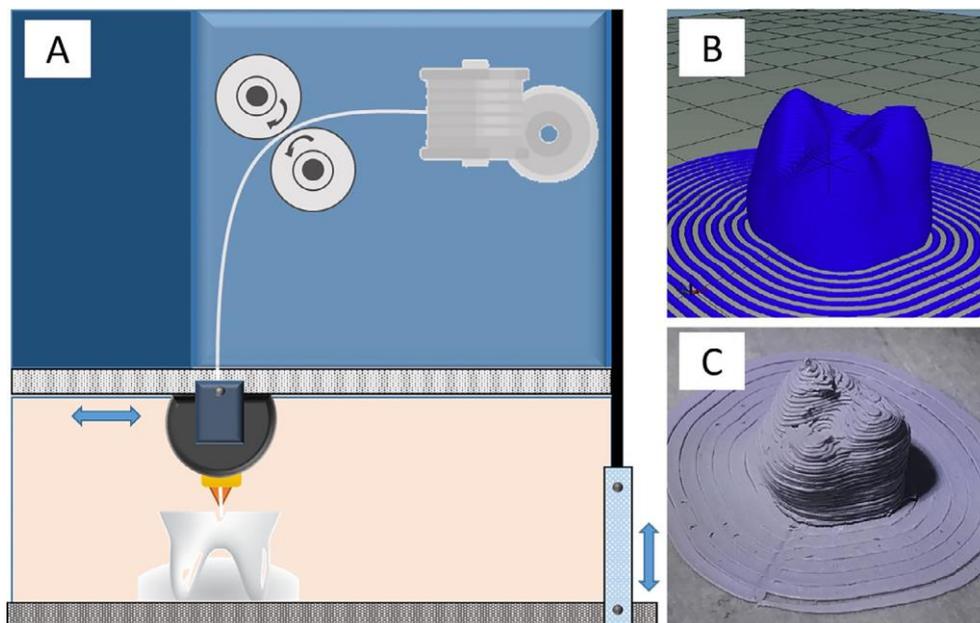
résine photosensible contenue dans une cuve. La résine est solidifiée par le balayage d'un laser UV (SLA) ou projection d'UV (DLP) couche après couche.

3.2.1 Les imprimantes à filaments et leurs applications

Les imprimantes à filaments reprennent le **principe du dépôt de fil fondu**.

Le **FDM (pour Fused Deposition Modeling)** est une technique qui consiste à déposer de la matière par couche : un filament de polymère est fondu puis extrudé et déposé à travers une buse permet de fabriquer un objet couche par couche. Cette imprimante utilise principalement des polymères thermoplastiques comme le PLA ou l'ABS. En fonction de l'imprimante, la buse ou le plateau peuvent se déplacer, ou même les deux (47).

Figure 17 : (A) Schéma d'une imprimante FDM, (B) Fichier de modélisation 3D, (C) Objet imprimé par FDM



Source : Khorsandi et al., « 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery : printing techniques, materials, and applications », 2021.

C'est une **technique fiable**, nettement moins onéreuse que la photopolymérisation en cuve, **facile d'utilisation**, et nécessite peu de maintenance.

Cette imprimante présente une résolution et précision faible, et les objets imprimés avec sont plus fragiles, et présentent un état de surface rugueux.

En orthodontie elle permet **l'impression de moulages** essentiellement, sur lesquels il est possible de thermoformer des gouttières de contention ou des aligneurs, ou réaliser des plaques en résine.

3.2.2 Les imprimantes à résine et leurs applications

Les imprimantes à résine reprennent le principe de **photopolymérisation en cuve** et regroupent la SLA et la DLP.

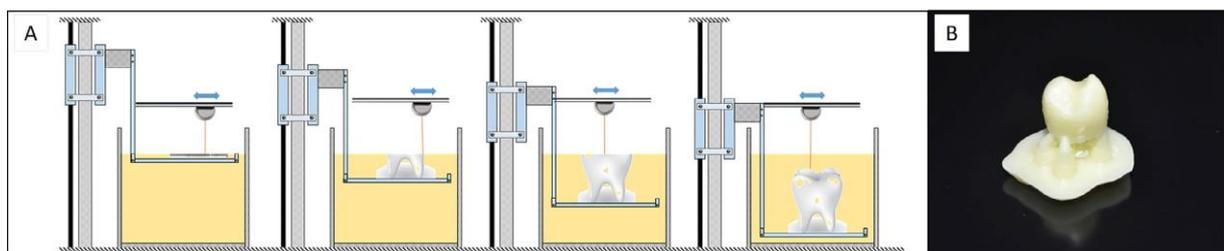
La **SLA** pour **stereolithography** est la première technique d'impression 3D commercialisée. Il s'agit d'une technique de fabrication par photopolymérisation de couches successives de matières.

Le principe du fonctionnement est simple : un fichier de modélisation 3D est transmis à la machine qui l'utilise comme patron pour la fabrication. L'imprimante comporte une plateforme immergée dans une cuve de résine photopolymérisable. La surface de cette résine est alors exposée à un laser UV induisant la polymérisation de la première couche point par point. Ensuite la plateforme se déplace de l'épaisseur d'une couche, et le laser UV expose de nouveau la résine, et ainsi de suite jusqu'à former l'objet complet (47).

La SLA permet de réaliser des impressions de **grande précision et d'une grande fiabilité** : la précision est de l'ordre de 0,05 à 0,08 mm.

Les moulages imprimés en SLA sont plus précis que les autres techniques numériques, ou même que les moulages en plâtre, et constituent une bonne alternative comme moulage d'étude ou même de travail. C'est une **technique qui est rapide, pratique et polyvalente**.

Figure 18 : (A) Schéma d'une impression par SLA (B) Objet imprimé par SLA



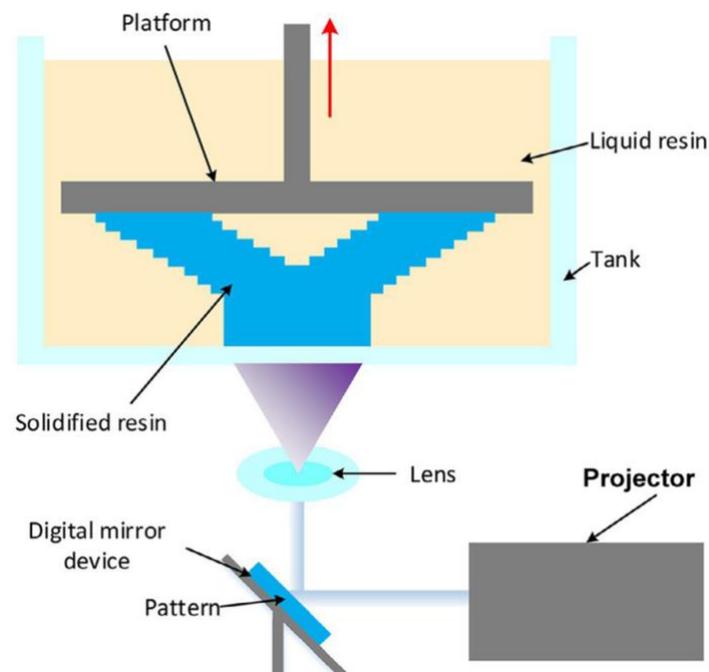
Source : Khorsandi et al., « 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery : printing techniques, materials, and applications », 2021.

La **DLP** pour **Digital Light Projection** est une technique très similaire à la SLA.

Cette technologie utilise des résines photopolymérisables qui sont solidifiées couche par couche pour former l'objet final.

A la différence de la SLA qui utilise un laser UV, permettant une polymérisation point par point ; les imprimantes DLP utilisent un projecteur UV. La lumière UV du projecteur est réfléchiée sur une matrice de micro-miroirs (DMD). C'est cette matrice qui détermine la configuration de chaque couche. Le projecteur UV de l'imprimante DLP est immobile et permet une polymérisation couche par couche. Ainsi, la DLP présente l'avantage de la **vitesse d'impression qui est supérieure** à la SLA. Mais la SLA permet des impressions plus précises et de meilleure qualité (47).

Figure 19 : Schéma d'une imprimante DLP



Source : Khorsandi et al., « 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery : printing techniques, materials, and applications », 2021.

Le matériau d'impression le plus couramment employé est le **polyméthacrylate de méthyl (PMMA)**. Le PMMA est le matériau le plus favorable car il est facile à manipuler, peu coûteux, et stable dans la cavité orale. Il est admis qu'il est **biocompatible** (47).

Néanmoins, les objets imprimés en résine peuvent présenter une cytotoxicité du fait des monomères résiduels non polymérisés.

Après impression 3D avec une imprimante à résine, il est nécessaire de réaliser un **post-traitement**. Il y a d'abord un nettoyage dans un **bain d'alcool isopropylique** à 99,9 % pendant une durée définie par le fabricant afin d'éliminer les résidus de résine non polymérisés de sa surface. Puis l'objet est post-polymérisé au sein d'une **chambre à UV** ou **LCU** (pour *Light Curing Unit*) car le processus de

polymérisation n'est pas terminée à la sortie de l'imprimante. La durée de post-polymérisation varie selon le fabricant, selon le type de résine et le type d'équipement utilisé.

Ces imprimantes sont très polyvalentes et présentent une gamme d'utilisation étendue.

Elles peuvent être utilisées pour **imprimer des moulages**, sur lesquels les gouttières ou aligneurs peuvent être thermoformés, et les appareils orthodontiques peuvent être réalisés.

Il est possible avec ces imprimantes d'**imprimer directement des gouttières de transfert** d'attaches.

3.3 Perception du numérique par le patient

Le numérique génère une bonne image auprès des patients.

En général, les patients trouvent les empreintes numériques plus confortables et moins douloureuses que les empreintes conventionnelles à l'alginat.

Les patients qui ont bénéficié d'empreintes numériques ont tendance à préférer aller chez un orthodontiste utilisant des caméras intra-orales plutôt que chez un orthodontiste réalisant encore des empreintes physiques.

Les patients ayant participé à l'étude estiment qu'il est important qu'un cabinet dentaire soit équipé des technologies les plus récentes (49).

4 : Apport du numérique dans le collage direct des attaches orthodontiques

Le numérique a ouvert de nouvelles perspectives dans le positionnement des attaches orthodontiques. Certains auteurs et certaines sociétés ont cherché à améliorer la technique de collage direct en développant des auxiliaires.

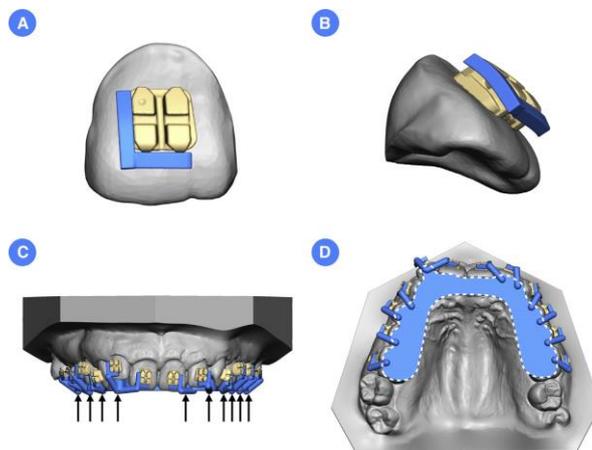
4.1 Guide de collage généré par ordinateur

Xue propose de réaliser des **guides pour le collage direct** (35).

Cet auxiliaire permet de positionner précisément les attaches dans tous les plans de l'espace. Il est conçu en 3 parties :

- Un guide en forme de L, qui vient orienter la partie occlusale et la partie distale de l'attache ;
- Une gouttière rigide qui couvre partiellement ou totalement la face occlusale des dents ;
- Des tiges connectant les 2 parties.

Figure 20 : Conception du guide de collage direct



Source : Xue et al., « Accurate bracket placement using a computer-aided design and computer-aided manufacturing-guided bonding device : an in vivo study », 2019.

Le guide, de par sa conception, permet un contrôle visuel de l'insertion. De plus, il est rigide, et ne peut pas être « excessivement » inséré. Une fois inséré, chaque attache est collée une à une.

De plus, cette conception permet aussi de s'assurer de ne rien décoller au moment de la désinsertion car il n'y a pas de rétention au niveau de l'attache.

Le collage direct guidé présente des avantages par rapport au collage direct : la **position est trouvée instantanément**, ce qui permet de réduire le temps au fauteuil et limite les risques de contamination des sites. Cette position a été déterminée numériquement, et est reproduite avec une grande précision. C'est une procédure simple qui ne nécessite pas d'expérience : il n'y a pas de courbe d'apprentissage.

De plus, comme pour la technique conventionnelle, les attaches sont mieux appliquées, l'épaisseur de colle est plus faible et l'élimination des excès est plus aisée.

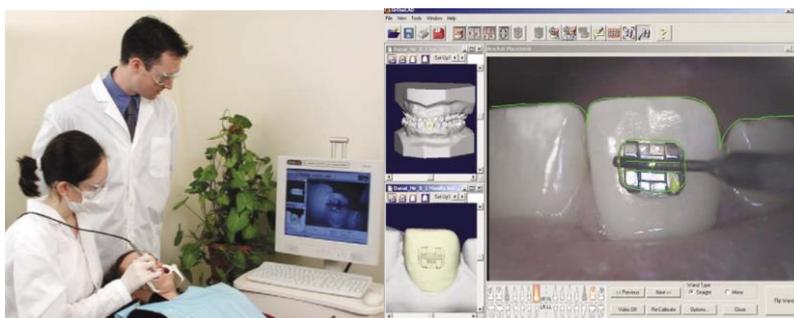
Néanmoins, le collage direct guidé présente des **limites** : un temps de laboratoire est requis, et le temps passé au fauteuil est plus important qu'en collage indirect. L'accès visuel au niveau des dents postérieures demeure limité, et nécessite l'utilisation de miroirs de bouche.

4.2 Collage direct assisté par ordinateur

En 2004, OrthoCAD a développé un outil qui s'intitule OrthoCAD iQ® (55). C'est un système qui permet de positionner les attaches virtuellement puis de transférer la position de ces attaches en bouche :

- En fonction du plan de traitement, un set-up virtuel est généré avec un alignement idéal. C'est à partir de ce set-up que la position idéale des attaches est déterminée ;
- Ensuite, à l'aide d'un manche de la taille d'un stylo, contenant une caméra miniature et 8 LEDs, la dent est filmée et s'affiche à l'écran. La position idéale de l'attache y est également affichée et l'orthodontiste positionne alors l'attache à l'endroit indiqué.

Figure 21 : Position idéale de l'attache affichée à l'écran en temps réel avec OrthoCAD iQ®



Source : Redmond et al., « The OrthoCAD bracket placement solution », 2004.

OrthoCAD iQ® propose aussi une version indirecte : les attaches sont positionnées sur un modèle en plâtre à l'aide de la même caméra, puis une gouttière de transfert est confectionnée. Ainsi, OrthoCAD a proposé une des premières versions de collage indirect numérique, même si elle présentait des limites.

5 : Collage indirect numérique

Le collage indirect a bénéficié du développement des nouvelles technologies, notamment des caméras intra-orales et des imprimantes 3D. Cette numérisation du collage indirect est rendue accessible par la pluralité des options.

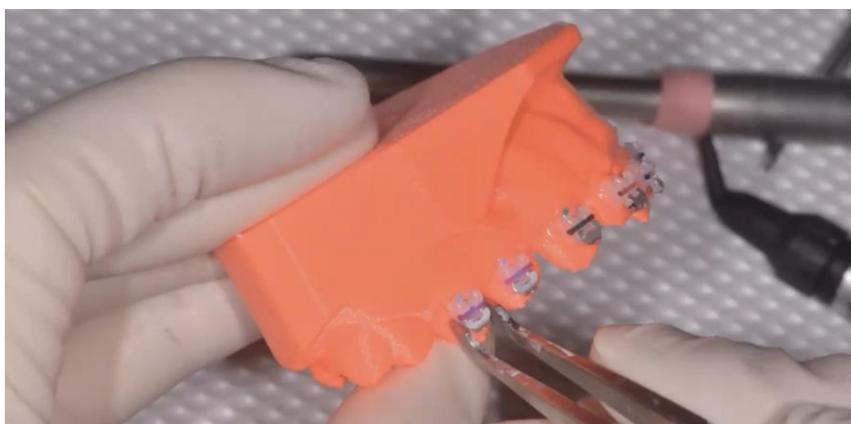
5.1 Différentes techniques de collage indirect numérique « *in-office* »

Hitmi a proposé 3 méthodes de collage indirect en fonction de l'équipement à disposition et de l'organisation possible au sein du cabinet (56).

5.1.1 Méthode 1 : Positionnement des attaches sur un modèle numérique imprimé

La première méthode consiste en l'impression du modèle numérique, puis au positionnement des attaches sur le modèle physique.

Figure 22 : Positionnement des attaches sur un modèle imprimé par dépôt de fil fondu



Source : Hitmi, « Les différents protocoles de collage indirect numériques », 2021.

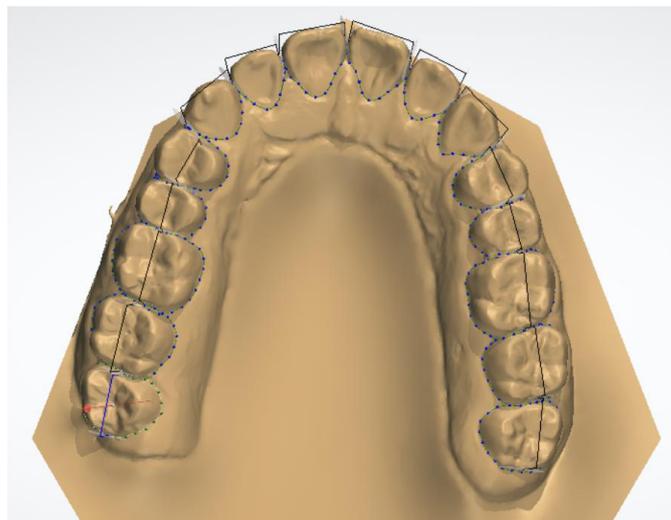
Avec cette méthode, il est nécessaire d'employer une imprimante à filament. Il faut être vigilant quant au choix du matériau utilisé pour l'impression, car le modèle doit pouvoir supporter des températures élevées si un thermoformage de la gouttière de transfert est prévu.

Cette technique est très semblable au collage indirect conventionnel, et présente les mêmes avantages et les mêmes inconvénients.

5.1.2 Méthode 2 : Positionnement numérique des attaches et impression du maître-modèle

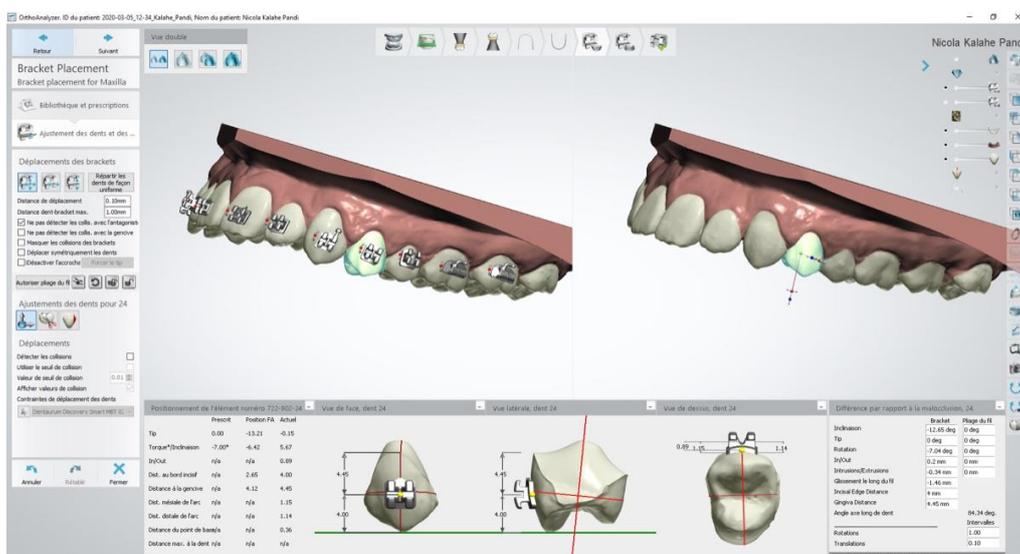
La deuxième méthode correspond au positionnement virtuel des attaches sur les modèles numériques. Après l'enregistrement des arcades par la caméra intra-orale, le modèle numérique est généré. Sur ce dernier, les dents sont segmentées et la position idéale de collage est déterminée par le logiciel (point FA). Les attaches sont automatiquement positionnées sur ce point et peuvent être déplacées par le praticien.

Figure 23 : Segmentation des dents semi-automatique sur OrthoAnalyzer®



Source : Auteur, 2020.

Figure 24 : Positionnement virtuel des attaches sur OrthoAnalyzer® : malocclusion initiale à gauche, set-up à droite



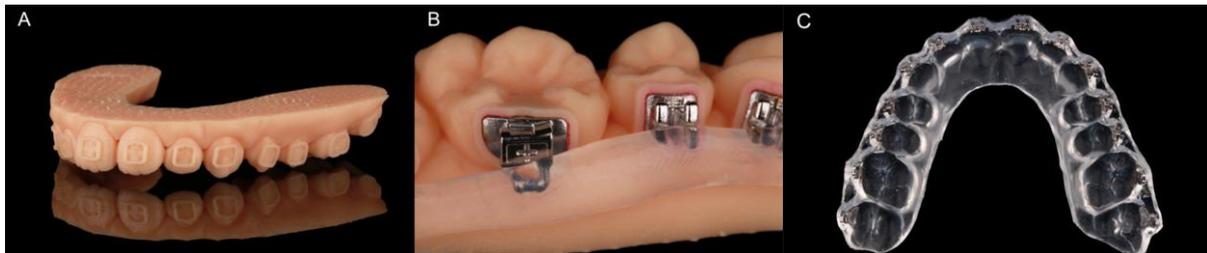
Source : Auteur, 2020.

Une fois la position de toutes les attaches validée, le **maître-modèle** est généré et imprimé : il comporte soit le gabarit des boîtiers (cf. Figure 36), soit des marqueurs de position (cf. Figure 25)(57). Si le maître-modèle comporte des marqueurs, alors il faut positionner les attaches sur le modèle avant de réaliser la gouttière de transfert. Sa confection se fait de la même façon que pour le collage indirect conventionnel. Il faudra alors employer une imprimante à filament.

Si le maître-modèle comporte des gabarits, alors il est possible d'employer une imprimante à filament ou à résine pour cette méthode.

Elle permet de bénéficier de la rapidité et de la précision de positionnement des attaches conférées par le numérique. Cependant, le temps d'impression des maître-modèles est important, et le temps de travail en laboratoire reste conséquent.

Figure 25 : (A) Maître-modèle imprimé comportant des marqueurs de position, (B) Attaches positionnées à l'aide des marqueurs, (C) Gouttière de transfert thermoformée



Source : Süpple et al., « Accurate bracket placement with an indirect bonding method using digitally designed transfer models printed in different orientations—An in vitro study », 2021.

5.1.3 Méthode 3 : Positionnement numérique des attaches et impression des gouttières de transfert

La méthode 3 permet d'exploiter le plein potentiel du collage indirect numérique, mais requiert d'avoir une imprimante à résine présentant une bonne résolution, une précision suffisante, et compatible avec une résine adaptée.

Comme pour la méthode 2, les dents sont segmentées sur le modèle numérique et la position idéale des attaches est déterminée par le logiciel. Les attaches sont mises en place sur le modèle virtuel, et leur position ajustée puis validée par le praticien.

La réalisation de la gouttière de transfert diffère : elle est conçue puis imprimée en 3D.

Figure 26 : Gouttières de transfert imprimées avec attaches insérées



Source : Auteur, 2021.

En fonction des logiciels, la segmentation des dents pour la détermination de la position idéale de collage est manuelle ou automatisée.

La bibliothèque des attaches orthodontiques qui peuvent être utilisées est très fournie : le praticien peut choisir celles qu'il préfère pour chaque dent, conventionnelles ou autoligaturantes.

Différents logiciels permettent à l'orthodontiste de positionner lui-même les attaches, de les ajuster et de générer les gouttières de transfert : OrthoAnalyzer®, CADental®, Mimics®, OnyxCeph®...

Ces solutions offrent la possibilité d'**internaliser et de gérer toute la chaîne de préparation**, de la conception à l'impression des gouttières.

Le collage indirect numérique permet un positionnement rapide des attaches car une partie est automatisée : celui-ci prend **6 fois moins de temps** sur des moulages virtuels comparé à la technique conventionnelle (58).

Le positionnement est aussi **plus précis** grâce à la qualité des mesures. La précision est supérieure à ce qu'on peut obtenir à l'œil ou à l'aide de jauges : elle est de l'ordre de 0,1 mm.

Certains logiciels proposent de positionner les attaches sur la malocclusion, d'autres permettent en plus une prévisualisation de la situation finale avec un **set-up numérique**.

En plus de la rapidité et de la précision, la numérisation du collage indirect permet une **ergonomie améliorée**. Il est possible de manipuler les moulages virtuels dans les 3 sens de l'espace, d'agrandir l'image à souhait, de déplacer les attaches, de mesurer leur position et de comparer avec l'attache sur la dent controlatérale. Le tout sans avoir le risque de faire bouger les attaches à la manipulation.

5.2 Apport du numérique dans le collage indirect

5.2.1 Les mêmes avantages que le collage indirect conventionnel

Le collage indirect numérique partage bon nombre d'avantages avec le collage indirect conventionnel :

- **confort du patient,**
- facilité d'apporter des **sur-corrections,**
- **reproductibilité** du collage,
- choix du **système de collage,**
- **réduction du temps nécessaire au fauteuil.**

La numérisation présente des atouts : l'optimisation du positionnement des attaches et la réduction du nombre d'étapes au laboratoire. Toutes les étapes peuvent être réalisées au cabinet, et l'orthodontiste garde alors le contrôle sur toutes les étapes de la conception : du positionnement à la confection des gouttières de transfert, tout en déléguant la plupart des étapes (de la segmentation à l'impression des gouttières). De plus, chaque étape peut être sauvegardée.

5.2.2 Utilisation de l'imagerie 3D pour le parallélisme des racines

L'objectif du traitement orthodontique est de corriger la position des dents dans les trois dimensions de l'espace afin de remplir des objectifs céphalométriques et occlusaux. Parmi les critères de positionnement des dents, il y a l'**angulation mésio-distale des dents** : le tip (59).

En effet, la bonne position des racines est un impératif pour obtenir une bonne **fonction occlusale** avec une distribution répartie des forces occlusales. Le parallélisme des racines permet le maintien d'une bonne **santé parodontale** et facilite la mise en œuvre des traitements parodontaux et la réalisation des restaurations. En plus de compliquer certains soins, la proximité radiculaire peut être à l'origine **d'embrasures gingivales inesthétiques** (60).

La position de la racine ne peut pas être précisément déterminée avec les informations dont on dispose cliniquement, c'est à dire la forme et l'orientation de la couronne, du fait de la variabilité de la forme coronaire et de l'angulation couronne-racine. C'est pour cette raison que les **radiographies panoramiques** sont actuellement utilisées pour déterminer la position des racines et déterminer leur parallélisme (61).

Cependant, la radiographie panoramique génère une **représentation bidimensionnelle déformée d'un objet tridimensionnel** et il a été démontré que ces radiographies sont imprécises pour évaluer les axes radiculaires. C'est une technique très sensible à la position de la tête lors de l'acquisition du

cliché et les structures anatomiques se superposent. On ne peut alors **qu'estimer la position de la racine** (54).

Par exemple, des dents adjacentes qui présentent une différence d'inclinaison des racines dans les sens vestibulo-lingual (torque) entraîne une fausse perception de non-parallélisme des racines dans le sens mésio-distal (tip) sur un cliché panoramique. Ainsi, sur un cliché, en antérieur au maxillaire, les racines sont plus orientées en mésial, tandis qu'en postérieur les racines sont plus orientées en distal. La déformation la plus importante se situe entre la canine et la première prémolaire avec en moyenne 10° de différence. A la mandibule, en postérieur, les racines sont plus orientées en mésial (59).

Par ailleurs, l'*American Board of Orthodontics* (ABO) reconnaît que les radiographies panoramiques ne sont pas idéales pour évaluer la position des racines et ne tient pas compte de l'axe des racines adjacentes aux canines dans sa notation (62).

L'usage du **Cone-Beam Computed Tomography (CBCT)** est courant en dentisterie et la planification des traitements à l'aide de la 3D se développe rapidement et devient un outil important en chirurgie orale, maxillo-faciale, en implantologie et trouve aussi une utilisation en orthodontie.

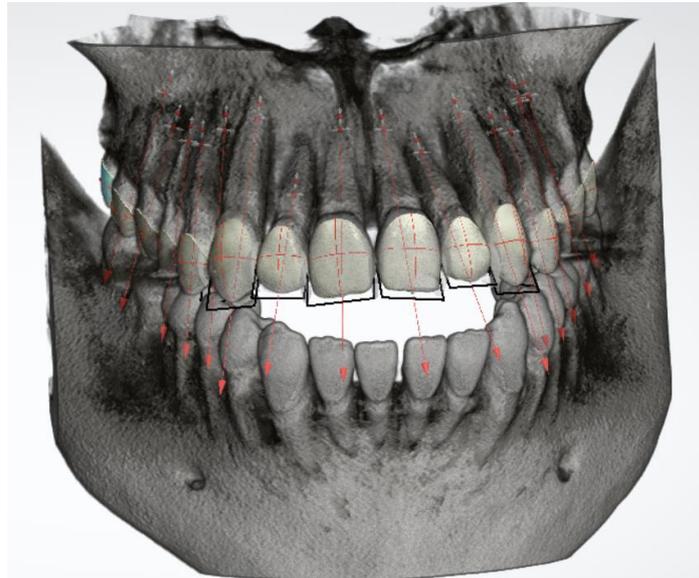
Dans un certain nombre de cas, le CBCT présente un intérêt majeur tant diagnostique que thérapeutique car il permet de produire des images précises des tissus mous et des tissus durs des patients. Contrairement aux radiographies panoramiques, les **CBCT sont précis dans les 3 dimensions** et montrent les structures à l'échelle 1:1 (60). Néanmoins, les CBCT ne sont pas totalement exempts de déformations, notamment au niveau de la denture en raison des restaurations métalliques, appareils orthodontiques ou même de la forte densité de l'émail.

Le collage indirect numérique permet d'exploiter le potentiel de cette imagerie. Il est possible de **coupler un CBCT au moulage numérique**, permettant de visualiser les racines et les couloirs osseux. Cela permet d'augmenter la **prédictibilité de nos traitements** et la **précision du positionnement** des attaches (63).

Cet avantage a été évalué par une étude rétrospective turque (54) : elle a montré qu'il y avait une différence significative dans l'angulation des attaches dans le collage indirect numérique entre l'usage d'une panoramique et d'un CBCT : il y a en moyenne 3,57° de différence, ce qui est **au-delà des 2,5° cliniquement acceptables**.

La dent qui présente la plus grande erreur d'angulation est la canine maxillaire : en moyenne 5,56°. Toutes les autres dents présentent une erreur supérieure à 2,5°, ce qui est cliniquement significatif et ce qui peut causer des irrégularités d'alignement et surtout de nivellement des crêtes marginales.

Figure 27 : Visualisation de l'axe des racines grâce au couplage de moulages numériques avec un CBCT



Source : Auteur, 2020.

Il est indispensable que la fusion du CBCT avec l'empreinte numérique soit fiable et précise pour qu'on puisse en tirer une utilisation clinique. Sur OrthoAnalyzer®, il faut déterminer 2 séries de marqueurs dentaires correspondants (incisives, molaires droite et gauche) pour fusionner le CBCT avec le moulage numérique. Il est recommandé de réaliser un contrôle visuel pour s'assurer que la fusion a été faite correctement.

Avec IPS CaseDesigner®, la fusion du CBCT et de l'empreinte numérique se fait automatiquement. Avec le développement de l'intelligence artificielle, la fusion devrait pouvoir être automatisée avec davantage de précision (64).

À tout moment du traitement, il serait même possible de déterminer précisément la position des racines en réalisant une empreinte numérique mais à la condition d'avoir une imagerie 3D initiale. Cela permet de **contrôler de l'axe des racines**, sans avoir à irradier le patient de nouveau (65).

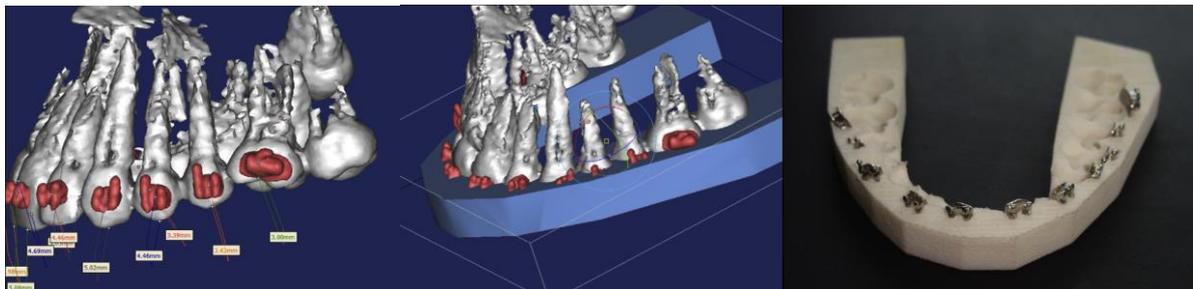
Bien que les CBCT deviennent de moins en moins irradiants grâce aux évolutions technologiques, il demeure indispensable de suivre la règle **ALARA « as low as reasonably achievable »**. Chez les enfants surtout, il faut déterminer la balance entre le bénéfice et le risque (60).

Le dossier orthodontique se compose de photographies endo et exo buccales, de moulages, d'une radiographie panoramique et d'une téléradiographie de profil. Le CBCT n'en fait pas partie.

Son usage est très encadré et il **ne peut être réalisé en première intention**. Il ne devrait donc pas être réalisé uniquement pour le collage indirect numérique.

Il est possible de réaliser le **collage indirect numérique uniquement à partir de l'imagerie 3D**, même s'il apparaît que la combinaison du modèle numérique et du CBCT offre de meilleurs résultats. C'est ce qu'un auteur a réalisé en n'utilisant qu'une imagerie 3D du patient, qui est en format .dico qui il a converti en fichier .stl. Le CBCT du patient est traité pour ne garder que les dents et leurs racines, permettant de bien identifier le grand axe de la dent. Il est possible de visualiser les couronnes et les racines de chaque dent, et d'obtenir des mesures précises. Ainsi, chaque attache est positionnée avec précision sur chaque dent (14).

Figure 28 : Positionnement des attaches et réalisation de la gouttière de transfert à partir d'une imagerie 3D



Source : El-Timamy et al., « Three-dimensional imaging for indirect-direct bonding », 2016.

5.2.3 Positionnement numérique des attaches : personnalisation, set-up et reproductibilité

Le numérique permet de réaliser des traitements de plus en plus individualisés : il permet d'adapter les prescriptions en fonction des caractéristiques morphologiques des dents, de la malposition initiale et des mécaniques utilisées.

5.2.3.1 Personnalisation du collage

Lors du positionnement des attaches sur le modèle virtuel, l'attache est positionnée automatiquement sur le point FA : c'est-à-dire au centre de la couronne clinique. Mais il est possible pour le praticien de **personnaliser le programme et de configurer différentes hauteurs de collage** selon ses préférences. En effet, l'un des avantages du numérique, c'est de pouvoir adapter les hauteurs de collage pour chaque patient en fonction des besoins individuels (faible hauteur coronaire, béance, supraclusion). Cela peut être réalisé dans les techniques de collage conventionnelles, mais toujours avec une certaine imprécision.

5.2.3.2 Précision supérieure du positionnement des attaches

Une étude brésilienne de 2019 a cherché à comparer le positionnement des attaches en collage direct au positionnement effectué virtuellement sans set-up, et avant le transfert clinique. La référence prise était un positionnement numérique réalisé avec set-up.

Cette étude a montré que pour un même opérateur, le **positionnement numérique des attaches permettait une précision supérieure au collage direct dans les 3 dimensions** : verticale, horizontale et l'angulation mésio-distale.

Le collage direct montrant une imprécision moyenne de 0,58 mm dans les sens vertical, de 0,33 mm dans la dimension horizontale et de 3,18° dans l'angulation, tandis que le positionnement numérique montre une imprécision de 0,49 mm dans le sens vertical, de 0,24 mm dans le sens horizontal et de 2,89° dans l'angulation.

Ainsi, le positionnement numérique des attaches est significativement plus précis que le collage direct dans les dimensions verticale et horizontale. Dans le sens vertical le collage indirect numérique est même deux fois plus précis que le collage direct : le positionnement est correct dans 64,7 % des cas contre 27,1 %.

5.2.3.2 Apport du set-up virtuel dans la précision du positionnement des attaches

Certains logiciels offrent la possibilité d'avoir une **prévisualisation du rendu final**, d'avoir un traitement virtuel en quelques sortes : c'est le **set-up virtuel** (cf. Figure 23). En plus d'apporter une précision supplémentaire, il s'agit d'un **outil de communication** puissant avec le patient, car il offre la possibilité de montrer au patient le projet virtuel. Cela peut permettre de le motiver (39).

Cela permet de **visualiser l'alignement et le nivellement des dents** en fonction des attaches choisies, des informations qu'elles comportent, de leur position et de l'arc en place. Certains logiciels permettent de voir le torque effectif en fonction de la section du fil utilisé.

La position virtuelle des attaches peut alors être ajustée afin d'atteindre les objectifs de traitement. Il est aisé de faire les modifications nécessaires pour parfaire l'alignement.

Cela peut s'avérer d'une grande aide pour certains choix esthétiques difficiles comme le choix entre l'alignement des bords libres ou des collets, permet d'**anticiper des finitions et apporter des sur-corrections**. Cela permet d'avoir des **mouvements dentaires plus prédictibles**. Tout cela permet ainsi de minimiser les besoins de repositionnement des attaches et de réaliser des plis.

La performance d'un système orthodontique assisté par ordinateur pour reproduire la position des dents telle que prescrite sur le plan de traitement virtuel dépend du type de dent et du type de mouvement.

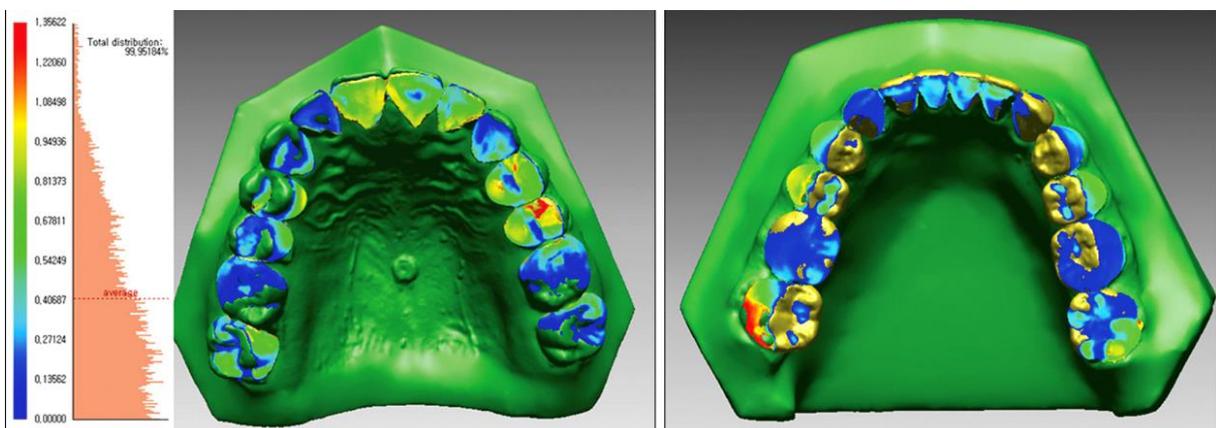
Le set-up virtuel permet de déplacer les dents dans toutes les dimensions de l'espace mais ne prend pas en compte les **effets indésirables des mécaniques**, et les nombreux facteurs qui interviennent dans les mouvements orthodontiques : la densité de l'os, l'anatomie radiculaire, les forces occlusales sont autant de facteurs qui peuvent expliquer que la dent ne se déplace pas exactement comme prévu (10).

Sur le set-up virtuel, le nivellement des arcades est aisément obtenu, mais cliniquement le nivellement de la courbe de Spee peut être plus difficile à obtenir, ce qui explique les variations dans le sens vertical. De la même façon, on a généralement une arcade plus étroite que celle prescrite, mais aussi légèrement plus longue. Cela s'explique par le fait que l'expansion transversale prescrite ne s'exprime pas entièrement, et qu'on a un peu plus d'expansion antérieure. Cette expansion postérieure pourrait s'exprimer davantage en version plutôt qu'en translation (10).

De plus, les arcs orthodontiques sont moins efficaces en cantilever, c'est à dire qu'ils s'expriment moins bien sur les dents terminales, et donc sur les deuxièmes molaires. Cela explique pourquoi la position de ces dents s'éloigne le plus du set-up prévisionnel (66).

Au final, pour les cas sans extraction (et donc sans mécanique de fermeture d'espace), sans utilisation de chaînettes ou d'élastiques inter-arcade, **l'alignement et le nivellement obtenus à la fin du traitement sont très fidèles au set-up initial** (67)(68).

Figure 29 : Superposition du set-up initial avec les modèles de fin de traitement



Source : Son et al., « New virtual orthodontic treatment system for indirect bonding using the stereolithographic technique », 2011.

Le set-up virtuel ne dispense pas de poser un diagnostic correct, d'établir un bon plan de traitement, de mettre en œuvre des mécaniques adéquates et d'anticiper les effets indésirables.

Un des arguments en faveur du collage indirect numérique, est qu'en termes de **précision et de reproductibilité, l'ordinateur surpasse l'homme**. Cela répond à l'un des écueils du collage direct : la faible reproductibilité.

5.2.4 Personnalisation de la forme d'arcade

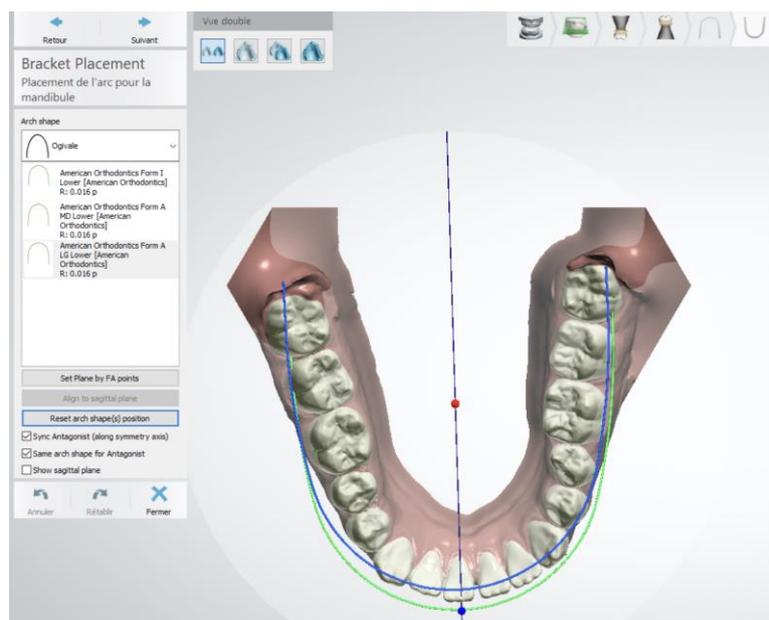
Lors du positionnement numérique des attaches, il est requis de choisir une forme d'arc pour le patient car c'est à partir de cette forme que le set-up est réalisé : il est important de choisir la forme d'arc la plus adaptée au patient.

La forme d'arcade varie d'un patient à l'autre. Le principe de base en orthodontie est que **la forme d'arcade initiale du patient doit être conservée**. Car c'est dans cette position que les dents présentent un maximum de stabilité. Il est enseigné que les dimensions et la forme de l'arcade est corrélée aux dimensions et à la forme de la face (1).

Des études sur la stabilité à long terme montrent que les changements post-traitement sont plus importants quand la forme d'arcade est modifiée que lorsqu'elle est maintenue.

Dans le choix de la forme d'arcade, l'arcade mandibulaire doit servir de référence (1).

Figure 30 : Choix de la forme d'arcade sur OrthoAnalyzer®



Source : Auteur, 2020.

En collage numérique, le choix de la forme d'arcade se fait à partir de la bibliothèque d'arcs disponibles qui est très bien fournie. Sinon il est possible d'y ajouter des formes personnalisées, en fonction de l'assortiment d'arcs disponible au sein du cabinet.

Enfin, il est possible d'imprimer la forme d'arcade choisie, sous forme de charte, afin de façonner l'arc aux mêmes forme et dimensions.

5.2.5 Guides de transfert des attaches

Il existe différentes conceptions de jigs et de gouttières de transfert.

5.2.5.1 Gouttières de transfert

Les gouttières de transfert permettent de coller toute une arcade dans un même temps, ou en plusieurs fois en coupant la gouttière : cela permet une flexibilité pour le praticien.

Afin de réaliser les gouttières de transfert, il faut d'abord réaliser un maître-modèle après validation de la position des attaches : il s'agit de la fusion du modèle de l'arcade du patient avec les attaches en bonne position. Le logiciel permet de diminuer ou d'éliminer les contre-dépouilles sous les crochets et ailettes.

Il est possible d'imprimer le maître-modèle, et ensuite de fabriquer une gouttière de transfert comme en **technique conventionnelle** (Méthode 2) :

- à partir de silicone VPS (type Memosil®) avec une gouttière dure thermoformée par-dessus ;
- ou une gouttière souple thermoformée et par-dessus une gouttière rigide.

Cette technique présente moins d'intérêt :

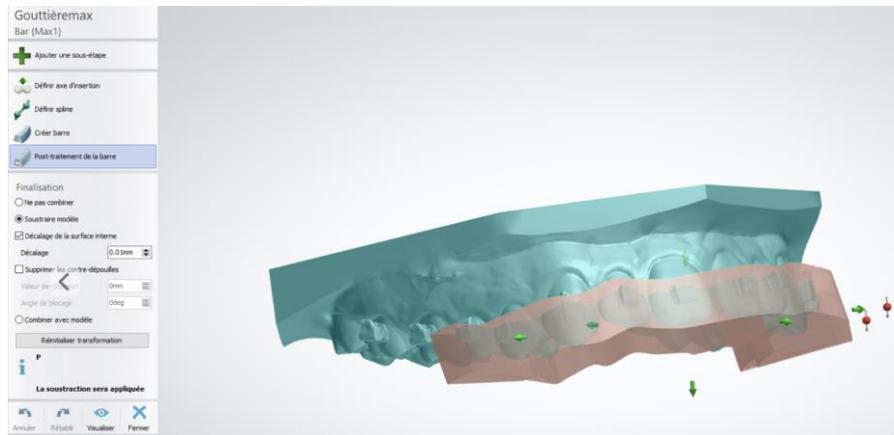
- elle prend plus de temps : temps de travail sur l'ordinateur et temps de laboratoire (temps d'impression d'un moulage et de confection des gouttières) ;
- la multiplication des étapes est sans doute facteur d'imprécision ;
- elle engendre plus de déchets et des coûts supplémentaires.

Les gouttières de transfert peuvent être **directement imprimées en 3D**.

Sur la suite OrthoAnalyzer®, la gouttière de transfert est conçue à partir de l'extension Appliance Designer. La conception de la gouttière joue un rôle important dans la précision du collage : la rigidité du matériau permet un bon maintien des attaches, mais cela implique de ne pas avoir de retour de résine en gingival pour réduire le risque de fissurer la gouttière à l'insertion des attaches et de décoller

lors de la désinsertion (38). Il faut également prendre en compte une interférence éventuelle avec les tissus mous pouvant gêner l'insertion.

Figure 31 : Conception de la gouttière de transfert sur Appliance Designer (OrthoAnalyzer®)



Source : Auteur, 2020.

Les gouttières doivent reproduire exactement les dimensions des attaches car il est impératif d'avoir suffisamment de rétention pour assurer leur stabilité, et en même temps les gouttières doivent pouvoir être retirées aisément, pour ne pas risquer de décoller au moment de la désinsertion.

Une fois les gouttières imprimées, les attaches sont insérées dans les logements prévus (cf. Figure 25).

L'impression en 3D des gouttières de transfert présente de nombreux avantages :

- Les **bases des attaches sont vierges** et n'ont pas été contaminées par de la résine ou du plâtre, contrairement à la technique conventionnelle. Cela va dans le sens de limiter le risque de décollement (39) ;
- Le **maître-modèle n'a pas à être imprimé**, ce qui représente un gain de temps considérable et une réduction des coûts et des déchets (35) ;
- Tout le processus est numérique jusqu'à l'impression, ce qui réduit considérablement le temps de laboratoire ;
- L'impression n'est pas soumise au facteur humain, ce qui **limite le risque d'erreur** (63) ;
- C'est un processus qui peut être **complètement internalisé** au sein du cabinet, avec relativement peu d'équipement : logiciel, imprimante 3D (avec bac à ultrasons et chambre à UV) (51).

Le temps total nécessaire à la production des gouttières de transfert imprimées est significativement plus élevé qu'en technique conventionnelle du fait du temps d'impression. Cependant, le temps de **travail actif** pour la conception des gouttières est **2 fois plus court en technique numérique** (58).

La précision du transfert des attaches par des gouttières imprimées est déterminée par la précision de l'impression, le matériau d'impression, le design de la gouttière et par les compétences de l'orthodontiste. La précision des empreintes numériques peut constituer un autre facteur d'imprécision : elle est de l'ordre de 0,8 à 1,2 μm , ce qui est négligeable (38). Cette imprécision peut aussi survenir au moment de la transformation du fichier (63).

5.2.5.2 Jigs de transfert

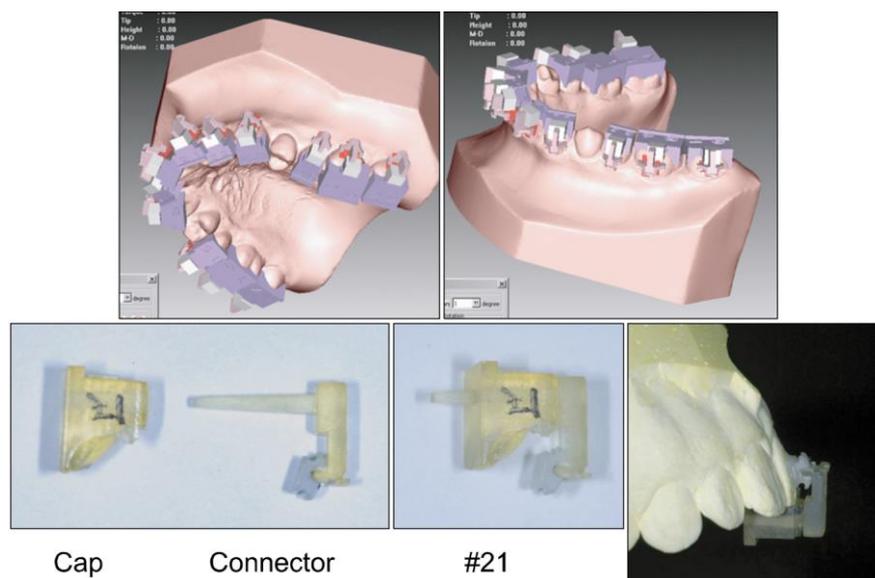
Les jigs sont imprimés dans **une résine rigide**, et ne peuvent être déformés lors de l'insertion et du maintien lors de la polymérisation. Il peut s'agir de jigs unitaires, ou de jigs permettant de coller plusieurs dents en même temps.

En revanche, il n'y a alors aucune tolérance pour les imprécisions d'impression. De plus, cette rigidité peut être à l'origine d'erreurs de positionnement lorsque les cuspides ne sont pas usées, car les jigs pourraient avoir plus de mal à reproduire les contours et s'adapter aux cuspides marquées. Cela se traduit par une insertion partielle, entraînant des erreurs de positionnement dans le sens vertical (69).

C'est pourquoi il n'est possible de coller que peu d'attaches en même temps, ce qui restreint un des intérêts du collage indirect, qui est de réduire le temps nécessaire au fauteuil.

De plus, il ne semble pas avoir de différence en termes de précision entre les gouttières imprimées prenant toute l'arcade et les gouttières de collage unitaires imprimées (63).

Figure 32 : Conception de jigs unitaires sur 3Txer® (Orapix)



Source : Son et al., « New virtual orthodontic treatment system for indirect bonding using the stereolithographic technique », 2011.

5.2.5.3 Précision dans le transfert des attaches

Si le numérique permet un positionnement des attaches très précis, rapide et personnalisé, il faut que le transfert de ces attaches soit fiable. Ainsi, la précision du collage indirect numérique dépend largement de la précision du transfert des attaches. Certains facteurs comme la dureté de la gouttière ou l'encombrement entrent alors en jeu.

Une revue systématique réalisée en 2022 suggère que le collage indirect permet de transférer en bouche les attaches à la position planifiée avec une **grande précision**.

Pour les gouttières imprimées l'imprécision sur les **valeurs linéaires mésio-distale, vestibulo-linguale, verticale** a été en moyenne de **0,06 mm, 0,10 mm et 0,12 mm** respectivement et l'imprécision sur les **valeurs angulaires d'angulation, rotation et de torque** était respectivement de **1,14°, 0,90° et 1,42°** (37). Les imprécisions de cet ordre ne sont pas significatifs cliniquement (8)(10).

Comme pour les gouttières en silicone, les imprécisions du collage indirect numérique peuvent s'expliquer par : un mauvais ajustement de la gouttière de transfert ou une insertion partielle de la gouttière qui expliquerait un positionnement des attaches trop occlusal.

De même, la plupart des gouttières sont imprimées avec une résine flexible. Cela requiert une pression digitale, et il demeure difficile de savoir si la gouttière est parfaitement insérée ou au contraire trop fortement appliquée.

Aussi, les gouttières sont conçues pour englober en partie ou totalement les attaches, ce qui rend difficile le contrôle de leur position et empêche l'élimination des excès de colle (35).

Enfin, un mauvais ajustement des logements des attaches peut aussi être à l'origine d'imprécisions (39).

Le moins bon contrôle de la position des attaches dans les dimensions angulaires (torque et rotation) peut être dû à l'**épaisseur de colle** qui n'est pas répartie de façon homogène entre la base et la surface dentaire (38).

Au total, les gouttières imprimées en 3D sont plus précises que les doubles gouttières thermoformées et **aussi précises que les gouttières en silicone** qui étaient la référence en termes de précision.

Les gouttières imprimées doivent leur qualités grâce à la précision des imprimantes et à la faible élasticité du matériau. De plus, elles présentent l'avantage de nécessiter **moins d'étapes de fabrication**, ce qui minimise le risque d'erreurs (37).

5.2.5.4 Biocompatibilité (70)

L'impression en 3D des gouttières de transfert est rendue possible par la mise sur le marché de résine d'impression flexibles et certifiées biocompatibles.

La première résine destinée au collage indirect est le IBT Ortho commercialisé par NextDent® : elle est biocompatible, flexible et présente une grande stabilité. Depuis, de nombreuses marques proposent leur résine : Keystone® KeyOrtho IBT, Form® IBT Resin, SprintRay® IDB...

Il y a peu d'études sur la biocompatibilité des résines d'impression 3D pour un usage intra-oral.

Les résines d'impression sont majoritairement des **photopolymères composés de méthacrylates** qu'on retrouve également dans la composition des matériaux de collage utilisés en multi-attaches. Elles sont donc susceptibles de **relarguer des monomères** dans le milieu buccal. Une étude du relargage des monomères serait pertinente pour compléter les données sur la biocompatibilité des résines.

Le **taux de conversion** permet d'évaluer le taux de transformation de monomères en polymères lors du processus de polymérisation, et permet donc d'évaluer la biocompatibilité d'un matériau.

Ainsi, les taux de conversion des matériaux de collage sont faibles : environ 35 % juste après polymérisation et 70 % à 48h. Les valeurs de taux de conversion des résines d'impression 3D sont **plus élevées comparées à la résine composite de collage**, mais n'atteint jamais 100 %.

Ce taux de conversion supérieur peut s'expliquer par le fait que le matériau est polymérisé en couches plus fines qu'un matériau mis en œuvre en technique direct. De plus, il y a une étape supplémentaire de post-polymérisation.

Quelle que soit la résine, les facteurs temps et température influencent significativement le taux de conversion, et les taux de conversion peuvent donc être optimisés. Mais une durée allongée et une température augmentée de post-polymérisation pourraient avoir un effet délétère sur les propriétés mécaniques du matériau.

Néanmoins, les gouttières de collage indirect imprimées ou les gouttières de mordantage ne sont en contact avec les dents que pour une durée très limitée (moins de 15 minutes généralement), avec peu ou pas de contact avec les tissus mous.

Ce n'est pas le cas des attaches collées sur la face vestibulaire ou linguale de chaque dent, où le relargage se fait sur une très petite surface mais sur une longue période, ni des aligneurs imprimés qui englobent la totalité de la surface dentaire de toutes les dents.

5.2.6 Avantage dans le choix du système de collage

Le collage indirect numérique permet l'utilisation des tous les systèmes de collage. Comme pour le collage indirect conventionnel, il est par exemple possible de coller avec du CVIMAR et de bénéficier de ses propriétés respectueuses de l'émail : bioactivité et faible agressivité pour l'émail avec une dépose facilitée des attaches et de la colle.

Si le choix se porte sur un système nécessitant un mordançage préalable, alors le numérique permet de faciliter grandement la réalisation de masques de mordançage : il est effectivement possible de concevoir puis d'imprimer en 3D des gouttières de mordançage.

Un des effets indésirables principaux des traitement orthodontiques multi-attaches vestibulaires sont les leucomes. Le collage indirect conventionnel nous a montré qu'une des façons de réduire significativement le risque de leucomes et l'accumulation de plaque autour des attaches est le mordançage très sélectif par la réalisation de guides de mordançage.

Figure 33 : Guides de mordançage imprimés en 3D



Source : Auteur, 2021.

5.2.7 Réduction du temps au fauteuil et de la durée du traitement

Comme pour le collage indirect conventionnel, le temps nécessaire au fauteuil est plus de deux fois moins important que pour le collage direct.

De même, grâce au positionnement idéal permis par le numérique, la nécessité de repositionner les attaches ou de réaliser des courbures de compensation diminue grandement. Il s'agit de séances

chronophages, et parfois difficiles pour le patient et le praticien. Cela permet de réduire encore le temps nécessaire au fauteuil (67).

Pour ce qui est de la durée du traitement, une étude de 2015 comparant le collage indirect numérique, le collage indirect conventionnel et le collage direct montre une réduction significative du temps de traitement de la technique numérique (40).

5.3 Limites du collage indirect numérique

Le collage indirect numérique partage un certain nombre d'inconvénients avec le collage indirect conventionnel.

Le collage indirect implique des **étapes supplémentaires** par rapport au collage direct et nécessite significativement plus de temps que le collage direct (temps au fauteuil et temps laboratoire)(71).

Comme pour sa version analogue, le collage indirect numérique pourrait avoir un **taux de décollement immédiat** supérieur comparé au collage direct. Cela impacte négativement le temps nécessaire au fauteuil (71).

Le collage indirect numérique présente des surcoûts (71) : lorsque l'intégralité des étapes du collage indirect numérique est délégué à un laboratoire externe, un surcoût lié à des frais de laboratoires sont à prendre en compte. Cela crée en plus une dépendance vis à vis d'un laboratoire externe.

Même lorsque le flux de travail est internalisé, le collage indirect numérique présente un surcoût :

- investissement dans une caméra optique ;
- investissement dans une imprimante 3D ;
- coût en consommables : avec la résine d'impression ;
- coût pour la licence du logiciel,
- temps du personnel.

Ce **surcoût est à nuancer** car les caméras optiques et imprimantes 3D sont souvent déjà présentes dans les cabinets d'orthodontie. De plus, comparé au collage indirect conventionnel, le coût est moindre. En prenant en compte le temps au fauteuil nécessaire, le coût en matériel et le temps du personnel, il a été estimé que le collage indirect numérique présente un coût légèrement plus élevé que le collage direct.

Le collage indirect assisté par ordinateur, s'il est bien exécuté, représente un **excellent rapport coût/bénéfice** (1).

Le numérique est un outil précieux pour les patients et pour les praticiens. Il est toutefois important de noter qu'il ne remplace pas les compétences du praticien, d'autant qu'aucun système orthodontique n'est automatisé. Comme pour le collage direct, l'expérience clinique a une influence positive sur la précision du collage indirect numérique.

Cependant, un des facteurs limitant l'adoption du numérique et l'utilisation des logiciels est la courbe d'apprentissage et la **nécessaire adaptation** à l'évolution constante des logiciels.

5.4 Une technique en constante évolution

Le collage indirect numérique, tel que décrit pour la méthode 3 peut être délégué à un laboratoire extérieur. Il suffit de leur envoyer les fichiers .stl des moulages et les instructions de collage.

C'est alors un technicien qui réalise les différentes étapes de segmentation des dents puis de positionnement les attaches, et l'orthodontiste valide la position. Le laboratoire imprime les gouttières et les envoie au cabinet. Seulement, le praticien n'a pas la main sur la confection de la gouttière, et chaque laboratoire a son système de gouttières. Parmi les laboratoires nous retrouvons Ormco (Insigna®), Dentsply (SureSmile®), SybSystem®, OrthoPartner (IndiBond) ou encore Orthoselect (Digital Indirect Bonding System®)(51).

Parmi ces laboratoires, certains proposent des systèmes vestibulaires qui cherchent à obtenir un degré supplémentaire de personnalisation, à l'image de ce qui se fait en lingual avec les techniques comme WIN® ou Incognito®.

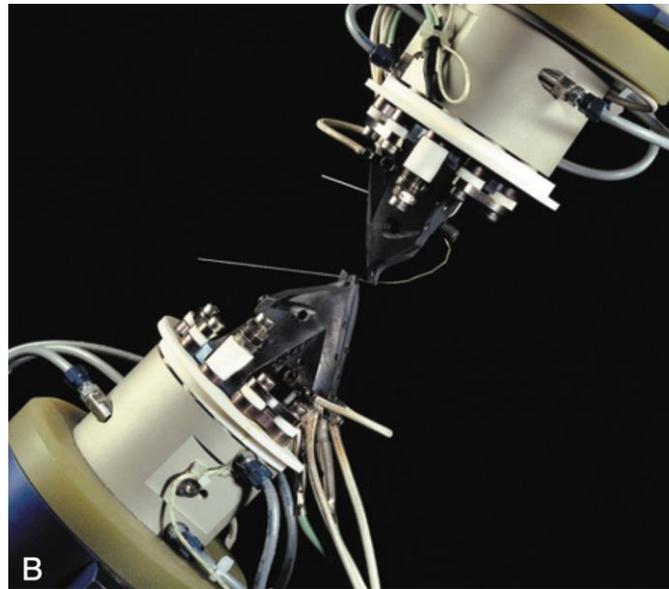
Ces systèmes proposent de réaliser des attaches personnalisées, ainsi que des fils personnalisés comportant des courbures de finition : c'est le cas du système Insigna® (Ormco), ou encore SureSmile® (Dentsply). Cela permettrait de réduire quasiment complètement le besoin de réaliser soi-même des courbures sur l'arc. Les robots plieurs sont capables d'une précision entre 0,1 et 1 mm, avec une marge d'erreur de 1° (72).

SureSmile® (Dentsply) propose deux options au praticien (72) :

- 1) Faire une empreinte initiale, demander des jigs de collage indirect après validation du set-up, puis commander des arcs personnalisés d'alignement et de finitions ;
- 2) Ou réaliser une empreinte optique après la phase d'alignement : ils réalisent alors des arcs sur-mesure pour compenser l'anatomie individuelle des patients, les erreurs de positionnement des boîtiers et les épaisseurs de colle non-uniformes.

C'est un système qui utilise donc des attaches conventionnelles mais des arcs personnalisés. Cela permettrait en moyenne de réduire la durée du traitement d'environ 8 mois, avec 4 séances de moins (73), et de gagner 20 % de temps au fauteuil.

Figure 34 : Robot plieur

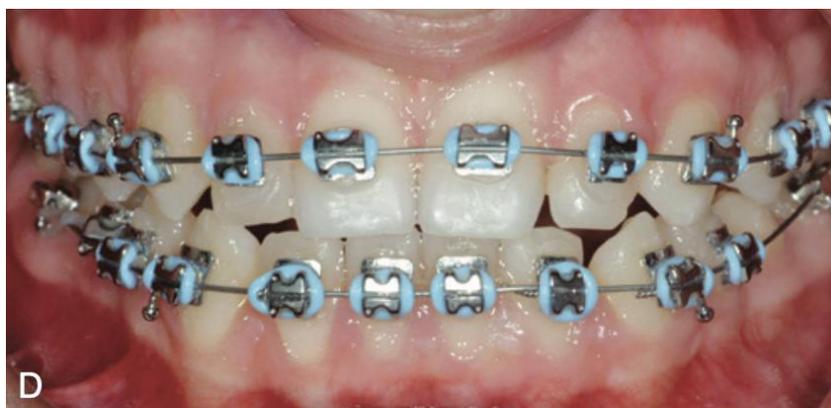


Source : Proffit et al., *Contemporary orthodontics*, 6th ed., 2019.

Insigna® (Ormco) propose des attaches et des arcs personnalisés : les gorges des attaches métalliques conventionnelles sont usinées en fonction du set-up. Les boîtiers autoligaturants et céramiques sont personnalisés au niveau de l'épaisseur de leur base (72).

Ce système permet de modifier le set-up, et aussi d'associer un CBCT, ce qui permet de faire figurer les racines sur le set-up (51).

Figure 35 : Attaches personnalisées Insigna®



Source : Proffit et al., *Contemporary orthodontics*, 6th ed., 2019.

Certaines études affirment qu'il n'y pas de différence sur la qualité du traitement effectué, ni sur le temps au fauteuil. De plus, il semble y avoir plus de décollements, d'urgences et de plaintes (40).

D'autres montrent que les patients traités avec Insigna® semblent avoir une meilleure qualité de finition, un temps de traitement plus court d'environ 8 mois et un nombre de séances plus faible (74). Le temps de traitement serait plus court de 8 mois avec un traitement personnalisé comparé à un collage direct, tandis qu'un collage indirect numérique réduit le temps de traitement de 5 mois comparé à un collage direct. Le gain de temps sur la durée du traitement n'est que de 3 mois pour un système personnalisé comparé à un collage indirect numérique.

Les systèmes permettant un degré de personnalisation supplémentaire, au niveau de l'attache et au niveau des arcs semblent présenter un avantage en temps de traitement et qualité de traitement. Cependant, cette diminution du temps de traitement est attribuée en grande partie au collage indirect plus qu'à la personnalisation des attaches.

Les attaches personnalisées augmentent largement le coût pour peu de bénéfice supplémentaire (40).

6 : Mise en application du collage indirect numérique à l'Hôpital Bretonneau avec OrthoAnalyzer® et cas cliniques

A l'Hôpital Bretonneau, comme dans la majorité des cabinets, la technique usuelle de positionnement des attaches est le **collage direct**.

6.1 Application du collage indirect conventionnel

Dans le cadre de l'enseignement universitaire, la **technique indirecte conventionnelle** est également enseignée (cf. Annexe 4). Cette technique est prometteuse, mais présente des limites, notamment du fait de l'importante courbe d'apprentissage que présente le collage indirect conventionnel.

La phase de laboratoire, notablement, est longue et difficile. Elle comporte de nombreuses étapes et manipulations à risque d'erreur, notamment au moment du thermoformage de la première gouttière. Cependant, l'étape clinique de transfert des attaches s'est avérée très simple, et prenant bien moins de temps que pour un collage classique.

Le temps total nécessaire, lorsque l'on réalise soi-même toutes les étapes de laboratoire, est nettement en défaveur du collage indirect conventionnel, et n'encourage pas son adhésion. Très peu de cas au sein du service sont collés ainsi.

6.2 Application du collage indirect numérique

En 2019, le service d'orthopédie dento-faciale était équipé de deux caméras intra-orale 3Shape Trios® 3 et iTero® Element, et aussi de la suite de logiciel OrthoAnalyzer® (avec Bracket Placement et Appliance Designer).

Nous disposions alors de tout ce qui était requis pour débiter le collage indirect numérique, à l'exception de l'imprimante 3D. C'est pour cette raison que nous avons dû externaliser l'impression 3D.

La première difficulté a été de trouver les attaches dans le catalogue. Bien que très étoffé, les tubes molaires que nous utilisons n'y figuraient pas. C'est pourquoi les premiers cas effectués n'étaient collés en indirect que de 5 à 5.

Au départ la méthode 2 semblait la plus facilement applicable. Cependant, la gouttière en silicone obtenue n'était pas satisfaisante car insuffisamment rétentive au niveau des attaches. Une seconde tentative avec une double gouttière thermoformée a été réalisée, sans plus de succès.

Figure 36 : Maître-modèle imprimé avec gabarits, gouttières de transfert en silicone et double gouttière thermoformée



Source : Auteur, 2019.

Nous avons alors essayé d'imprimer directement les gouttières de transfert et plusieurs essais ont été nécessaires.

Le premier cas a donc été collé à l'aide d'une gouttière de transfert imprimée par un laboratoire extérieur, en résine NextDent® IBT Ortho.

Il s'agit d'une patiente en classe I d'Angle avec une dysharmonie dents-arcade modérée. Le plan de traitement ne prévoyait pas d'extraction.

Figure 37 : Cas clinique 1 : Collage indirect numérique, situation initiale



Source : Auteur, 2020.

La gouttière de transfert imprimée n'était pas satisfaisante : elle manquait de précision et son état de surface traduit un protocole de post-polymérisation inadapté. Elle demeurait utilisable cliniquement.

Figure 38 : Transfert clinique des attaches avec une gouttière de transfert imprimée



Source : Auteur, 2020.

Bien que l'intégralité de la chaîne n'était pas internalisée, les résultats demeurent très satisfaisants. La forme d'arcade utilisée pour le set-up a été imprimée et utilisée comme charte pour façonner les arcs en TMA. Aucun repositionnement n'a été nécessaire, ni aucun pli de finition.

Figure 39 : Cas clinique 1 : Collage indirect numérique, situation finale



Source : Auteur, 2021.

Le traitement a duré 12 mois. Dans ce cas, le collage indirect numérique a probablement permis de contenir la durée du traitement, et surtout de réduire la durée des séances au fauteuil. Il s'agit d'un cas idéal pour le collage indirect numérique, car il s'agit d'un cas sans extraction ni mécanique inter-arcade. Le résultat final est donc très fidèle au set-up initial.

Entre temps, le service s'est doté de deux imprimantes 3D : la Form 3 de Formlabs et la MoonRay D de SprintRay. Ces deux imprimantes utilisent des technologies similaires (SLA et DLP respectivement) et

nous ont permis d'utiliser une gamme de résine étendue. La MoonRay nous a permis d'utiliser la seule résine mise sur le marché pour le collage indirect à ce moment : la NextDent® IBT Ortho. Formlabs ne proposait pas de résine IBT, nous avons alors essayé d'autres résines : la Flexible 80A (une résine technique non destinée à être mise en bouche) et la Dental LT Clear.

Voici un deuxième cas, réalisé en collage indirect numérique : il s'agit d'un patient de 25 ans présentant une classe III squelettique et dentaire, et qui a été traité avec un protocole orthodontico-chirurgical par recul et recentrage mandibulaire associé à une génioplastie d'avancée.

Figure 40 : Cas clinique 2 : Collage indirect numérique, situation initiale

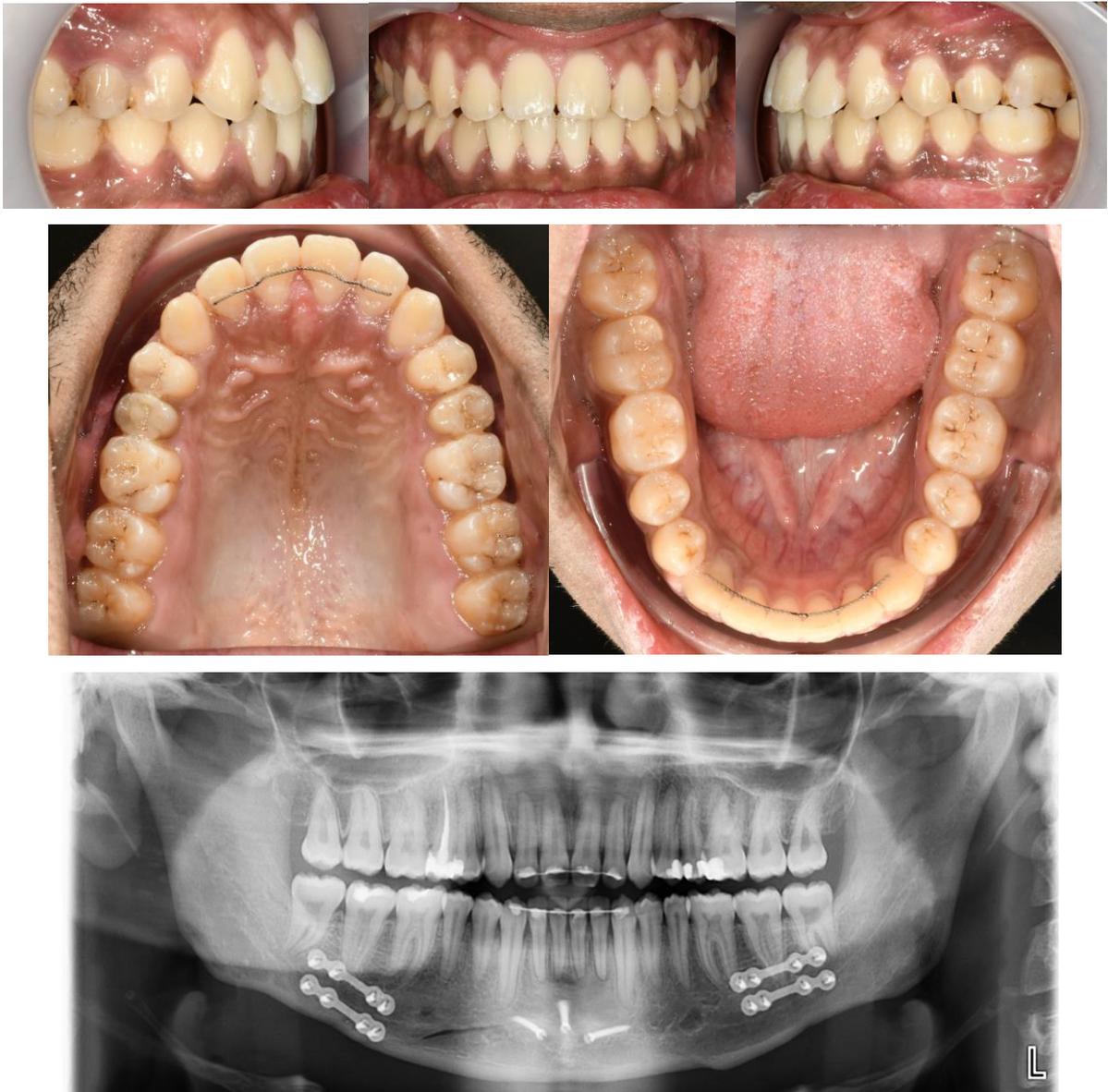


Source : Auteur, 2019.

Nous disposons chez ce patient d'un CBCT des deux arcades, que nous avons pu exploiter pour déterminer l'axe des racines (cf. Figure 26). Nous avons également réalisé des guides de mordançage (cf. Figure 32). La gouttière de mordançage a été imprimée en Dental LT Clear avec la Form 3, et la gouttière de transfert a été imprimée avec la SprintRay en NextDent® IBT Ortho.

La forme d'arcade choisie pour le set-up a été imprimée et utilisée pour façonner les arcs en acier.

Figure 41 : Cas clinique 2 : Collage indirect numérique, situation finale (courtoisie Chloé Assad)

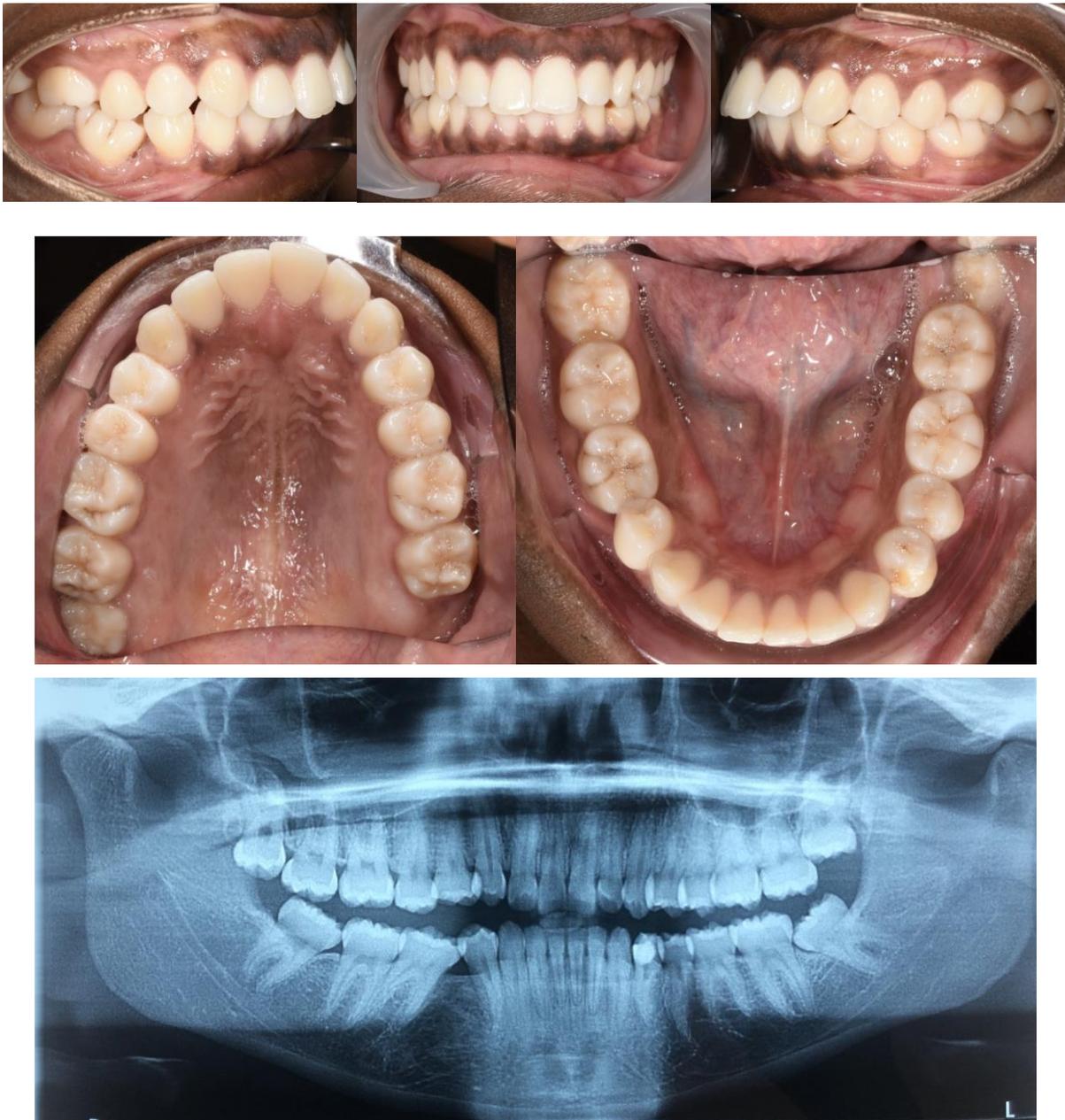


Source : Auteur, 2022.

Même si la pandémie de Covid-19 a retardé l'intervention, le traitement a duré 19 mois. Aucun repositionnement ni courbure de finition n'ont été nécessaires. L'alignement et le parallélisme des racines sont très satisfaisants.

Enfin, un troisième cas, toujours en cours de traitement : il s'agit d'une femme de 24 ans en classe I, présentant une dysharmonie dents-arcade par bi-proalvéolie. Le plan de traitement prévoit l'avulsion des trois premières prémolaires (45 est manquante), et des quatre dents de sagesse. Nous disposons d'un CBCT de l'arcade supérieure, que nous avons pu exploiter pour le collage indirect. Nous avons également réalisé un guide de mordançage.

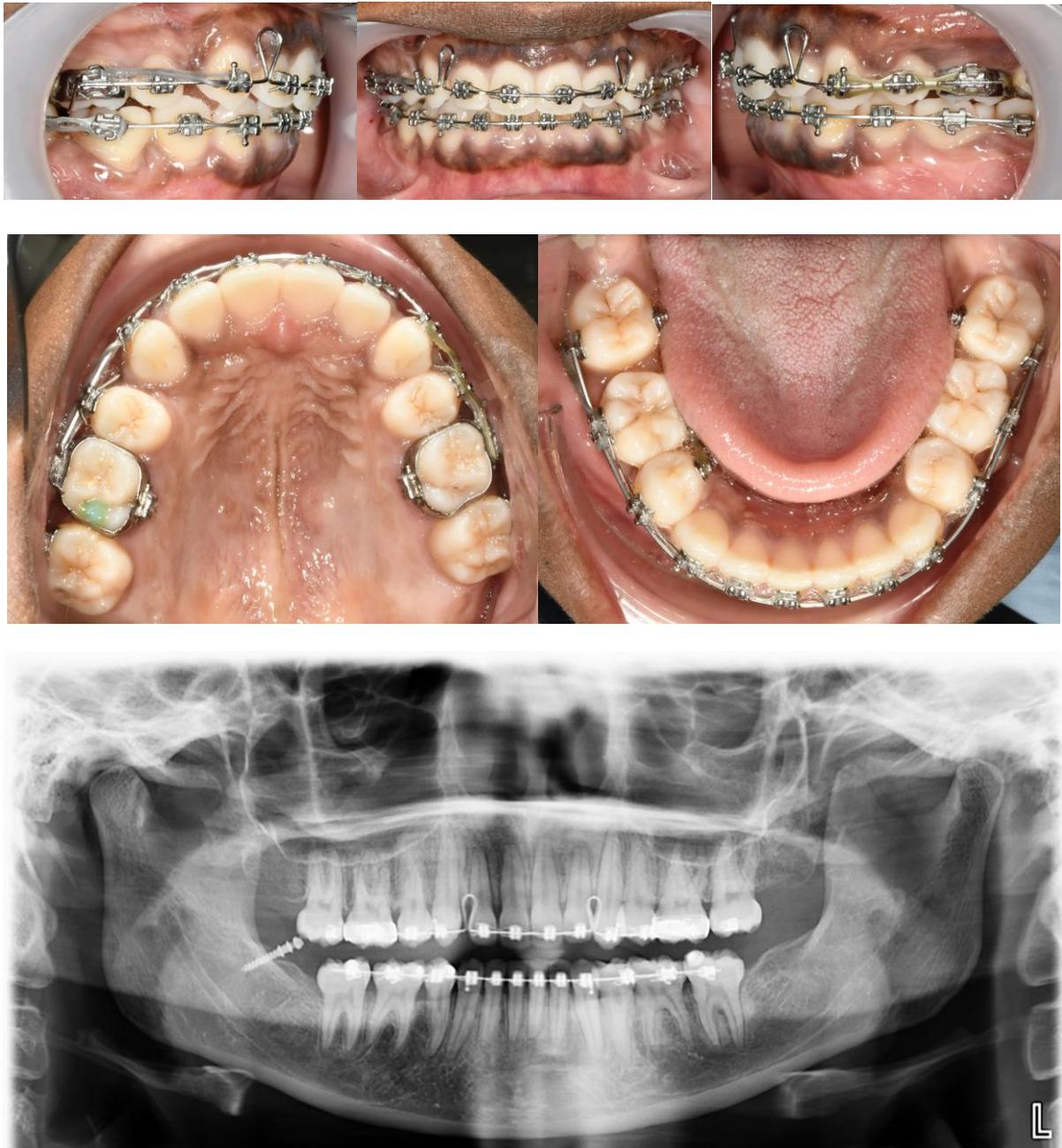
Figure 42 : Cas clinique 3 : Collage indirect numérique, situation initiale



Source : Auteur, 2019.

Le collage a été réalisé avant les avulsions. Le traitement est toujours en cours. L'alignement, le nivellement et le parallélisme des axes radiculaires semblent satisfaisants. La forme d'arcade utilisée pour le set-up a été imprimée et utilisée pour façonner les arcs en acier aux bonnes dimensions.

Figure 43 : Cas clinique 3 : Collage indirect numérique, en traitement (courtoisie Chloé Assad)



Source : Auteur, 2022.

Un mode d'emploi a été rédigé et mis à disposition dans le service pour que les internes désireux de s'essayer au collage indirect numérique puisse le faire (cf. Annexe 5). Il s'agit en effet d'un outil très intéressant d'un point de vue pédagogique, car il permet de visualiser la relation entre la position des attaches et la position des dents, grâce au set-up virtuel.

La difficulté du collage indirect numérique réside dans l'appréhension du logiciel. Il est nécessaire de le configurer avant pouvoir l'exploiter. Ces paramètres dépendent du matériel à disposition au cabinet, et il faut ensuite faire des essais et des ajustements. Ces étapes prennent du temps et peuvent décourager, mais une fois le logiciel configuré et les paramètres d'impression ajustés, cette technique devient utilisable par toute l'équipe avec un simple mode d'emploi.

Cependant, il y a toujours une courbe d'apprentissage. En effet, nous sommes habitués à manipuler des moulages physiques, à positionner nos attaches physiquement. Il faut un certain temps d'adaptation pour que l'œil s'habitue à la modélisation 3D.

L'investissement initial reste accessible, si on ne considère pas les caméras intra-orales (qui ont une utilité plus large). Le prix d'une imprimante comme une MoonRay de SprintRay ou une Form 3 de Formlabs est de l'ordre de 3000 à 4000€, et 1 litre de résine coûte entre 220 et 400€ (ce qui permet d'imprimer des gouttières pour environ 80 patients). Internaliser l'ensemble du processus est indispensable car il permet d'avoir le contrôle et d'effectuer soi-même les ajustements nécessaires.

Conclusion

Le collage direct est la technique la plus employée car il s'agit de la technique la plus facile à mettre en œuvre et la moins coûteuse. Cependant, cette technique prend du temps au fauteuil, et surtout manque de précision et de reproductibilité.

Pour pallier le manque de précision de cette technique, le collage indirect a été développé. C'est une technique qui permet d'être plus reproductible et augmente le confort du praticien et du patient. Cependant, la complexité de sa mise en œuvre et son coût certain, pour un bénéfice discuté, explique le faible emploi de cette technique.

Le numérique a permis de perfectionner cette technique, permettant de s'affranchir du facteur humain. La numérisation du collage indirect offre un degré de précision et de personnalisation inégalable, tout en diminuant les manipulations nécessaires au laboratoire.

Le numérique prend une place de plus en plus importante dans les cabinets d'orthodontie, et la plupart dispose de l'équipement nécessaire à l'application de cette technique.

Le changement de ses habitudes, la courbe d'apprentissage et l'appréhension face à ces nouvelles technologies peuvent constituer autant de freins à l'adoption de la technique.

En revanche, même si ces systèmes sont très performants, ce ne sont que des outils pour atteindre les objectifs du plan de traitement élaboré.

Aussi personnalisés soient-ils, ces systèmes ne dispensent pas de poser un diagnostic juste, d'établir un bon plan de traitement, de mettre en œuvre des mécaniques adéquates et d'anticiper les effets indésirables.

Bibliographie

1. Proffit WR, Fields HW, Larson BE, Sarver DM. Contemporary orthodontics. 6th edition. Philadelphia, IL: Elsevier; 2019. (VIII-729 p.).
2. Gange P. The evolution of bonding in orthodontics. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2015;147(4):S56-63.
3. Bozelli JV, Bigliazzi R, Barbosa HAM, Ortolani CLF, Bertoz FA, Faltin Junior K. Comparative study on direct and indirect bracket bonding techniques regarding time length and bracket detachment. Dent Press J Orthod. 2013;18(6):51-7.
4. Planché PG. Concept de l'arc droit de Lawrence Andrews. Principes et évolution. Encycl Méd-Chir - Orthopédie Dentofaciale. [23-490-D-30]. Issy-les-Moulineaux : Elsevier, 2002.
5. Andrews LF. The straight-wire appliance. Br J Orthod. 1979;6(3):125-43.
6. 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.
7. Carlson SK, Johnson E. Bracket positioning and resets : five steps to align crowns and roots consistently. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2001;119(1):76-80.
8. Armstrong D, Shen G, Petocz P, Darendeliler MA. A comparison of accuracy in bracket positioning between two techniques : localizing the centre of the clinical crown and measuring the distance from the incisal edge. Eur J Orthod. 2007;29(5):430-6.
9. Castilla AE, Crowe JJ, Moses JR, Wang M, Ferracane JL, Covell DA. Measurement and comparison of bracket transfer accuracy of five indirect bonding techniques. Angle Orthod. 2014;84(4):607-14.
10. Larson BE, Vaubel CJ, Grünheid T. Effectiveness of computer-assisted orthodontic treatment technology to achieve predicted outcomes. Angle Orthod. 2013;83(4):557-62.
11. Mestriner MA, Enoki C, Mucha JN. Normal torque of the buccal surface of mandibular teeth and its relationship with bracket positioning : a study in normal occlusion. Braz Dent J. 2006;17(2):155-60.
12. Hitmi L. Collage indirect des attaches orthodontiques vestibulaires. Encycl Méd-Chir - Orthopédie Dentofaciale. [23-490-C-60] Paris : Elsevier Masson, 2020.
13. Hitmi L. Risque iatrogène sur l'émail de la dépose des attaches orthodontiques et du nettoyage de la colle. L'Orthodontiste. 2015;4:26-32.

14. El-Timamy AM, El-Sharaby FA, Eid FH, Mostafa YA. Three-dimensional imaging for indirect-direct bonding. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2016;149(6):928-31.
15. Koo BC, Chung CH, Vanarsdall RL. Comparison of the accuracy of bracket placement between direct and indirect bonding techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1999;116(3):346-51.
16. Zachrisson BU, Brobakken BO. Clinical comparison of direct versus indirect bonding with different bracket types and adhesives. *Am J Orthod.* 1978;74(1):62-78.
17. Armstrong D, Shen G, Petocz P, Darendeliler MA. Accuracy of bracket placement by orthodontists and inexperienced dental students. *Aust Orthod J.* 2007;23(2):96-103.
18. De Oliveira NS, Rossouw E, Lages EMB, Macari S, Pretti H. Influence of clinical experience on accuracy of virtual orthodontic attachment bonding in comparison with the direct procedure. *Angle Orthod.* 2019;89(5):734-41.
19. Pichon P, Cavaré A. Perspectives d'application du flux numérique au collage indirect. *Rev Orthopédie Dento-Faciale.* 2019;53(3):233-47.
20. Taylor NG, Cook PA. The reliability of positioning pre-adjusted brackets : an in vitro study. *Br J Orthod.* 1992;19(1):25-34.
21. Panayi NC, Tsolakis AI, Athanasiou AE. Digital assessment of direct and virtual indirect bonding of orthodontic brackets : a clinical prospective cross-sectional comparative investigation. *Int Orthod.* 2020;18(4):714-21.
22. De Oliveira NS, Gribel BF, Neves LS, Lages EMB, Macari S, Pretti . Comparison of the accuracy of virtual and direct bonding of orthodontic accessories. *Dent Press J Orthod.* 2019;24(4):46-53.
23. Birdsall J, Hunt NP, Sabbah W, Moseley HC. Accuracy of positioning three types of self-ligating brackets compared with a conventionally ligating bracket. *J Orthod.* 2012;39(1):34-42.
24. Müller-Hartwich R, Jost-Brinkmann PG, Schubert K. Precision of implementing virtual setups for orthodontic treatment using CAD/CAM-fabricated custom archwires. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopädie.* 2016;77(1):1-8.
25. Atilla AO, Ozturk T, Eruz MM, Yagci A. A comparative assessment of orthodontic treatment outcomes using the quantitative light-induced fluorescence (QLF) method between direct bonding and indirect bonding techniques in adolescents : a single-centre, single-blind randomized controlled trial. *Eur J Orthod.* 2020;42(4):441-53.
26. Dalessandri D, Bindi M, Massetti F, Isola G, Migliorati M, Visconti L, et al. Effectiveness of a selective etching technique in reducing white spots formation around lingual brackets : a prospective cohort clinical study. *Coatings.* 2021;11(5):572.
27. Yagci A, Seker ED, Demirsoy KK, Ramoglu SI. Do total or partial etching procedures effect the rate of white spot lesion formation ? A single-center, randomized, controlled clinical trial. *Angle Orthod.* 2019;89(1):16-24.

28. Knösel M, Bojes M, Jung K, Ziebolz D. Prédiposition aux leucomes pré-carieux due à un excès de mordançage autour des attaches orthodontiques. *Orthod Fr.* 2015;86(3):233-44.
29. Holberg C, Winterhalder P, Holberg N, Wichelhaus A, Rudzki-Janson I. Orthodontic bracket debonding : risk of enamel fracture. *Clin Oral Investig.* 2014;18(1):327-34.
30. Almuzian M, Rizk MZ, Ulhaq A, Alharbi F, Alomari S, Mohammed H. Effectiveness of different debonding techniques and adjunctive methods on pain and discomfort perception during debonding fixed orthodontic appliances : a systematic review. *Eur J Orthod.* 2019;41(5):486-94.
31. Janiszewska-Olszowska J, Szatkiewicz T, Tomkowski R, Tandecka K, Grocholewicz K. Effect of orthodontic debonding and adhesive removal on the enamel – Current knowledge and future perspectives – a systematic review. *Med Sci Monit.* 2014;20:1991-2001.
32. Silverman E, Cohen M, Gianelly AA, Dietz VS. A universal direct bonding system for both metal and plastic brackets. *Am J Orthod.* 1972;62(3):236-44.
33. Thomas RG. Indirect bonding : simplicity in action. *J Clin Orthod JCO.* 1979;13(2):93-106.
34. Yildirim K, Saglam-Aydinatay B. Comparative assessment of treatment efficacy and adverse effects during nonextraction orthodontic treatment of Class I malocclusion patients with direct and indirect bonding : a parallel randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018;154(1):26-34.e1.
35. Xue C, Xu H, Guo Y, Xu L, Dhami Y, Wang H, et al. Accurate bracket placement using a computer-aided design and computer-aided manufacturing–guided bonding device : an in vivo study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2020;157(2):269-77.
36. Schmid J, Brenner D, Recheis W, Hofer-Picout P, Brenner M, Crismani AG. Transfer accuracy of two indirect bonding techniques—an in vitro study with 3D scanned models. *Eur J Orthod.* 2018;40(5):549-55.
37. Sabbagh H, Khazaei Y, Baumert U, Hoffmann L, Wichelhaus A, Janjic Rankovic M. Bracket transfer accuracy with the indirect bonding technique — A systematic review and meta-analysis. *J Clin Med.* 2022;11(9):2568.
38. Niu Y, Zeng Y, Zhang Z, Xu W, Xiao L. Comparison of the transfer accuracy of two digital indirect bonding trays for labial bracket bonding. *Angle Orthod.* 2021;91(1):67-73.
39. Duarte MEA, Gribel BF, Spitz A, Artese F, Miguel JAM. Reproducibility of digital indirect bonding technique using three-dimensional (3D) models and 3D-printed transfer trays. *Angle Orthod.* 2020;90(1):92-9.
40. Brown MW, Koroluk L, Ko CC, Zhang K, Chen M, Nguyen T. Effectiveness and efficiency of a CAD/CAM orthodontic bracket system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2015;148(6):1067-74.
41. Inatomi K, Saito H, Endo T. Bond strength of indirect bonded brackets in orthodontic adhesives with different viscosities. *Dent Mater J.* 2021;40(2):439-45.

42. Cooper RB, Sorenson NA. Indirect bonding with adhesive precoated brackets. *J Clin Orthod JCO*. mars 1993;27(3):164-7.
43. Demirovic K, Spalj S, Kobaslija S. Comparison of shear bond strength of orthodontic brackets using direct and indirect bonding methods in vitro and in vivo. *Acta Inform Med*. 2018 Jun;26(2):125-129.
44. Dalessandri D, Dalessandri M, Bonetti S, Visconti L, Paganelli C. Effectiveness of an indirect bonding technique in reducing plaque accumulation around braces. *Angle Orthod*. 2012;82(2):313-8.
45. Cozzani M, Menini A, Bertelli A. Etching masks for precise indirect bonding. *J Clin Orthod JCO*. 2010;44(5):326-30.
46. Thiyyagarajah S, Spary DJ, Rock WP. A clinical comparison of bracket bond failures in association with direct and indirect bonding. *J Orthod*. 2006;33(3):198-204.
47. Khorsandi D, Fahimipour A, Abasian P, Saber SS, Seyedi M, Ghanavati S, et al. 3D and 4D printing in dentistry and maxillofacial surgery : Printing techniques, materials, and applications. *Acta Biomater*. 2021;122:26-49.
48. Fleming PS, Marinho V, Johal A. Orthodontic measurements on digital study models compared with plaster models : a systematic review. *Orthod Craniofac Res*. 2011;14(1):1-16.
49. Burzynski JA, Firestone AR, Beck FM, Fields HW, Deguchi T. Comparison of digital intraoral scanners and alginate impressions : time and patient satisfaction. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2018;153(4):534-41.
50. Lecocq G. La prise d'empreintes numériques : principes et intérêts en orthodontie. *Int Orthod*. 2016;14(2):184-94.
51. Christensen LR, Cope JB. Digital technology for indirect bonding. *Semin Orthod*. 2018;24(4):451-60.
52. Whetten JL, Williamson PC, Heo G, Varnhagen C, Major PW. Variations in orthodontic treatment planning decisions of Class II patients between virtual 3-dimensional models and traditional plaster study models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2006;130(4):485-91.
53. Ko HC, Liu W, Hou D, Torkan S, Spiekerman C, Huang GJ. Agreement of treatment recommendations based on digital vs plaster dental models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;155(1):135-42.
54. Yilmaz H, Eglenen MN. Comparison of the effect of using panoramic and cone-beam computed tomography on the accuracy of root position in indirect digital bracket placement : a retrospective study. *Orthod Craniofac Res*. 2022;25(3):401-8.
55. Redmond WJ, Redmond MJ, Redmond WR. The OrthoCAD bracket placement solution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2004;125(5):645-6.

56. Hitmi L. Les différents protocoles de collage indirect numériques. 2021. (Conférence non éditée.)
57. Süpple J, von Glasenapp J, Hofmann E, Jost-Brinkmann PG, Koch PJ. Accurate bracket placement with an indirect bonding method using digitally designed transfer models printed in different orientations—An in vitro study. *J Clin Med*. 2021;10(9):2002.
58. Plattner J, Othman A, Arnold J, Von See C. Comparative study between the overall production time of digitally versus conventionally produced indirect orthodontic bonding trays. *Turk J Orthod*. 2020;33(4):232-8.
59. Peck JL, Sameshima GT, Miller A, Worth P, Hatcher DC. Mesiodistal root angulation using panoramic and cone beam CT. *Angle Orthod*. 2007;77(2):206-13.
60. Lee RJ, Ko J, Park J, Pi S, Devgon D, Nelson G, et al. Accuracy and reliability of the expected root position setup on clinical decision making of root position at midtreatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;156(4):566-73.
61. Carlsson R, Rönnerman S. Crown-root angles of upper central incisors. *Am J Orthod*. 1973;64(2):147-54.
62. The American board of orthodontics. Grading system for dental casts and panoramic radiographs. 2012; Disponible sur: <https://www.americanboardortho.com/media/1191/grading-system-casts-radiographs.pdf>
63. Zhang Y, Yang C, Li Y, Xia D, Shi T, Li C. Comparison of three-dimensional printing guides and double-layer guide plates in accurate bracket placement. *BMC Oral Health*. 2020;20(1):127.
64. Baan F, Bruggink R, Nijsink J, Maal TJJ, Ongkosuwito EM. Fusion of intra-oral scans in cone-beam computed tomography scans. *Clin Oral Investig*. 2021;25(1):77-85.
65. Lim SW, Park H, Lim SY, Choo HH, Baek SH, Hwang HS, et al. Can we estimate root axis using a 3-dimensional tooth model via lingual-surface intraoral scanning ? *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2020;158(5):e99-109.
66. Grauer D, Proffit WR. Accuracy in tooth positioning with a fully customized lingual orthodontic appliance. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2011;140(3):433-43.
67. Moreira FC, Vaz LG, Guastaldi AC, English JD, Jacob HB. Potentialities and limitations of computer-aided design and manufacturing technology in the nonextraction treatment of Class I malocclusion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2021;159(1):86-96.
68. Son KH, Park JW, Lee DK, Kim KD, Baek SH. New virtual orthodontic treatment system for indirect bonding using the stereolithographic technique. *Korean J Orthod*. 2011;41(2):138.
69. Kim J, Chun YS, Kim M. Accuracy of bracket positions with a CAD/CAM indirect bonding system in posterior teeth with different cusp heights. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2018;153(2):298-307.

70. Dantagnan CA. Taux de conversion des résines d'impression 3D sous différents protocoles de post traitement. 2021. (Rapport de stage de master, non édité.)
71. Czolgosz I, Cattaneo PM, Cornelis MA. Computer-aided indirect bonding versus traditional direct bonding of orthodontic brackets : bonding time, immediate bonding failures, and cost-minimization. A randomized controlled trial. *Eur J Orthod*. 3 avr 2021;43(2):144-51.
72. Nguyen T, Jackson T. 3D technologies for precision in orthodontics. *Semin Orthod*. 2018;24(4):386-92.
73. Sachdeva RCL, Aranha SLT, Egan ME, Gross HT, Sachdeva NS, Currier GF, et al. Treatment time : SureSmile vs conventional. *Orthod Art Pract Dentofac Enhanc*. 2012;13(1):72-85.
74. Weber DJ, Koroluk LD, Phillips C, Nguyen T, Proffit WR. Clinical effectiveness and efficiency of customized vs. conventional preadjusted bracket systems. *J Clin Orthod JCO*. 2013;47(4):261-6; quiz 268.

Table des figures

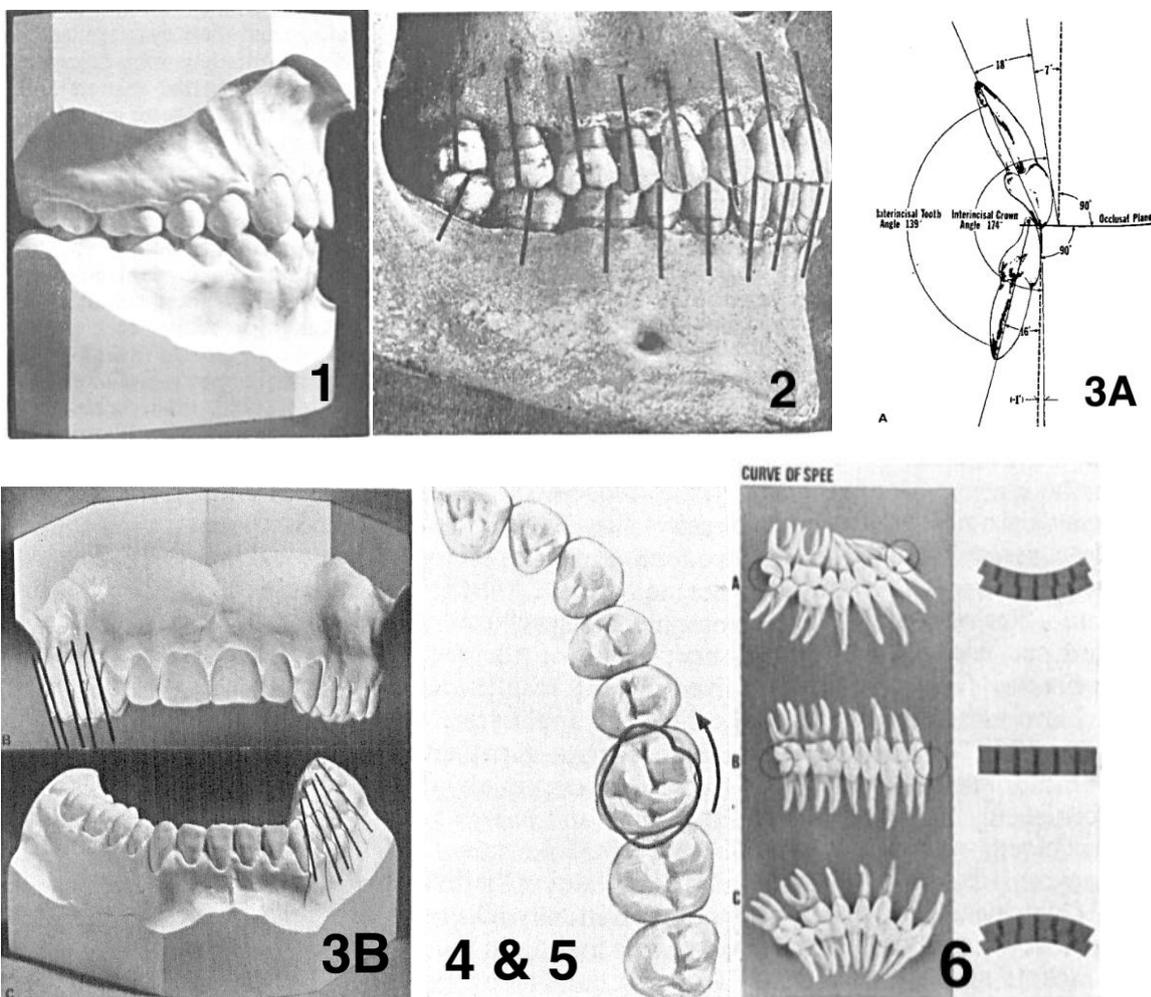
Figure 1 : Cas bagué avec des attaches d'Angle	4
Figure 2 : Déformations de premier (A), deuxième (B) et troisième (C) ordre en Edgewise	5
Figure 3 : Conception d'une attache d'Andrews	6
Figure 4 : Point FA situé sur l'axe vestibulaire (FACC) pour chaque catégorie de dents maxillaires (A) et mandibulaires (B)	8
Figure 5 : Variation du torque en fonction de la position verticale de l'attache	9
Figure 6 : Patient présentant des leucomes au niveau des incisives latérales maxillaires	15
Figure 7 : Surface amélaire observée au microscope électronique à balayage : (A) après mordançage à l'acide orthophosphorique pendant 30 secondes, (B) côté « intact »	15
Figure 8 : Arrachement macroscopique d'émail à la dépose de l'attache	17
Figure 9 : Rayures de la surface amélaire après utilisation d'instruments rotatifs agressifs pour le nettoyage de la colle	18
Figure 10 : Réalisation d'un moulage en silicone	20
Figure 11 : Attaches positionnées sur le modèle de travail au niveau des repères visuels	20
Figure 12 : Gouttière de transfert en silicone transparent	21
Figure 13 : Double gouttière thermoformée de transfert	21
Figure 14 : Masques de mordançage	25
Figure 15 : Modèle polygonal (à gauche) et sa reconstruction 3D (à droite)	31
Figure 16 : Différents modèles de caméras intra-orales : iTero® Element 2, Medit® i700 et Trios® 4.	32
Figure 17 : (A) Schéma d'une imprimante FDM, (B) Fichier de modélisation 3D, (C) Objet imprimé par FDM	34
Figure 18 : (A) Schéma d'une impression par SLA (B) Objet imprimé par SLA	35
Figure 19 : Schéma d'une imprimante DLP	36
Figure 20 : Conception du guide de collage direct	38
Figure 21 : Position idéale de l'attache affichée à l'écran en temps réel avec OrthoCAD iQ®	39
Figure 22 : Positionnement des attaches sur un modèle imprimé par dépôt de fil fondu	40
Figure 23 : Segmentation des dents semi-automatique sur OrthoAnalyzer®	41
Figure 24 : Positionnement virtuel des attaches sur OrthoAnalyzer® : malocclusion initiale à gauche, set-up à droite	41
Figure 25 : (A) Maître-modèle imprimé comportant des marqueurs de position, (B) Attaches positionnées à l'aide des marqueurs, (C) Gouttière de transfert thermoformée	42

Figure 26 : Gouttières de transfert imprimées avec attaches insérées	43
Figure 27 : Visualisation de l'axe des racines grâce au couplage de moulages numériques avec un CBCT	46
Figure 28 : Positionnement des attaches et réalisation de la gouttière de transfert à partir d'une imagerie 3D	47
Figure 29 : Superposition du set-up initial avec les modèles de fin de traitement	49
Figure 30 : Choix de la forme d'arcade sur OrthoAnalyzer®	50
Figure 31 : Conception de la gouttière de transfert sur Appliance Designer (OrthoAnalyzer®).....	52
Figure 32 : Conception de jigs unitaires sur 3Txer® (Orapix)	53
Figure 33 : Guides de mordançage imprimés en 3D	56
Figure 34 : Robot plieur.....	59
Figure 35 : Attaches personnalisées Insigna®	59
Figure 36 : Maître-modèle imprimé avec gabarits, gouttières de transfert en silicone et double gouttière thermoformée.....	62
Figure 37 : Cas clinique 1 : Collage indirect numérique, situation initiale	63
Figure 38 : Transfert clinique des attaches avec une gouttière de transfert imprimée	63
Figure 39 : Cas clinique 1 : Collage indirect numérique, situation finale	64
Figure 40 : Cas clinique 2 : Collage indirect numérique, situation initiale	65
Figure 41 : Cas clinique 2 : Collage indirect numérique, situation finale (courtoisie Chloé Assad)	66
Figure 42 : Cas clinique 3 : Collage indirect numérique, situation initiale	67
Figure 43 : Cas clinique 3 : Collage indirect numérique, en traitement (courtoisie Chloé Assad)	68

Annexes

Annexe 1 : Les 6 clés de l'occlusion selon Andrews

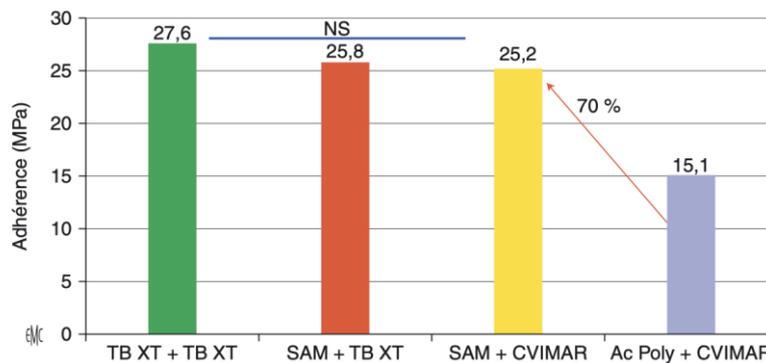
1. Relation molaire de classe I ;
2. Angulation coronaire mésio-distale (tip) ;
- 3 Inclinaison coronaire vestibulo-linguale (torque) (A) antérieure (B) postérieure ;
- 4 Absence de rotation ;
- 5 Absence de diastème ;
- 6 Courbe de Spee nivelée.



Source : Andrews, « The straight-wire appliance », 1979.

Annexe 2 : Valeur d'adhérence (en MPa) des différents systèmes de collage

1. Système résineux avec mordançage (TB XT + TB XT) 2. Système résineux automordançant (SAM + TB XT) 3. CVIMAR associé à un système automordançant (SAM + CVIMAR) 4. CVIMAR avec traitement à l'acide polyacrylique



Source : Hitmi, « Collage indirect des attaches orthodontiques vestibulaires », 2020.

Annexe 3 : Protocole de transfert en bouche des attaches en collage indirect avec un système résineux avec mordançage

- A. Nettoyage des surfaces à l'aide d'une brosse et de pâte de nettoyage ;
- B. Après rinçage et séchage, application d'acide orthophosphorique à 35% pendant 15 à 30 secondes ;
- C. Rinçage et séchage des surfaces de collage et de tout l'environnement de collage et vérification de l'aspect blanc crayeux ;
- D. Mise en place de l'adhésif et évaporation du solvant à l'aide d'un spray à air ;
- E. Mise en place de composite sur les talons de composite en faible quantité ;
- F. Mise en place de la gouttière en maintenant une pression sur chaque attache ;
- G. Photopolymérisation : 10 secondes par dent, en commençant par une extrémité ;
- H. Photopolymérisation de l'autre extrémité ;
- I. Photopolymérisation du reste de l'arcade ;
- J. Dépose de la gouttière rigide ;
- K. Dépose de la gouttière souple ;
- L. Élimination des excès de colle.

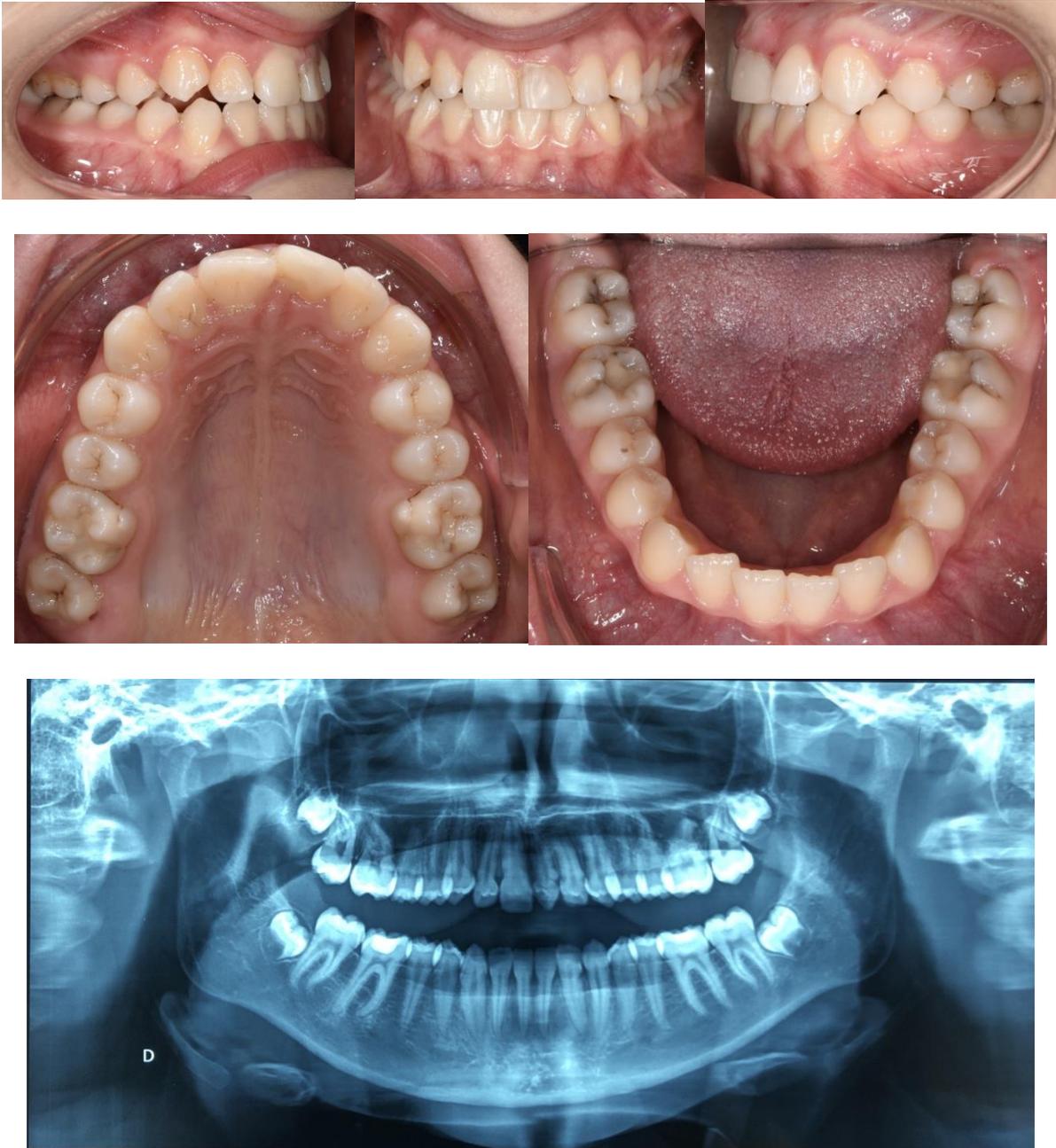


Source : Hitmi, « Collage indirect des attaches orthodontiques vestibulaires », 2020.

Annexe 4 : Cas clinique de collage indirect conventionnel.

Il s'agit d'une patiente en classe I présentant une dysharmonie dents-arcade légère. Les attaches ont été mises en place par un protocole de collage indirect conventionnel.

Situation initiale



Source : Auteur, 2019.

Après avoir obtenus les moulages, il a fallu les préparer en leur donnant une forme de fer à cheval pour permettre le thermoformage. Après avoir dessiné les repères visuels sur chaque dent, les moulages

sont couverts d'un vernis isolant. Enfin, les attaches sont positionnées une à une avec du composite de collage. Lorsque la position idéale est trouvée, le composite est photopolymérisé.

Une fois toutes les attaches positionnées, une première gouttière fine est thermoformée. Celle-ci recouvre toute l'attache, mais une encoche est découpée en vestibulaire entre chaque attache. Par-dessus, une seconde gouttière est thermoformée. Cette fois-ci elle est coupée à mi-hauteur de l'attache. Le milieu est dessiné au marqueur.

Double gouttière thermoformée



Source : Auteur, 2019.

Après la phase d'alignement et de nivellement, nous pouvons affirmer que le collage réalisé en indirect relativement satisfaisant. Aucun repositionnement n'a été réalisé, mais de nombreux plis de finitions ont été nécessaires.

Courbures de compensation nécessaires



Source : Auteur, 2021

Situation finale



Source : Auteur, 2021.

Le temps de traitement a été de 18 mois, et la technique de collage choisie n'a probablement pas influencé cette durée.

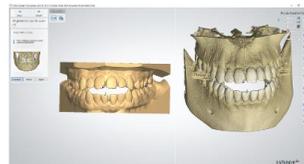
Annexe 5 : Mode d'emploi pour le collage indirect sur OrthoAnalyzer®

Mode d'emploi Collage indirect numérique – OrthoAnalyzer

Placement numérique des brackets

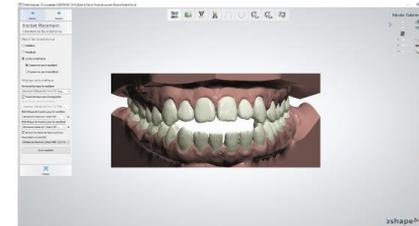
1. Bilan : photos, radios, de préférence avec CBCT et Diagnostic
2. **Empreinte numérique** du patient
 - a. Transférer l'empreinte de la caméra 3shape à l'ordinateur
3. **Préparation du modèle** :
 - a. **Soclage** : faire un petit socle
 - b. Segmentation des dents (pas indispensable de le faire à cette étape)
4. **Importer le CBCT** et le matcher avec les moulages* (facultatif)

1. Cliquer sur l'icône
2. Sélectionner le fichier **.dcm**.
3. Cliquer sur suivant
4. Activer le rognage et **rogné le fichier au minimum**
5. Cliquer sur l'icône pour aligner les modèles
6. Placer les 3 points pour aligner les modèles.



1

5. Cliquer sur le bouton "**Bracket placement**"

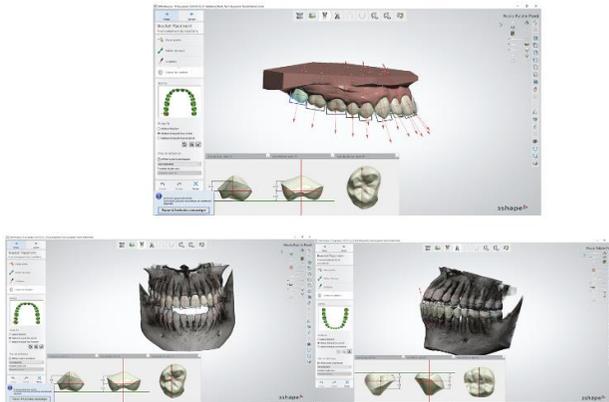


- a. Ne pas utiliser le placement automatique des brackets : peu de contrôle
- b. Réaliser les différentes étapes :
 1. Placer les **plans d'occlusion et sagittal**
 2. Réaliser la **découpe des dents** : bien se positionner perpendiculaire à la face occlusale
+ Positionner les différents points de repère anatomiques sur chaque dent



3. Faire attention à **bien positionner l'axe de la dent**, car les brackets vont être placés en fonction de cet axe (c'est à cette étape qu'on peut se servir du CBCT pour vérifier l'axe de la racine)
4. Vérifier dans le sens du tip et du torque

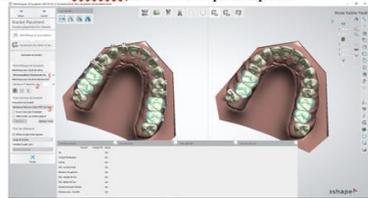
2



c. Sélectionner la forme d'arcade idéale



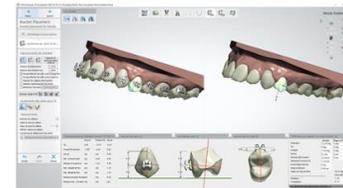
d. Sélectionner les brackets souhaités et prescription



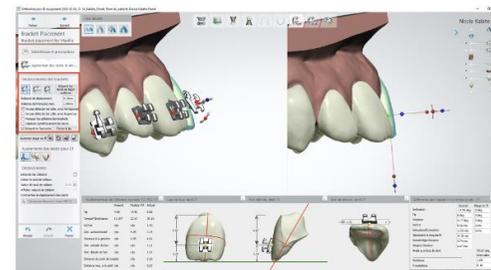
1. Sélectionner les brackets de 5 à 5
2. Mettre les molaires en surbrillance et sélectionner les tubes
3. Appliquer la prescription souhaitée (hauteur de collage)

e. Modifier la position des brackets en fonction du set up

3

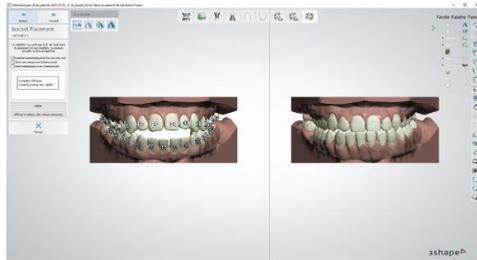


1. Utilisation recommandée du **tableau de contrôle** en bas à droite, qui permet un contrôle plus précis
2. Certains mouvements sont parfois bloqués :
 - Peut-être dû à une collision avec l'arcade antagoniste : cocher **Ne pas détecter les collisions avec l'antagoniste**
 - Peut-être dû à une collision avec la gencive : cocher **Ne pas détecter les collisions avec la gencive**
 - Peut-être dû à une collision avec une dent adjacente
 - Les corrections du torque peuvent être réalisées :
 - Permettre au **bracket** de se détacher de la dent « **Désactiver l'accrochage** »
 - Cela permet d'avoir une épaisseur de colle variable



6. Une fois satisfait de son collage indirect : **valider**

4

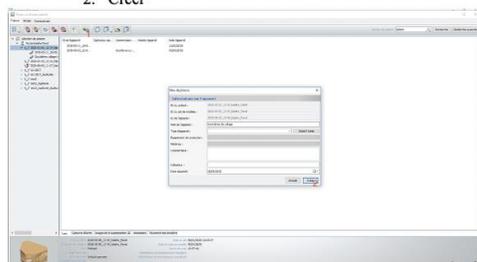


7. Imprimer les chartes/formes d'arcade utilisées
- Cliquer sur imprimer un rapport
 - Sélectionner **Indirect Bonding**
 - Imprimer le **.pdf**



Générer le fichier **.stl** des gouttières de collage

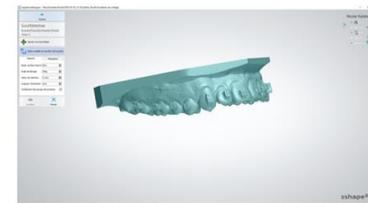
8. Ouvrir Appliance designer et retrouver son patient
- Créer un nouvel appareil
 - Créer



9. Création du **maître modèle de transfert** (fusion des **brackets** avec le modèle)

5

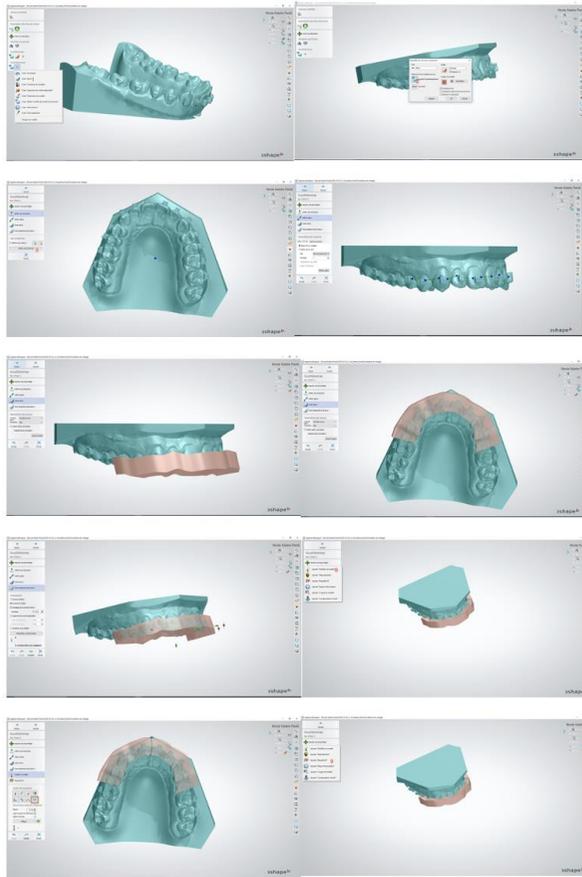
- Cliquer sur créer un nouvel appareil
- Sélectionner « **Créer maître modèle de transfert de brackets** »
- Sélectionner le modèle scanné (max ou **mand**)
- Et générer
- Paramètres de rétention** :
 - comblement des gorges des **brackets**,
 - valeur de rétention 0.10mm
 - valeur d'extension 1,5mm



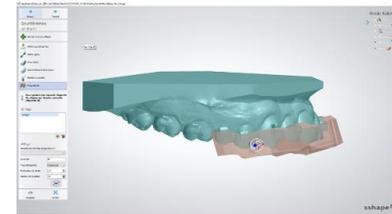
10. Créer la **gouttière de transfert** :

- Sélectionner **Créer une barre**
- Sélectionner le maître modèle créé et cliquer sur « OK »
- Déterminer l'**axe d'insertion**
- Tracer le spline** au niveau du quart supérieur des **brackets**
- Sélectionner "gouttière max" ou "gouttière **mand**"
- Harmoniser** la forme de la gouttière
- Finalisation : **soustraire modèle**, avec comme décalage de la surface interne 0.01mm
 - **Décocher 'supprimer les contre-dépouilles'**
- Possibilité de **marquer le milieu** (rayon 0,70mm)
 - Ajouter modifier modèle
- Possibilité d'ajouter des **Tags** (initiales du patient par exemple)
 - Texte ID : texte généré
 - Type d'étiquette : Integrated
 - Puis cliquer sur la gouttière pour générer le texte

6

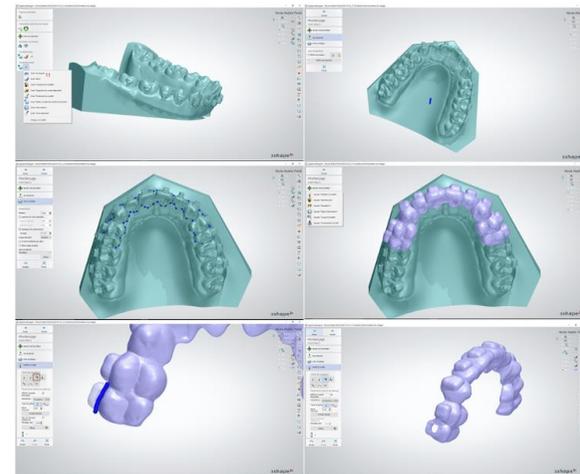


7



Générer les guides de mordançage

11. Sélectionne **Créer enveloppe**
12. Définir l'**axe d'insertion**
13. Tracer les **limites de la gouttière (spline)** doit faire un retour en lingual
14. Générer
15. Puis **découper chaque logement de bracket**.



8

Source : Auteur, 2020.

Vu, les Directeurs de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie

Professeur Elvire LE NORCY

Professeur Vianney DESCROIX

Docteur Nemrod SHAMRI

Vu, le Président d'Université Paris Cité

Professeur Christine CLERICI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Vianney DESCROIX

**Collage des attaches orthodontiques vestibulaires : une évolution logique
vers le collage indirect numérique ?**

Michel Khetsomphou. Collage des attaches orthodontiques vestibulaires : une évolution logique vers le collage indirect numérique ? 2023. 93 p. : ill., graph., tabl. Réf. bibliographiques p. 71-76.

Sous la direction de Mme le Professeur Elvire Le Norcy et M. le Docteur Nemrod Shamri

Université Paris Cité
UFR d'Odontologie
1, rue Maurice Arnoux - 92120 Montrouge
5, rue Garancière - 75006 Paris