

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
FACULTE DE SANTE – DEPARTEMENT D'ODONTOLOGIE

ANNEE 2024

2024 TOU3 3004

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Albane DAYONNET

Le 16 janvier 2024

**LES ALIGNEURS ORTHODONTIQUES : TECHNIQUES DE CONCEPTION
ET MATERIAUX POUR LA CONCEPTION DES ATTACHEMENTS**

Directeurs de thèse : Dr Thibault CANCEILL et Dr Pascal BARON

JURY

Président :	Pr Florent DESTRUHAUT
1 ^{er} assesseur :	Dr Pascal BARON
2 ^{ème} assesseur :	Dr Pierre-Pascal POULET
3 ^{ème} assesseur :	Dr Thibault CANCEILL



**UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER**



Faculté de santé
Département d'Odontologie

➔ **DIRECTION**

Doyen de la Faculté de Santé

M. Philippe POMAR

Vice Doyenne de la Faculté de Santé
Directrice du Département d'Odontologie

Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

Directeurs Adjoints

Mme Sarah COUSTY
M. Florent DESTRUHAUT

Directrice Administrative

Mme Muriel VERDAGUER

Présidente du Comité Scientifique

Mme Cathy NABET

➔ **HONORARIAT**

Doyens honoraires

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

Chargés de mission

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

➔ **PERSONNEL ENSEIGNANT**

Section CNU 56 : Développement, Croissance et Prévention

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

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

Professeurs d'Université : Mme Isabelle BAILLEUL-FORESTIER, M. Frédéric VAYSSE
Maîtres de Conférences : Mme Marie- Cécile VALERA, M. Mathieu MARTY
Assistants : Mme Anne GICQUEL, M. Robin BENETAH
Adjoints d'Enseignement : M. Sébastien DOMINE, M. Mathieu TESTE, M. Daniel BANDON

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Maîtres de Conférences : M. Pascal BARON, M. Maxime ROTENBERG
Assistants : M. Vincent VIDAL-ROSSET, Mme Carole VARGAS JOULIA, Mme Chahrazed BELAILI
Adjoints d'Enseignement : Mme. Isabelle ARAGON

56.02 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE (Mme Catherine NABET)

Professeurs d'Université : M. Michel SIXOU, Mme Catherine NABET, M. Olivier HAMEL, M. Jean-Noël VERGNES
Maîtres de Conférences : Mme Géromine FOURNIER
Adjoints d'Enseignement : M. Alain DURAND, Mlle. Sacha BARON, M. Romain LAGARD, M. Jean-Philippe GATIGNOL
Mme Carole KANJ, Mme Mylène VINCENT-BERTHOUMIEUX, M. Christophe BEDOS

Section CNU 57 : Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

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

PARODONTOLOGIE

Professeurs d'Université : Mme Sara LAURENCIN- DALICIEUX,
Maîtres de Conférences : Mme Alexia VINEL, Mme. Charlotte THOMAS
Assistants : M. Joffrey DURAN, M. Antoine AL HALABI
Adjoints d'Enseignement : M. Loïc CALVO, M. Christophe LAFFORGUE, M. Antoine SANCIER, M. Ronan BARRE ,
Mme Myriam KADDECH, M. Matthieu RIMBERT,

CHIRURGIE ORALE

Professeur d'Université : Mme Sarah COUSTY
Maîtres de Conférences : M. Philippe CAMPAN, M. Bruno COURTOIS
Assistants : M. Clément CAMBRONNE, M. Antoine DUBUC
Adjoints d'Enseignement : M. Gabriel FAUXPOINT, M. Arnaud L'HOMME, Mme Marie-Pierre LABADIE, M. Luc RAYNALDY,
M. Jérôme SALEFRANQUE,

BIOLOGIE ORALE

Professeurs d'Université : M. Philippe KEMOUN, M. Vincent BLASCO-BAQUE
Maîtres de Conférences : M. Pierre-Pascal POULET, M. Matthieu MINTY
Assistants : Mme Chiara CECCHIN-ALBERTONI, M. Maxime LUIS, Mme Valentine BAYLET GALY-CASSIT,
Mme Sylvie LE
Adjoints d'Enseignement : M. Mathieu FRANC, M. Hugo BARRAGUE, Mme Inessa TIMOFEEVA-JOSSINET

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

58.01 DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE, PROTHESES, FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX (M. Franck DIEMER)

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeur d'Université : M. Franck DIEMER
Maîtres de Conférences : M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN, Mme Delphine MARET-COMTESSE
Assistants : M. Nicolas ALAUX, M. Vincent SUAREZ, M. Lorris BOIVIN, Mme Laura PASCALIN, M. Thibault DECAMPS, Mme Emma STURARO, Mme Anouk FESQUET
Adjoints d'Enseignement : M. Eric BALGUERIE, M. Jean- Philippe MALLET, M. Rami HAMDAN, M. Romain DUCASSE,
Mme Lucie RAPP

PROTHÈSES

Professeurs d'Université : M. Philippe POMAR, M. Florent DESTRUHAUT,
Maîtres de Conférences : M. Antoine GALIBOURG,
Assistants : Mme Margaux BROUTIN, Mme Coralie BATAILLE, Mme Mathilde HOURSET, Mme Constance CUNY
M. Anthony LEBON
Adjoints d'Enseignement : M. Christophe GHRENASSIA, Mme Marie-Hélène LACOSTE-FERRE, M. Olivier LE GAC, M. Jean-Claude COMBADAZOU, M. Bertrand ARCAUTE, M. Fabien LEMAGNER, M. Eric SOLYOM,
M. Michel KNAFO, M. Victor EMONET-DENAND, M. Thierry DENIS, M. Thibault YAGUE,
M. Antonin HENNEQUIN, M. Bertrand CHAMPION

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

Professeur d'Université : Mr. Paul MONSARRAT
Maîtres de Conférences : Mme Sabine JONJOT, M. Karim NASR, M. Thibault CANCEILL, M. Julien DELRIEU
Assistants : M. Olivier DENY, Mme Alison PROSPER
Adjoints d'Enseignement : Mme Sylvie MAGNE, M. Thierry VERGÉ, M. Damien OSTROWSKI

Mise à jour pour le 01 Novembre 2023

Au président du Jury,

Monsieur le Professeur DESTRUHAUT Florent

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

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté de présider ce jury.

Votre pédagogie et vos enseignements ont été cruciaux tout au long de mon cursus.

Veillez agréer, monsieur, de l'expression de ma plus grande reconnaissance.

Au directeur de thèse,

Monsieur le Docteur BARON Pascal,

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie, - Docteur en Chirurgie Dentaire
- Docteur de l'Université Paul Sabatier
- MBH en Biomathématiques,
- Enseignant-chercheur au CNRS (UMR 5288) – Laboratoire d'Anthropologie, (équipe imagerie)
- Spécialiste qualifié en Orthopédie-Dento-Faciale,

Merci de m'avoir permis de connaître cette formidable spécialité qu'est l'ODF, je vous suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi ces dernières années, votre soutien est d'une grande importance pour moi.

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma reconnaissance et de mon profond respect.

A notre jury de thèse,

Monsieur le Docteur POULET Pierre-Pascal,

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie, - Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur de l'Université Paul Sabatier,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,
- Consul honoraire de la république de Roumanie,
- Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académique,
- Officier dans la réserve opérationnelle du service de santé des armées.

Nous vous remercions de siéger dans ce jury de thèse.

Nous sommes reconnaissants pour votre encadrement en clinique, merci pour votre bienveillance et votre sympathie. Je vous remercie de m'avoir soutenue et accompagnée durant ma sixième année.

Merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Au directeur de thèse,

Monsieur le Professeur CANCEILL Thibault

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie, - Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur en sciences des matériaux
- Master 1 Santé Publique :
- Master 2 de Physiopathologie
- CES Biomatériaux en Odontologie
- D.U.de conception Fabrication Assisté par ordinateur en Odontologie (CFAO)
- D.U. de Recherche Clinique en Odontologie
- Attestation de Formation aux gestes et Soins d'Urgence Niveau 2
- Secrétaire du Collège National des Enseignants en Fonctions-Dysfonctions, Imagerie, Biomatériaux

Je vous remercie sincèrement d'avoir accepté d'être mon directeur de thèse.

Je vous remercie pour votre disponibilité et pour votre soutien tout au long de mon cursus ainsi qu'au cours de la rédaction de cette thèse. Merci pour votre bienveillance dans la gestion conjointe des urgences dentaires et de la formation des externes à Rangueil.

*Merci pour votre gentillesse, votre franchise et vos précieux conseils.
Soyez assuré de ma gratitude et de mes amitiés sincères.*

Remerciements

Au premier Docteur Dayonnet, **Papou**, merci d'être un exemple pour moi, d'être toujours là pour moi, et merci pour tout ce que tu fais pour nous. Et à **Vivie**, merci pour toutes ces tartes tatin en PACES et les séances de sophrologie obligatoires qui m'ont, j'en suis sûre, permis d'en arriver là. Je vous aime.

À **Maman**, merci de m'avoir toujours soutenue et épaulée, de m'avoir motivée quand il le fallait, de nous avoir transmis tes valeurs et ton éducation, merci d'avoir fait de moi la femme que je suis aujourd'hui. Je t'aime. À **Éric**, merci d'être un super beau-père avec nous.

À **Lixou**, merci infiniment d'avoir toujours su m'écouter, d'avoir été là, merci de m'avoir supporté quand je venais dormir avec toi avant chaque concours en PACES, je suis fière d'être ta sœur jumelle, tu es une femme accomplie et extraordinaire, je t'aime. Et à mon autre sœur de cœur, **Camille**, notre petit triplé, merci d'être toi et merci de faire partie de ma vie.

À **François**, mon amour, merci de faire partie de ma vie, d'être mon pilier, de m'aimer comme je suis, si j'en suis là aujourd'hui c'est en grande partie grâce à ton soutien, merci d'être toi, je suis fière d'avancer dans la vie à tes côtés, je t'aime.

À **Titou**, merci d'être une grand-mère aussi forte et aimante que tu l'es, tu es un modèle pour nous, je t'aime. **Jérôme, Palou, Moune et Grand-Père**, merci d'avoir toujours été là pour nous, j'espère que vous rendre fiers depuis là-haut, vous me manquez. À ma marraine **Alexandra**, merci d'avoir toujours été là.

À **Louis, Marie, Mathilde, Emma et Ambre**, mes frères et sœurs par substitution, je vous aime, merci pour tous ces fous-rires et ces bons moments passés et à venir ensemble.

À tous mes amis de Muret, **Boris, Antho, Bryan, Dodo, Léa, Ben, Meilhon, Lucas, Lucie, Manon, Eva, Auréliane, Elyass**, merci pour toutes ces années passées et à venir à vos côtés. À **Fanny**, ma meilleure amie, merci de m'avoir aidé à devenir celle que je suis aujourd'hui.

À mes copines de fac, **Lucie, Romane L., Julia, Romane D., Juliette, Marie, Marine, Ingrid, Léna et Inès**, merci pour ces 5 belles années, et à tous mes autres copains de promo.

À **Docteur Baron**, et son équipe **Paula et Landry**, qui m'ont donné goût à l'orthodontie, merci de m'avoir accompagnée jusqu'ici, à **Thibault** et au docteur **Poulet**, qui m'ont énormément épaulée pendant mon cursus, je vous suis infiniment reconnaissante. Et à tous les professeurs de la faculté qui m'ont permis d'en arriver jusqu'à ce jour.

À mes amis du cheval, **Clémence, Andréa, Laura, Lou V, Marion, Mymy, Elise, Elsa, Claude, Loris, Marielle**, les **Alex, Lou N, Toto, l'équipe du CHF et de l'écurie du Bois Portier**, merci pour tous ces bons moments qui nous rassemblent autour de notre passion commune.

À mes copains de Toulouse, **Clara, Julien, Dodo, Arnaud, Lucas V, Lucas B, Djo, Clément R, PA, Alex, Melou, Clémentine** et à **Clément Delcamp**, merci pour tous ces repas, jeux, cluster et j'en passe.

À mes petits animaux, **Rio, Elisca, Rox, Onyx, Nutella et Carrera**, merci de m'apaiser au quotidien et merci pour tout l'amour que vous m'apportez.

Table des matières

Introduction	12
Chapitre 1 : Historique et description des aligneurs et attachements utilisés en orthopédie-dento-faciale.....	13
A. Historique et évolution des aligneurs orthodontiques.....	13
B. Intérêts et description des aligneurs orthodontiques	15
C. Indications et contre-indications des traitements par aligneurs	19
a) Indications	19
b) Contre-Indications et limites du traitement par aligneurs	21
D. Importance des attachements vestibulaires et linguaux/palatins dans le traitement orthodontique.....	24
a) L'effet de moulage de la forme	25
b) Éléments auxiliaires.....	25
E. Principes mécaniques généraux des mouvements dentaires	26
a) La version.....	27
b) La translation	28
c) L'égression et l'ingression.....	29
d) La rotation	29
e) Le mouvement de torque.....	30
F. Types d'attachements utilisés dans l'orthodontie pour les aligneurs... 31	
G. Rôle et biomécanique des attachements pour les aligneurs.	33
H. Systèmes de fabrication des aligneurs : industrielle, de laboratoire ou en cabinet spécialisé.	35
a) Fabrication industrielle.....	36
b) Fabrication au laboratoire de prothèse.....	38
c) Fabrication au cabinet spécialisé.....	38
Chapitre 2 : Matériaux utilisés pour les attachements.	40
A. Présentation des différents matériaux disponibles pour la réalisation des attachements.....	40
a) Les différents systèmes adhésifs présents sur le marché.....	40
b) Les matériaux présents sur le marché permettant de créer des rétentions orthodontiques	43
B. Propriétés et caractéristiques de chaque matériau (ex. : résistance, biocompatibilité, durabilité, esthétique).	45
a) Les résines composites	45

b) Les ciments de verre ionomères.....	49
C. Avantages et inconvénients de chaque matériau en termes d'utilisation avec les aligneurs.	52
<i>Chapitre 3 : Recommandations et lignes directrices pour le choix et l'utilisation des attachements.....</i>	53
A. Critères de sélection des matériaux en fonction des besoins du patient et du traitement orthodontique.	53
B. Considérations cliniques pour la conception et la mise en place des attachements.	54
C. Recommandations pour l'entretien et le suivi des patients portant des attachements.	56
<i>Conclusion</i>	58
<i>Table des figures</i>	60
<i>Bibliographie et Références</i>	61

Introduction

Mis au point dans les années 1990, les aligneurs orthodontiques connaissent une utilisation exponentielle ces dernières années dans un contexte social de plus en plus axé sur l'esthétisme et la discrétion des procédures médicales (chirurgie esthétiques, alignement, éclaircissement etc...).

Leur utilisation requiert des rétentions collées sur les dents (qu'elles soient en vestibulaires ou en lingual/palatin) afin de stabiliser le dispositif et de permettre et de préciser les mouvements des dents. Les informations concernant le déplacement à produire se trouvent au sein même du matériau thermoplastique composant l'aligneur.

Dans la logique de discrétion et d'esthétique recherchées dans l'utilisation d'aligneurs, ces rétentions doivent répondre à un cahier des charges qui intègre cette notion d'esthétisme tout en présentant une résistance suffisante aux contraintes lors de la pose et de la dépose de l'aligneur plusieurs fois par jour.

Il existe aujourd'hui de multiples matériaux permettant des reconstitutions dentaires dans le domaine de l'omnipratique comme par exemple les résines composites ou les ciments de verre ionomères pour la réhabilitation en méthode directe.

Cependant, force est de constater qu'il n'existe aujourd'hui pas ou peu de consensus précis de matériaux de restaurations pouvant être adaptés à l'indication de rétention dans le domaine de l'orthodontie.

Il n'existe pas à notre connaissance de revues de littérature abordant la thématique des différents matériaux pour concevoir les rétentions pour aligneurs en orthodontie.

L'objectif de cette thèse est donc de réaliser un état des lieux des matériaux utilisables en orthodontie pour la réalisation de rétentions pour aligneurs.

Chapitre 1 : Historique et description des aligneurs et attachements utilisés en orthopédie-dento-faciale.

A. Historique et évolution des aligneurs orthodontiques.

L'arrivée des traitements orthodontiques par aligneurs orthodontiques a révolutionnée l'orthopédie dento-faciale ces dernières années permettant de traiter une grande partie des malocclusions(1). En effet, aujourd'hui les aligneurs, combinés à d'autres techniques orthodontiques ou seuls, permettent de traiter des malocclusions sévères contrairement à leur utilisation plus ancienne restreinte à des corrections légères de déplacements post-orthodontie(2).

Il existe cependant certains systèmes d'aligneurs qui restent délibérément limités à la correction de légères irrégularités de position, tandis que d'autres prétendent également cibler des malocclusions complexes

Le terme de Thérapie par Aligneurs englobe une large gamme d'appareils avec des modes d'action, des méthodes de construction et une applicabilité différente(3).

Tous utilisent des aligneurs en polyuréthane thermoformé transparent couvrant plusieurs ou toutes les dents, mais à partir de ce point commun, il existe des différences majeures qui influent sur la capacité de chaque système à traiter un large panel de malocclusions (3).

Ils ont été de plus en plus utilisés ces 10 dernières années par les patients adultes pour leur avantage esthétique majeur, leur facilité d'entretien et leur facilité de mise en place et de retrait (4).

Les traitements orthodontiques par aligneurs sont utilisés depuis plus de 90 ans. Au commencement ce système avait pour but de positionner les dents maxillaires par rapport à leurs homologues mandibulaires (2).

Remensyder en 1923 les décrivait comme un appareil en caoutchouc à effet de masse que plus tard il fera breveter comme appareil orthodontique permettant de déplacer les dents avec des mouvements mineurs(4).

Kesling (TP orthodontics) en 1946 faisait breveter un appareil réalisé comme un négatif d'un modèle permettant de déplacer les dents par utilisations successives si l'étendue du mouvement dépassait la capacité d'une seule gouttière.

EN 1996 des chercheurs comme Alcaniz et Hemayed décrivaient l'utilisation des techniques de CFAO (conception fabrication assistée par ordinateur) pour créer des sets up informatisés à des fins diagnostiques et thérapeutiques.

En 1998, Align Technology développait « Invisalign » et commercialisait pour la première fois des gouttières réalisées par techniques CFAO(5,6).

Bien que l'introduction formelle des aligneurs transparents dans l'arsenal orthodontique remonte à l'approbation par la FDA en 1998 de l'utilisation d'Invisalign par Align Technology à des fins orthodontiques, la technologie a clairement été utilisée au moins depuis 1946, sous des formes modifiées, au moins depuis le Positionneur Dentaire du Dr Harold Kesling en 1946 (3).

Aujourd'hui il existe sur le marché un nombre important de sociétés proposant des traitements par aligneurs, qu'ils soient réservés aux spécialistes en orthodontie ou aux omnipraticiens. Une recherche sur Google à la fin de l'année 2015 a révélé environ 27 produits d'aligneurs transparents différents disponibles (3), aujourd'hui le nombre de propositions sont encore plus importantes avec de nouvelles marques sur le marché mondial.

L'évolution des systèmes d'orthodontie par aligneurs a amené les praticiens spécialistes à développer leur propre système d'aligneurs grâce à des logiciels spécialisés de planification, des scanners intra-oraux et des imprimantes 3D. Cela permettant d'imprimer des modèles en résine et d'utiliser un système de thermoformage ou directement de réaliser l'impression des gouttières au cabinet, afin de s'affranchir des délais de livraisons des entreprises et de gérer les cas de façon les plus précises directement au cabinet.

B. Intérêts et description des aligneurs orthodontiques

Un aligneur est une gouttière transparente amovible réalisée en polymère thermoformable, il permet de déplacer les dents de l'arcade par des mouvements de faible amplitude(7).

L'utilisation des aligneurs pour un traitement orthodontique ne remplace pas la nécessité de réaliser un diagnostic orthodontique traditionnel. Ce dernier engendre une synthèse diagnostique qui permettra d'établir des objectifs de traitement, conduisant ainsi à l'élaboration d'un plan de traitement (7).

Les aligneurs sont réalisés après un diagnostic complet via examen endo et exo-buccal, analyses radiographiques (panoramique et céphalométrie), empreinte physique ou optique (via un scanner intra-oral) des arcades du patient, prise de photographies (exo (face et profil) et endo-buccales (intra et inter-arcades). Comme énoncé précédemment, les empreintes sont soit directement envoyées au laboratoire spécialisé qui réalisera lui les set-ups diagnostics (il s'agit d'une simulation tridimensionnelle d'un plan de traitement, faite à partir d'un enregistrement des arcades dentaires et de l'occlusion, qui peut être réalisé au cabinet ou à l'aide de systèmes commerciaux. Le Set-Up sert au diagnostic et à la construction du plan de traitement, étapes essentielles pour le succès d'un traitement orthodontique)(8).

Ainsi, une série de gouttières est proposée aux patients. Elles permettent d'effectuer des mouvements dentaires plus ou moins importants, en fonction du plan de traitement envisagé.

Avant la pose de la première gouttière, le plus souvent, une gouttière dite « Template » permet la mise en place des rétentions sur les dents.

Après application d'un adhésif sur les dents concernées, un schéma indiquant sur quelles dents doivent se trouver les rétentions (Figure 1) permet d'introduire dans le Template la résine composite qui servira de moulages directement en bouche des rétentions.

Leur photopolymérisation se fait une par une.

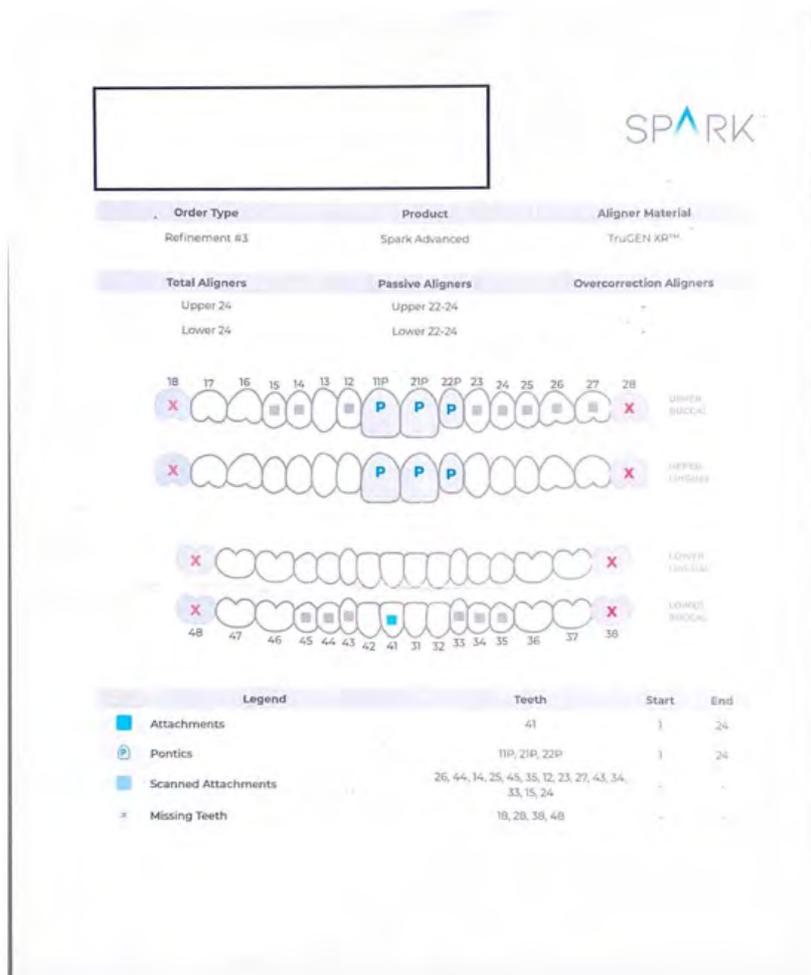


Figure 1 : Schéma indiquant la position des attachements sur les dents

Néanmoins, à chaque étape du traitement, une empreinte est nécessaire pour confectionner un nouveau set-up et, ainsi, qu'une nouvelle série d'aligneurs qui sera modifiée par le praticien selon le plan de traitement (7).

Les étapes classiques retrouvées(9) lors d'un traitement par aligneurs orthodontiques sont :

- Consultation initiale
- Diagnostic orthodontique complet et plan de traitement
- Simulation du résultat escompté (ClinChek, Invisalign®) et présentation au patient
- Mise en place des attachements grâce au Template, puis mise en bouche des premières gouttières. Le port de chaque gouttière est variable en fonction du type de système choisi mais aussi du type de mouvements à réaliser lors de chaque étape
- En fonction de la difficulté du traitement, des contrôles réguliers sont mis en place, afin de vérifier l'absence de mouvements parasites, ou de perte d'un taquet de rétention.
- Contrôle de la situation intermédiaire après la fin du premier set de gouttières, afin de contrôler la nécessité d'une phase de finitions du traitement.
- Phase de contention, collage d'une contention mandibulaire fixe de canine à canine le plus souvent avec port d'une gouttière de contention nocturne au maxillaire.

Les traitements par aligneurs offrent certains avantages par rapport aux traitements orthodontiques traditionnels avec appareils fixes. Cela inclut :

- moins d'urgences cliniques.

- une amélioration de l'esthétique grâce aux matériaux transparents. Il est également possible de réaliser un « espace pontique », c'est-à-dire une dent en résine composite intégrée dans l'aligneur, remplaçant une dent manquante. L'amélioration de l'esthétique permet l'acceptabilité par le patient, l'esthétique étant conditionnée par la transparence du matériau(6).

- une amélioration du confort qui passe par l'amovibilité du traitement (les aligneurs sont des dispositifs orthodontiques amovibles, en effet, leur insertion/désinsertion est facile. Lors d'occasions spéciales, il est possible de s'en affranchir provisoirement) mais aussi la fabrication sur mesure qui permet une adaptation parfaite aux dents jusqu'à la limite gingivo-dentaire(6).

- une hygiène buccale facilitée, un respect de la santé parodontale et l'absence d'irritation des tissus mous(10).

- moins de douleurs lors de l'insertion, qui disparaissent en général en 2 à 3 jours (6).

C. Indications et contre-indications des traitements par aligneurs

a) Indications

Traitements facilement réalisables par aligneurs	Traitements difficilement réalisables par aligneurs
<i>Encombrements et diastèmes de 1 à 5 mm, Traitement des cas d'encombrement mandibulaire avec extraction d'incisives ou de prémolaires</i>	<i>Encombrements et diastèmes > 10 mm</i>
<i>Décalage antéropostérieur < 4mm</i>	<i>Décalage antéropostérieur > 5 mm</i>
<i>Expansion vestibulaire ou linguale de 2 à 4 mm et traitement des inversés d'articulés faibles</i>	<i>Version dentaire > 45°</i>
<i>Mouvements verticaux < 5 mm</i>	<i>Mouvements verticaux >5mm</i>
<i>Rotation limitée <20°</i>	<i>Rotation > 30 °</i>
<i>Mouvements faibles ou modérés de racines</i>	<i>Mouvements importants des racines</i>

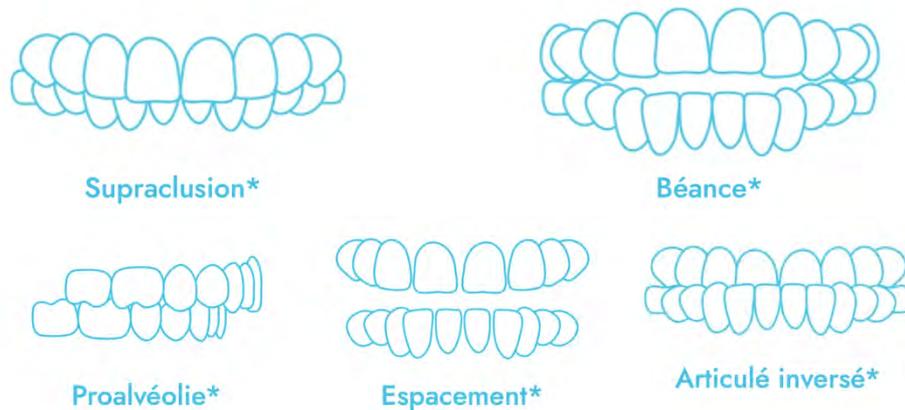
Figure 2 : Tableau : Type de traitements réalisables par aligneurs orthodontiques

Source(11) : Corbin, « Thérapeutique orthodontique par aligneurs, une alternative pertinente aux systèmes fixes multi-attaches ? », 2010

Les différentes indications(7) (12) des aligneurs retrouvées dans la littérature sont :

- Correction de décalages sagittaux avec mouvements dentaires de distalisation /mésialisation : classes I, II et III d'Angle
- Diastèmes dentaires
- Encombrement dentaire
- Traitements orthodontiques avec ou sans extractions
- Préparations d'un traitement ortho-chirurgical
- Correction de décalages transversaux : endo/exo-position +/- inversé d'articulé-malpositions dentaires : versions, rotations, encombrements
- Préparation pré-prothétique ou pré-implantaire
- Corrections de décalages verticaux : ingression, égression, infracclusion, supracclusion
- Mouvements secondaires à des parodontopathies traitées - canines incluses
- Pro-alvéolie
- Béance
- Récidives de traitements orthodontiques
- Patients porteurs de nombreuses prothèses fixes sur lesquelles le collage de brackets est compliqué et peu pérenne
- Patients atteints de bruxisme puisque les aligneurs réduisent les inconforts myofaciaux liés aux serremments et grincements des dents.
- Patients présentant un risque carieux élevé, ou des défauts amélaire contre-indiquant le collage de brackets (7).

Figure 3 : Exemple d'indications des aligneurs orthodontiques, SPARK®



b) Contre-Indications et limites du traitement par aligneurs

Causes des limites(13) dans l'utilisation des aligneurs orthodontiques :

o Dues au patient :

- **Âge :** Patients trop jeunes pour comprendre et coopérer.
- **Problèmes médicaux :** État de santé défavorable, notamment chez les patients handicapés sévères physiques ou mentaux, ou présentant des démences, pouvant entraîner un manque de suivi du traitement, la perte des aligneurs, etc.
- **Profil psychologique :** Patients dépressifs ou non coopérants.
- **Hygiène insuffisante :** Présence de maladies carieuses ou parodontales actives, risque d'accroître les lésions déjà présentes.
- **Tabagisme**
- **Cas d'allergie ou d'intolérance au matériau**

○ Dues à l'anatomie/morphologie dentaire :

- **Dents courtes** : L'aligneur peut ne pas être assez rétentif sur les dents, limitant ainsi les déplacements dentaires souhaités en raison d'une surface limitée. Les taquets ne peuvent pas toujours le compenser.
- **Particularité anatomique des dents rondes ou riziformes** : Moins de contacts entre les dents et l'aligneur, entraînant un manque d'adhérence dans l'aligneur.
- **Antécédents de résorptions radiculaires ou racines courtes** : Risque accru chez certains patients.
- **Dents nécessitant des soins** : Présence de caries ou d'autres problèmes dentaires nécessitant une attention particulière.
- **Dents incluses** : Difficulté à appliquer correctement les aligneurs sur les dents incluses.
- **Édentements de grande étendue** : Fragilité des aligneurs et risque élevé de fracture dans ces cas cliniques.

○ Dues aux mouvements dentaires à réaliser et à la position des dents :

- **Ingressions ou égressions importantes** : Des mouvements dentaires trop importants peuvent poser des problèmes limitant ainsi d'action des aligneurs(14)
- **Axes contraignants** : Certains axes, telles que des versions mésiales ou distales, palatoversions ou torque trop important peuvent entraver l'insertion de l'aligneur par contre-dépouille trop importante.

○ Dues aux malformations squelettiques :

- **Expansion transversale importante** : Difficulté à réaliser des expansions significatives.
- **Insuffisance/excès vertical marqué** : Notamment les infraclusions ou supraclusions importantes, nécessitant des ajustements tels que des ingressions en masse ou des égressions importantes.
- **Grands décalages antéro-postérieurs (Classe II ou III de Balard)** : Difficulté à corriger ces décalages, notamment le recul en masse qui peut être complexe.

Cependant, les mouvements d'extrusion semblent être les mouvements les moins précis et les plus compliqués à obtenir avec des techniques d'aligneurs, ce manque d'efficacité peut provenir d'une limitation de l'appareil à développer une force utile pour extruder de manière significative la dent.

Une évaluation de la littérature montre que l'efficacité des aligneurs tourne autour de 50%, ce résultat provient du fait que les dents peuvent paraître facilement déplaçables sur les logiciels mais que ce n'est pas toujours le reflet de la réalité(13) .

De plus, une dégradation de la structure moléculaire du polymère utilisé pour réaliser l'aligneur peut entraîner une diminution de l'efficacité des forces orthodontiques délivrées.

Certaines revues de littérature ne recommandent pas les traitements par aligneurs pour traiter des défauts d'occlusion importants, et semblent être recommandés plutôt pour des malocclusions qualifiées de simples(15)(16).

D. Importance des attachements vestibulaires et linguaux/palatins dans le traitement orthodontique.

Certains systèmes d'aligneurs incorporent l'utilisation d'attachements en résine collés aux dents pour élargir la portée du traitement par aligneur afin de couvrir des mouvements autrement considérés comme difficiles ou impossibles à réaliser pour le traitement par aligneurs (3).

Ces attachements servent à limiter le glissement de certaines dents en dehors de la gouttière et ne migrent vers l'intérieur de la crête alvéolaire (15).

Elles permettent de mieux guider les dents pendant le traitement afin de transmettre plus sélectivement les forces grâce à leur surface active.

Comment les aligneurs permettent-ils le déplacement des dents ?

Fondamentalement, le mouvement des dents est une interaction entre les contraintes créées entre l'aligneur et le complexe biologique constitué par l'os alvéolaire et le ligament parodontal. Afin de déplacer les dents sans créer de lésions, l'aligneur doit maintenir des niveaux acceptables de contraintes tout au long du traitement (13).

Le traitement orthodontique à l'aide d'aligneurs implique un déplacement progressif des dents au moyen de plusieurs aligneurs successifs, chacun réajustant graduellement la position des dents par de petites quantités (6).

Ce déplacement progressif est accompli à travers deux mécanismes principaux (3) : de moulage de la forme et les éléments auxiliaires :

a) L'effet de moulage de la forme

Cette approche a été la principale méthode de mise en œuvre de la force depuis l'introduction du traitement par aligneurs transparents. Elle consiste à "mouler" le déplacement des dents cibles en fonction de la forme de l'aligneur utilisé.

Des divergences prédéfinies (activation) entre la forme de l'aligneur et la géométrie de la couronne dentaire génèrent des systèmes de force tridimensionnels répartis sur toutes les surfaces de contact.

Des zones de contact étroit et de soulagement sont ainsi créées entre l'aligneur et la surface de la dent. Un traitement complet comprend une série d'aligneurs dont les formes varient séquentiellement, passant de la géométrie anatomique initiale aux positions finales des dents.

Les forces délivrées aux dents sont produites par le retour à la position neutre de la gouttière initialement introduire en force, la quantité du déplacement est située entre 0,25mm et 1mm selon les fabricants (6). Ces forces peuvent aussi être déterminées par l'orthodontiste en fonction de la difficulté des mouvements à réaliser.

b) Éléments auxiliaires

Des éléments auxiliaires tels que les rétentions sont intégrés pour améliorer la prévisibilité de mouvements spécifiques des dents. Leur disposition stratégique dans les aligneurs ou sur les dents vise à optimiser la distribution des forces. Ces éléments sont utilisés de manière réfléchie pour appliquer des forces à des zones spécifiques de la surface dentaire (3).

Cependant, la contrainte exercée par l'effet de moulage sera significativement inférieure à la contrainte exercée via une attache pour le même système de force, car la transmission par l'effet de moulage implique une plus large surface comparée à une attache.

Grâce à une compréhension approfondie des principes de la biomécanique, l'orthodontiste peut effectuer différents types de mouvements, notamment la version, l'égression, la rotation, le torque, la translation et l'ingression, ces mouvements sont facilités par la mise en place de ces attachements sur les faces vestibulaires et linguales/palatines des dents.

Un aligneur peut induire un mouvement dentaire selon deux approches distinctes : celle des déplacements dirigés et celle des forces dirigées. Dans la première approche, l'aligneur est conçu en fonction de l'emplacement souhaité après le mouvement, tandis que dans la seconde, l'aligneur émet des forces spécifiques pour déplacer la dent. Des logiciels peuvent être utilisés pour ajouter des auxiliaires à l'aligneur, augmentant ainsi son efficacité et permettant un contrôle précis des mouvements dentaires. Ces auxiliaires et leurs conséquences biomécaniques seront détaillés dans la suite de ce travail (4),(17).

E. Principes mécaniques généraux des mouvements dentaires

Les mouvements recherchés par le biais des traitements orthodontiques, qu'ils soient réalisés par aligneurs ou traitements multi-attaches :

Les mouvements dentaires provoqués sont très lents, les principes mécaniques s'appliquent aux traitements orthodontiques(18).

La notion de force et de couple de force est importante à définir. En effet, la force est définie comme une action mécanique visant à déformer un corps ou modifier la quantité de mouvement de ce corps, c'est à dire provoquer son déplacement.

Les forces peuvent être appliquées de façon continue, discontinue ou intermittente.

Le centre de résistance d'une dent est défini lorsque la dent est placée dans le milieu osseux, le centre de résistance est le point par lequel doit passer la ligne d'action d'une force appliquée à une dent pour obtenir un mouvement de translation pure de cette dent (17).

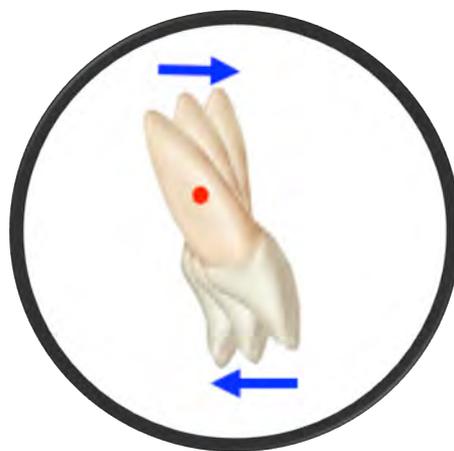
La localisation de ce centre de résistance dépend alors : des caractéristiques de la dent et du milieu, dans ce cas l'état du parodonte (hauteur et densité de l'os alvéolaire).

Le centre de rotation d'une dent est le point autour duquel tourne un solide si on lui applique une force qui ne passe pas par son centre de résistance, il est n'est pas obligatoirement situé sur la dent et dépend du système de force.

a) La version

La version, également appelée "*tipping*" dans la littérature anglo-américaine, est le mouvement le plus simple à obtenir. Il implique l'application d'une force à un point de la couronne en direction mésiale, distale, vestibulaire ou linguale. La racine et la couronne se déplacent en même temps mais en sens inverse, aboutissant à un mouvement de bascule autour du centre de résistance ou hypomochlion.

Figure 4 : Mouvement de version

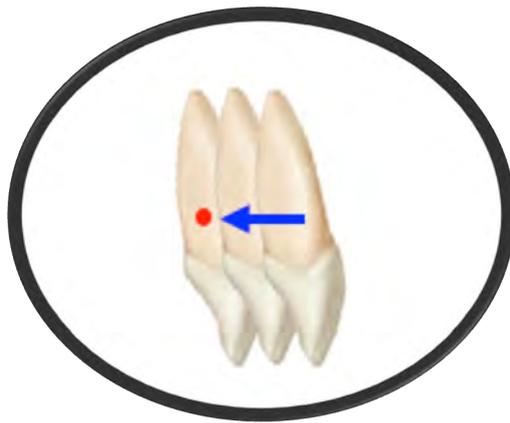


Source : Lemay, Déplacements des dents en orthodontie, 2018

b) La translation

La translation consiste au déplacement de la dent parallèlement à son grand axe, souvent appelé "*bodily movement*" par les anglo-saxons. Ce mouvement nécessite l'application d'un système de forces au niveau de la couronne, dont la résultante passe par le centre de résistance. Le centre de rotation se situe à l'infini (en apical).

Figure 5 : Mouvement de translation



Source : Lemay, Déplacements des dents en orthodontie, 2018

c) L'égression et l'ingression

L'égression : Mouvement physiologique se produisant spontanément au niveau des dents sans antagonistes, tendant à sortir de l'alvéole.

L'ingression : Mouvement visant à enfoncer la dent dans l'alvéole, nécessitant une force axiale de direction apicale. Il peut entraîner des résorptions osseuses et radiculaires, en particulier au niveau des incisives latérales supérieures.

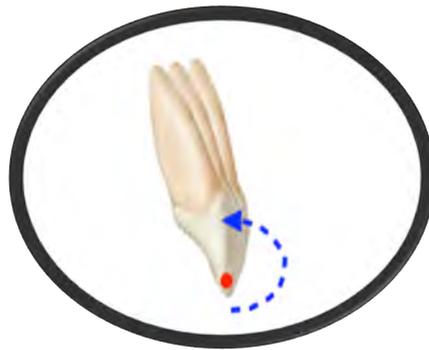
d) La rotation

La rotation peut être axiale ou marginale, impliquant un couple de forces appliqué sur la couronne dans un plan perpendiculaire au grand axe de la dent. Ce mouvement dépend du facteur anatomique, de la contention et est sujet aux récives.

e) Le mouvement de torque

Le mouvement de torque est une rotation dans le sens vestibulo-lingual autour d'un axe mésio-distal, nécessitant l'application d'un couple de forces en un point de la couronne. Ce mouvement peut entraîner des contraintes accrues au niveau de l'apex, pouvant conduire à des résorptions radiculaires. Le centre de rotation se situe au niveau du bord libre.

Figure 6 : Mouvement de torque



Source : Lemay, Déplacements des dents en orthodontie, 2018

F. Types d'attachements utilisés dans l'orthodontie pour les aligneurs

Les aligneurs ont la capacité d'engager simultanément les faces vestibulaires, linguales/palatines et occlusales des dents. Cette capacité des aligneurs leur permet d'appliquer des forces de compression dans toutes les directions. Cependant, les couronnes des dents ne sont pas des structures symétriques, cela crée une distribution asymétrique des forces. L'intérêt de zones de pression ajoutées aux aligneurs permet est de créer une force supplémentaire afin de rediriger la force de compression à travers le centre de résistance de la dent (3).

Les principales formes d'attachements retrouvées dans la littérature sont les formes rectangulaires et ellipsoïdales (Figure 7).

Ces 3 types de formes ont différents rôles : l'ellipsoïdal principalement pour la rétention, le rectangulaire pour le contrôle du mouvement des racines et l'hémi-ellipsoïdal pour la dérotation(2).

Invisalign® a vu son système évoluer au cours des années en proposant des géométries variables pour les rétentions, permettant un contrôle des mouvements de version, égression et rotation(9).

Le système Orthocaps®, lui, propose des surfaces de frictions multidirectionnelles spécifiques permettant un guidage des mouvements dans plusieurs directions de l'espace.

Le type d'attachement intervient sur la prédictibilité du mouvement orthodontique (13).

Le système Invisalign® permet par exemple le contrôle du nombre, du type et de la position des attachements par le praticien

Ce système propose deux types d'attachements, conventionnels et optimisés. Ceux-ci sont conseillés et mis en place par le logiciel afin de permettre d'améliorer certains mouvements dentaires (11)(2).

Les attachements peuvent être actifs ou simplement permettre l'immobilité de la gouttière sur les arcades.

Ces attachements peuvent de même être placés en vestibulaire ou en lingual/palatin.

Figure 7 : Exemples d'attachements utilisés en fonction du mouvement recherché

Gamme de taquets optimisés et conventionnels		
SITUATION	TAILLE PAR DÉFAUT ET POSITION	EXEMPLES
Contrôle radiculaire des incisives maxillaires centrales et latérales	Taquets optimisés de contrôle radiculaire : sur les incisives latérales, un taquet vestibulaire jusqu'à deux points de pression si nécessaire	
Contrôle radiculaire des canines et des prémolaires	Taquets optimisés de contrôle radiculaire : sur les prémolaires, deux taquets vestibulaires (si l'espace le permet) ou un taquet et un point de pression	
Mouvements dans plusieurs plans des incisives latérales maxillaires	Taquets optimisés avec plusieurs fonctionnalités : un taquet optimisé sur la face vestibulaire et un point de pression du côté lingual (si nécessaire)	
Canines et prémolaires en rotation	Taquets optimisés de rotation	
Égression d'une dent et d'un groupe de dents	Taquets optimisés d'égression	
Extractions de prémolaires et fermeture de l'espace	Taquets optimisés de contrôle radiculaire sur la canine et taquet rectangulaire vertical de 1 mm placé sur les deux dents adjacentes au site d'extraction	
Extraction d'une incisive mandibulaire et fermeture de l'espace	Taquet vertical rectangulaire de 1 mm placé sur les deux dents adjacentes au site d'extraction	
Ingression antérieure sans prémolaire en rotation	Taquet horizontal biseauté en occlusal, placé bilatéralement sur la première prémolaire de chaque quadrant	
Ingression antérieure avec prémolaire en rotation	Taquet horizontal biseauté en occlusal : taquet optimisé appliqué sur les premières prémolaires qui sont en rotation, si toutes les deux sont en rotation aucun taquet de contention n'est nécessaire	

Source : Sandra Tai, « Orthodontie Invisible : guide clinique des traitements par aligneurs », 2018

G. Rôle et biomécanique des attachements pour les aligneurs.

Plusieurs auteurs indiquent que les aligneurs ont tendance à déplacer les dents pour réaliser un mouvement de bascule plutôt en les poussant qu'en les tirant.

Ces mouvements nécessitent un contact étroit entre l'aligneur et la dent (13).

Les attachements peuvent aussi servir à maintenir l'aligneur en place lors de mouvements comme l'ingression car il se réalise le plus souvent avec des vis de traction pouvant provoquer des mouvements des aligneurs (7).

La continuité entre la surface de la dent et l'aligneur permet une distribution uniforme des forces appliquées et un contrôle précis du mouvement.

Figure 8 : Exemple d'application des forces sur les attachements

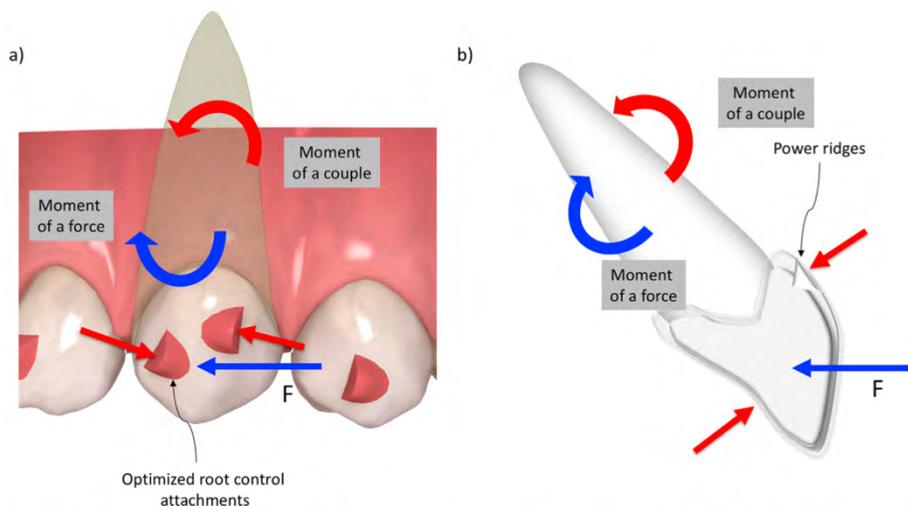


Fig. 4. Controlling root movement during space closure: (A) Attachments for applying moment of a couple in the second order. (B) Third-order control achieved with the help of "power ridges."

Source : "Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principle" Madhur Upadhyay,

Sarah Abu Arqub

Les attachements doivent être positionnés à distance de la gencive marginale afin d'obtenir un ancrage suffisant et une adaptation correcte de l'aligneur (7).

- **Les attachements ovoïdes**, peuvent être utilisés afin de réaliser des mouvements d'égression. Ceux-ci sont plus discrets que des **attachements rectangulaires horizontaux** qui sont aussi utilisés pour réaliser ces mouvements.(19) (20)

La correction des béances profondes peut être obtenue par l'extrusion des dents postérieures. Des rétentions collées ovoïdes peuvent être ajoutées à la surface palatine des incisives maxillaires et des canines près du cingulum, permettant la désocclusion des dents postérieures pour encourager l'extrusion (14).

- **Les attachements rectangulaires verticaux** sont le plus souvent utilisés pour des mouvements de rotation mais aussi les mouvements de translation par exemple lors d'espace créés par des extractions.

- **Les attachements optimisés** peuvent par exemple permettre les corrections des axes radiculaires et des mouvements de version.

De nombreuses études ont montré que les attachements d'aligneurs augmentent l'efficacité des traitements orthodontiques par aligneurs, permettant de réaliser des rotations, le torque des racines, et des déplacements mésio-distaux, mais aussi qu'ils étaient importants pour augmenter l'ancrage postérieur(21).

Les attachements de forme rectangulaire horizontale et optimisés montrent les meilleurs résultats pour l'ancrage postérieur (21).

De nouvelles études sont nécessaires sur l'influence du type de rétentions sur les mouvements orthodontiques car la littérature n'est pas assez claire à ce sujet.

H. Systèmes de fabrication des aligneurs : industrielle, de laboratoire ou en cabinet spécialisé.

Le traitement par aligneurs est particulièrement sujet à des changements technologiques rapides qui affectent les matériaux des aligneurs, la conception des appareils et la fabrication (3).

La création des aligneurs orthodontiques provient de l'utilisation des positionneurs dentaires, appareil introduit pour la première fois par TP Orthodontics en 1945, mais aussi des aligneurs à ressort pour l'alignement dentaire utilisés par les orthodontistes depuis de nombreuses décennies.

Ces aligneurs ont récemment été combinés avec les progrès des matériaux thermoplastiques transparents et la technologie informatique (CAO-CFAO, stéréolithographie et logiciels de simulation du mouvement dentaire) :

- Le CAD-CAM (computer-aided design and computer-aided manufacturing) qui permet la numérisation par tomographie des empreintes (prise une seule fois avant le début du traitement et le long des étapes intermédiaires du traitement) afin d'obtenir un set-up en 3D et ainsi prévisualiser virtuellement la totalité du traitement étape par étape(22).

- La stéréolithographie (imprimante 3D) de résine liquide à visée industrielle qui permet la fabrication de modèles, par la conception assistée par ordinateur, pour réaliser ensuite une série d'aligneurs à partir de leurs images 3D(7).

Pour chaque aligneur, des modèles physiques (22) sont fabriqués par procédure de CFAO sur lesquels sont comprimés les plaques transparentes de polyuréthane ou polypropylène transparentes(23) par procédé de thermoformage puis découpées au niveau de la ligne du collet des dents.

Cependant, le mode de fabrication par les procédés de stéréolithographie des modèles pour chaque aligneur crée un profil en escalier (par apposition de matière) à l'échelle microscopique.

Ceci affecte la précision tridimensionnelle et diminue l'efficacité de positionnement des aligneurs et donc influe directement sur la vitesse de déplacement des dents (6).

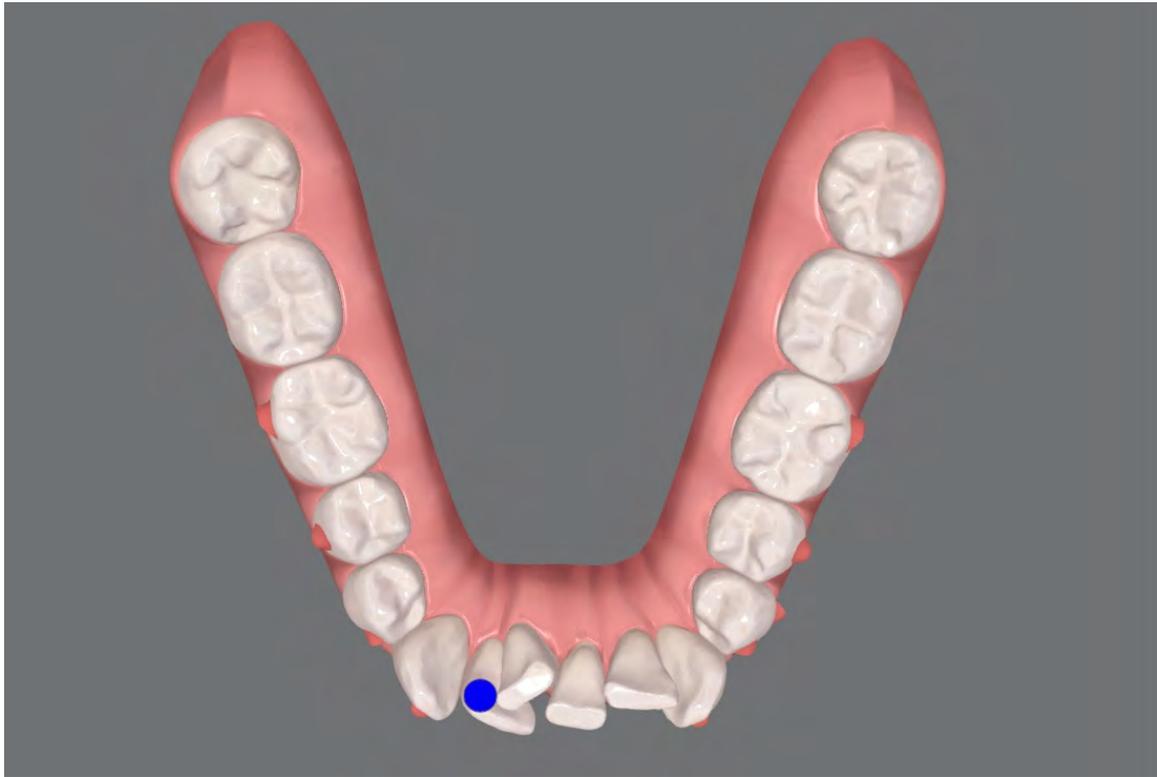
Ces avancées ont conduit à une disponibilité croissante et à l'efficacité croissante des produits d'aligneurs transparents pour l'alignement dentaire dans diverses malocclusions.

a) Fabrication industrielle

Après avoir réalisé le bilan orthodontique complet, le praticien va envoyer au fabricant le dossier photographique complet comportant des photographies exo et endo-buccales, les empreintes optiques des arcades complètes, et le dossier radiologique (panoramique et téléradiographie).

C'est le laboratoire du fabricant qui enverra un ClinCheck (prévisualisation des séquences de traitement) (Figure 9) au praticien qui pourra alors valider le cas afin de permettre la production des gouttières (7) (9) (12).

Figure 9 : Exemple d'un ClinCheck sur le logiciel Invisalign®



b) Fabrication au laboratoire de prothèse

Dans le cas d'une fabrication au laboratoire de prothèse, le praticien est équipé le plus souvent d'un logiciel informatique de conception permettant de visualiser grâce aux empreintes optiques les mouvements à réaliser et donc la séquence de traitement nécessaire pour arriver aux objectifs de traitement.

Ces informations sont envoyées au laboratoire qui réalisera les gouttières afin de les envoyer au praticien qui pourra les remettre au patient.

c) Fabrication au cabinet spécialisé

Avec l'essor des traitements par aligneurs, de nombreux cabinets se sont équipés de logiciel de modélisation 3D et d'imprimantes 3D afin de s'affranchir des coûts et des délais des laboratoires de fabrication industrielle.

Le praticien réalise donc lui-même sur le logiciel les mouvements à réaliser puis le logiciel indique combien de gouttières seront nécessaires pour leur réalisation. Cela permet ensuite d'imprimer différents modèles afin de réaliser des gouttières par thermoformage avec des plaques de polymère (24).

Il existe deux types de machines à thermoformer :

- La plupart fonctionnent sur le principe de la dépression d'air. Un appel d'air s'opère en dessous du modèle à thermoformer et assure en même temps l'aspiration du matériau plastique par-dessus.
- D'autres génèrent de l'air en pression au-dessus du matériau thermoplastique de manière à le plaquer contre le modèle.

Figure 10 : Type d'attachements selon Topsakkal et Gökmen



Source : “The effect of layer thickness on the accuracy of the different in-house clear aligner attachments” Topsakal et Gökmen, Janvier 2023.

Chapitre 2 : Matériaux utilisés pour les attachements.

A. Présentation des différents matériaux disponibles pour la réalisation des attachements.

Comme décrit précédemment, les attachements utilisés pour les mouvements orthodontiques lors du port d'aligneurs doivent être réalisés avec des matériaux résistants dans le temps dans les conditions spécifiques retrouvées dans la cavité buccale (chaleur et humidité principalement) mais aussi résistants lors de la mise en place et du retrait des aligneurs au cours de la journée et tout au long du traitement orthodontique (25).

D'une façon générale, les attachements sont réalisés par les praticiens avec des résines composites après traitement chimique de la surface dentaire par différents procédés en fonction du type de résine et de système adhésif choisis, en effet, celles-ci ne présentent pas de propriétés adhésives intrinsèques ce qui oblige le praticien à mettre en place un protocole afin de permettre l'adhésion dent/matériau (25).

a) Les différents systèmes adhésifs présents sur le marché

Les progrès scientifiques dans le domaine de la cariologie et de la technologie des adhésifs dentaires ont largement influencé et révolutionné de nombreux aspects de la dentisterie restauratrice(26).

L'adhésion est l'ensemble des interactions qui contribuent à unir deux corps, celle-ci se réalise avec les tissus dentaires principalement par processus micromécanique. L'adhésion aux tissus dentaires se présente comme un phénomène physico-chimique. Cependant la structure hétérogène de la dent (composée d'émail et dentine) impose des protocoles de collage différents entre la dentine (plus hydratée) et l'émail (26) (27)....

Le collage impose plusieurs contraintes, il nécessite une préparation préalable des surfaces de collage et une application d'un primaire d'adhésion permettant la liaison entre les tissus dentaires et le système de collage.

Il existe aujourd'hui 2 grands types de systèmes adhésifs qui sont : les systèmes avec mordantage et rinçage préalable (MR) et les systèmes automordançants (SAM).

Ces adhésifs, selon leurs composants sont qualifiés d'adhésifs conventionnels ou d'adhésifs universels.

i) Les systèmes mordantage et rinçage préalable ou MR

Mis au point dans les années 1990, ils reposent sur 3 temps opératoires.

Tout d'abord le mordantage de l'émail et la dentine grâce à un acide orthophosphorique à 37% afin d'éliminer la boue dentinaire (dépôts) qui est issue des débris de tissus dentaires lors des préparations dentinaires avec des instruments rotatifs, (elle représente donc une barrière pour l'adhésion) (27). Il permet également de créer une déminéralisation de surface sur quelques microns pour permettre l'infiltration future des tubulis dentinaires par le primaire puis l'adhésif.

Ce gel de mordantage est ensuite rincé abondamment puis la surface est séchée afin d'appliquer un primaire d'adhésion puis de la résine adhésive hydrophobe.

Il existe deux types de systèmes MR, les MR 3 présentant 3 temps opératoires (mordantage – primaire – adhésif) et les MR 2 en présentant seulement 2 car le primaire et l'adhésif sont retrouvés dans le même flacon(28).

ii) Les systèmes automordançants ou SAM

Ils voient le jour dans le but de simplifier les protocoles de collage au cabinet dentaire, ils permettent de s'affranchir de l'étape préalable de mordançage.

En effet, ils présentent des monomères acides permettant de combiner l'étape de mordançage et celle de l'infiltration, la déminéralisation et l'infiltration de résine se font donc dans le même temps.

Les éléments de la boue dentinaire sont donc incorporés au sein de la couche adhésive.

Il existe sur le marché deux types de systèmes SAM : les SAM 1 et les SAM 2.

iii) Les systèmes universels

Toujours dans une logique de simplification des protocoles l'évolution des techniques a permis de faire apparaître des systèmes de collage plus faciles à mettre en œuvre et plus polyvalents (26).

La dernière génération regroupe les adhésifs universels, permettant une économie de temps et de matériel au cabinet (27).

Les adhésifs universels se présentent le plus souvent en un flacon unique et peuvent être appliqués selon divers protocoles : mordançage et rinçage, mordançage de l'émail uniquement ou auto mordançage.

Ils présentent une composition particulière d'un mélange entre initiateurs de polymérisation, solvants et de monomères.

Ces adhésifs permettent l'adhésion chimique sur différentes situations cliniques mais aussi restaurations directes/indirectes(29).

Dans le cadre de l'orthodontie et de la réalisation de rétentions orthodontiques, les deux systèmes les plus utilisés sont les SAM 1 et les systèmes universels utilisés en SAM 1 afin de faciliter les protocoles de collage au cabinet d'orthodontie.

Il est bien connu que le mordançage à l'acide phosphorique produit les liaisons résine-émail les plus durables (26).

Par conséquent, lorsque les systèmes universels sont utilisés avec la stratégie MR, leur agressivité plus faible réduit leur potentiel de déminéralisation complète de l'émail, ce qui entraîne des microporosités rétentes inadéquates.

Une méta-analyse d'études in vitro réalisée par Rosa et al. a confirmé que les universels utilisant la stratégie SAM (par rapport à la stratégie MR) entraînaient des valeurs de micro-cisaillement de l'émail significativement plus faibles (30).

De même, des études utilisant le vieillissement artificiel pour tester la durabilité de l'adhérence de l'émail des adhésifs SAM (y compris les universels) (31) ont conclu que la stratégie MR entraînait des caractéristiques d'adhérence à long terme significativement meilleures.

Des études in vitro ont suggéré plusieurs méthodes pour améliorer les caractéristiques d'adhérence résine-émail avec les universels (31), ces études ont suggéré l'utilisation d'une application active et prolongée de l'adhésif avec la stratégie SAM comme alternative pratique au mordantage de l'émail (29).

b) Les matériaux présents sur le marché permettant de créer des rétentions orthodontiques

Les matériaux utilisables pour créer les rétentions orthodontiques doivent être : biocompatibles et pérennes dans le temps face aux différentes agressions retrouvées au sein de la cavité buccale (chaleur, humidité, acidité, forces masticatoires lors de l'alimentation...).

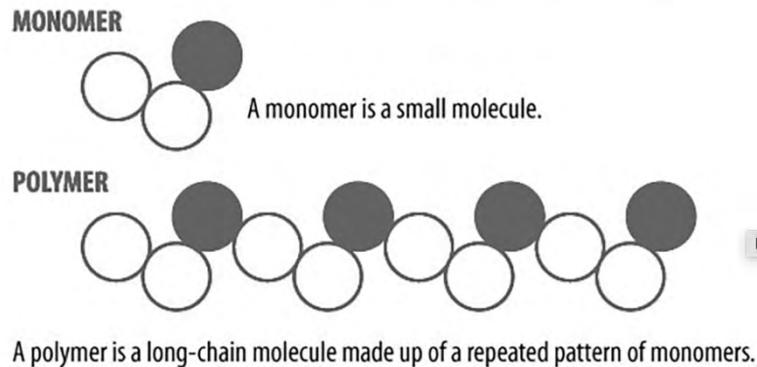
Sur le marché des biomatériaux permettant la création de rétentions et répondant au cahier des charges, nous retrouvons deux grands types de biomatériaux : des matériaux polymères que sont les résines composites et les ciments de verre ionomères.

Les matériaux de reconstitution en odontologie font le plus souvent appel à des polymères.

Un polymère est défini par l'assemblage de plusieurs monomères reliés entre eux par le biais de liaisons covalentes (essentiellement) pour former un polymère(32).

Figure 11 : Processus de polymérisation

Structure of Monomers and Polymers



Source : Monomère, Polymère quel est le meilleur ? Celadon®

Dans les résines composites, ces polymères et monomères sont associés à des charges minérales par une molécule bifonctionnelle appelée silane.

C'est la réaction chimique de polymérisation qui permet de former des polymères à partir de monomères.

Les résines composites ont été nettement améliorées ces dernières années permettant d'obtenir une usure et un module d'élasticité proches de l'émail mais aussi des caractéristiques mécaniques suffisantes afin d'être pérennes dans le temps (30). Celles-ci présentent une bonne résistance aux forces de cisaillement sur l'émail.

Le mécanisme de prise des **ciments de verre ionomères** reposent sur une réaction acide-base entre un verre (sous forme d'une fine poudre de fluoro-alumino-silicate) et d'un acide (liquide d'acide polyalkénoïque). Ces verres sont formés à base de silice, alumine et fluorure de calcium (source Référentiel Internat Odontologie Conservatrice)(33).

B. Propriétés et caractéristiques de chaque matériau (ex. : résistance, biocompatibilité, durabilité, esthétique).

Les biomatériaux utilisés en odontologie doivent (34) :

- Être biocompatibles, c'est-à-dire être inertes ou induire une réponse appropriée de l'hôte sans dommages biologiques pour l'organisme ;
- Avoir des propriétés mécaniques et physiques adaptées aux fonctions des tissus qu'ils remplacent.
- Être résistants à la dégradation dans le milieu buccal
- Être les plus esthétiques possible pour faire face à l'exigence croissante en matière d'esthétique des patients
- Être faciles d'emploi et de mise en œuvre
- Être compatibles avec les autres matériaux présents en bouche

a) Les résines composites

Un matériau composite est un matériau composé de deux ou de plusieurs matériaux de nature ou d'origine différentes dont les caractéristiques mécaniques sont supérieures à celles des matériaux pris séparément.

La condition fondamentale pour que cette définition soit validée est que la cohésion de l'ensemble soit assurée par des liaisons mécaniques, chimiques ou physiques.

Selon la Société Francophone de Biomateriaux Dentaires les résines composites sont définies comme des matériaux composés d'une matrice organique renforcée par des charges. Ces matériaux sont indirectement adhérents aux tissus dentaires.

Les 3 constituants des résines composites dentaires sont successivement :

- la phase organique ou matrice résineuse (organique dans la plupart des cas)
- les charges
- l'agent de couplage ou silane.

La matrice résineuse non polymérisée est essentiellement formée de monomères de type méthacrylate (comme le Bis-GMA, l'UDMA, le TEGDMA...)(35) associés en polymères.

On retrouve de même des constituants permettant la réaction de polymérisation et la gestion de la viscosité mais aussi les pigments (22) (32).

La matrice de la résine composite entraîne une contraction d'environ 3% de son volume, ceci est lié à la réaction de polymérisation entraînée par la lumière (photopolymérisation) ou chimique (chémo-polymérisation)(36).

La contraction de prise est importante à prendre en compte, en effet, celle-ci va fragiliser et solliciter le joint créé à l'interface matériau-substrat dentaire.

Les charges permettent de renforcer la structure de la résine composite.

Les propriétés mécaniques et physico-chimiques de ces résines composites varient principalement en fonction de la taille, la composition et la concentration de ces charges.

Par exemple, pour permettre d'améliorer les propriétés mécaniques en réduisant la contraction de prise, on pourra augmenter le pourcentage et la taille de charges au sein du biomatériau (22) (32).

La taille de ces charges permet de classer les résines composites :

- Macro-chargées (de 1 à 50 microns)
- Micro-chargées (de 0,04 à 0,4 microns)
- Micro-hybrides (< 1 microns)
- Et micro-hybrides nanochargés avec des charges < 0,4 microns

On retrouve pour chaque catégorie de résines plusieurs viscosités : moyenne, fluide et pseudo-compactable(37).

Toujours dans un objectif de simplification des procédures les composites bulk-fil ont vu le jour afin de réduire le nombre d'incrémentes permettant la mise en place d'un moindre nombre d'incrémentes par la possibilité de photopolymérisation d'une couche de 4 à 5 mm d'épaisseur(28) (38).

L'agent de couplage est représenté par le silane, il permet une bonne cohésion entre la matrice résineuse et les charges dans la résine.

La résine composite n'est cependant pas sans défaut, en effet, le principal est représenté par la contraction de prise inhérente à la réaction de polymérisation qui menace directement le joint adhésif (38).

Elle peut entraîner à court terme des douleurs post-opératoires, à moyens terme des dyscolorations marginales et à plus ou moins long terme des reprises carieuses qui constituent la majeure partie des échecs cliniques.

La résistance à la fracture n'est pas toujours suffisante pour supporter les contraintes occlusales rencontrées dans des situations cliniques de plus en plus exigeantes suite à la généralisation des indications (32).

Cependant la longévité de ces résines composites s'améliore grâce aux progrès des matériaux (36).

Dans un contexte de démocratisation de l'utilisation des aligneurs, les industriels ont mis au point des matériaux spécifiques pour la réalisation de ces rétentions.

La société VOCO® a mis au point un matériau en résine composite fluide nommé « AlignerFlow LC » présentant des caractéristiques techniques répondant à l'utilisation en tant que rétentions d'aligneurs.

Une stabilité et une résistance à l'usure élevées, grâce au fort taux de charge (83%) permettant une transmission permanente des forces sur les dents.

Mais aussi ce composite nanohybride présente une fluorescence aux UV-A permettant de contrôler la présence de résidus lors de la dépose sans léser l'émail. Il existe différentes teintes permettant de répondre de même aux exigences esthétiques recherchées via un traitement par aligneurs(39).

Figure 12 : Photographie AlignerFlow LC société VOCO®



b) Les ciments de verre ionomères

Les CVI ont vu le jour dans les années 1960 (25,33).

À la différence des résines composites avec leurs systèmes adhésifs, l'adhésion des CVI se fait de façon intrinsèque aux tissus dentaires, par une réaction de nature chimique par liaisons fortes.

On y retrouve des liaisons ioniques et également des liaisons faibles hydrogènes, permettant l'adhésion à l'hydroxyapatite des tissus dentaires (33).

Les ciments de verre ionomères présentent des propriétés chimiques permettant de répondre à de nombreuses situations cliniques diverses, en effet, on leur attribue la possibilité de relarguer des ions fluorures permettant d'avoir une action cariostatique, mais aussi une liaison spécifique à l'émail et à la dentine.

Il est possible de prétraiter la surface dentaire par le biais d'un acide polyacrylique pour améliorer l'adhésion essentiellement chimique des CVI.

Les CVI présentent tout de même une valeur de rétention sur les surfaces dentaires inférieure à celles des résines composites avec système adhésif séparé.

On retrouve (33) :

- Les CVI traditionnels
- Les CVIMAR (modifié par adjonction de résine)
- Les CVI condensables
- Les CVI à haute viscosité

Les CVI traditionnels permettent de relarguer des ions fluorures pendant et après la prise favorisant ainsi la reminéralisation des tissus dentaires mais aussi permettant un effet antibactérien et cariostatique, ils peuvent ensuite se recharger en fluor par le biais d'un apport via des solutions fluorées topiques(36).

Cependant, leurs propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la flexion et à l'abrasion) sont très limitées et contre-indiquent leur utilisation dans des zones à fortes contraintes mécaniques.

Les CVIMAR ont été mis au point dans les années 1970 en associant des monomères résineux, des photo-amorceurs et des activateurs photosensibles aux CVI traditionnels pour augmenter leurs caractéristiques mécaniques tout en gardant leurs avantages (adhésion intrinsèque aux tissus dentaires et relargage de fluor) (25).

De par la présence de monomères résineux, les composites adhèrent mieux aux CVIMAR qu'aux CVI conventionnels.

Les CVIMAR ont une excellente étanchéité immédiate aux tissus dentaires ainsi que des propriétés mécaniques améliorées(40)

Les CVI condensables ou haute viscosité sont eux moins sensibles à l'humidité et leur résistance mécanique est très bonne ce qui permet leur utilisation dans des contextes cliniques parfois difficiles.

Les CVI sont indiqués dans de multiples situations cliniques telles que :

- Les obturations de cavité en odontologie adulte, pédiatrique et gérodonologie
- Les scellements des puits et des fissures
- Les scellements de restaurations prothétiques et de brackets orthodontiques
- Les ciments de scellement canaux
- Les reconstitutions pré-endodontiques

	Résine Composite	CVI/CVIMAR
Biocompatibilité	-	+
Propriétés mécaniques et physiques	+	+ / - en fonction du type de CVI
Étanchéité / activité antimicrobienne	<i>Bonne si protocole respecté</i>	<i>Activité antimicrobienne</i>
Esthétique	+	+/-
Adhésion aux tissus dentaires	- Nécessite un système adhésif	+
Indications cliniques	Secteurs antérieur et postérieur	Secteurs antérieur et postérieur
	Techniques directe et indirecte	Technique directe
Coopération / risques carieux / hygiène bucco-dentaire / habitudes néfastes du patient	-	+

Figure 13 : Tableau : Caractéristiques et indications des composites et des CVI en dentisterie

Tableau tiré du référentiel internat en dentisterie restauratrice et endodontie

C. Avantages et inconvénients de chaque matériau en termes d'utilisation avec les aligneurs.

Les rétentions orthodontiques sont soumises à un grand nombre de force dans la bouche, ceci entraînant une distribution complexe des contraintes à l'intérieur de l'adhésif et du matériau. La force d'adhésion(41) nécessaire pour la réalisation et le maintien de ces rétentions devra être suffisamment forte pour maintenir le taquet sur la dent pendant tout le traitement orthodontique, malgré les forces engendrées par l'insertion et la désinsertion de l'aligneur, mais ne devra pas endommager la surface de la dent lors de la dépose de celle-ci.

Rappelons le cahier des charges nécessaires pour les matériaux utilisables en tant que rétentions d'aligneurs orthodontiques (41) (42) :

- biocompatibilité
- dureté
- stabilité dans le temps qu'elle soit physique, esthétique et biochimique
- esthétisme
- résistance à l'usure
- fixité
- coût modéré
- protection contre les lésions carieuses dans la mesure du possible
- facile à utiliser et à mettre en œuvre

Un essai clinique randomisé de Benson et al datant de 2008 a étudié d'utilisation d'un CVIMAR (Fuji Ortho LC GC®) versus l'utilisation d'une résine composite (LCC resine Transbond XT light cure de 3M®) sur 210 patients, l'étude a montré qu'il n'existait pas de différence entre le taux d'échec pour la résine composite et le CVIMAR pour le collage de brackets, de plus, ils ont montré que l'utilisation d'un CVIMAR permettait un nettoyage plus aisé des brackets et une diminution des sensibilités(43).

Il existe aujourd'hui seulement des études sur le collage des brackets comparant les résines composites et les ciments de verre ionomères. Ces résultats laissent supposer qu'il serait possible d'utiliser des CVIMAR afin de réaliser des rétentions orthodontiques pour les aligneurs, cependant aucune étude n'a permis de démontrer ou d'infirmer cette utilisation.

Chapitre 3 : Recommandations et lignes directrices pour le choix et l'utilisation des attachements.

A. Critères de sélection des matériaux en fonction des besoins du patient et du traitement orthodontique.

L'utilisation des résines composites en orthodontie n'est plus à démontrer. En effet, depuis l'utilisation des brackets (qu'ils soient conventionnels ou auto-ligaturants), leur mise en place nécessite le plus souvent ces résines composites(25).

Cependant, ces résines composites présentent de nombreux désavantages, l'utilisation d'acide orthophosphorique ou d'adhésif auto-mordant peut diminuer la quantité d'émail et ainsi créer des sensibilités, de même lors de la dépose de la résine qui risque de désagréger cette couche amélaire.

Plusieurs études ont démontré que la couche de surface de l'émail était la plus riche en fluor (44).

De plus, une déminéralisation peut être retrouvée en périphérie des brackets lors de la dépose due à l'accumulation de plaque.

Ces désavantages ont amené les praticiens à envisager l'utilisation d'autres matériaux comme les ciments de verre ionomères pour le collage des brackets orthodontiques(44)(45)

L'avantage incontesté des ciments de verre ionomères réside dans leur capacité à relarguer du fluor et donc de limiter les déminéralisations de surface (43).

On leur attribue de même une adhésion tout aussi efficace à l'émail qu'au métal.

Cependant les études divergent sur l'intérêt des ciments de verre ionomères avec adjonction de résine sur l'apparition de nouvelles lésions carieuses versus les résines composites (43).

Plusieurs études ont démontré un taux d'échec plus importants par rapport aux résines composites des ciments de verre ionomères pour le collage des brackets orthodontiques(44), le site d'échec semblant être principalement l'interface brackets/ciment. Mais de nouvelles études sont en faveur d'un potentiel d'adhésion semblable entre les ciments de verre ionomères avec adjonction de résine vis-à-vis des résines composites, et l'opérateur jouerait un rôle important dans le taux d'échec du collage des brackets orthodontiques (41) (43).

Une revue (41) du Cochrane de 2016 regroupant les différentes études sur les différents modes de collage des brackets orthodontiques conclut sur un manque de précision des différentes études sur le sujet (manque de puissance, design mal choisi, interférences occlusales non prises en compte, taux de perdus de vue importants...) ne permettant pas de conclure sur des recommandations en termes de mode de collage.

B. Considérations cliniques pour la conception et la mise en place des attachements.

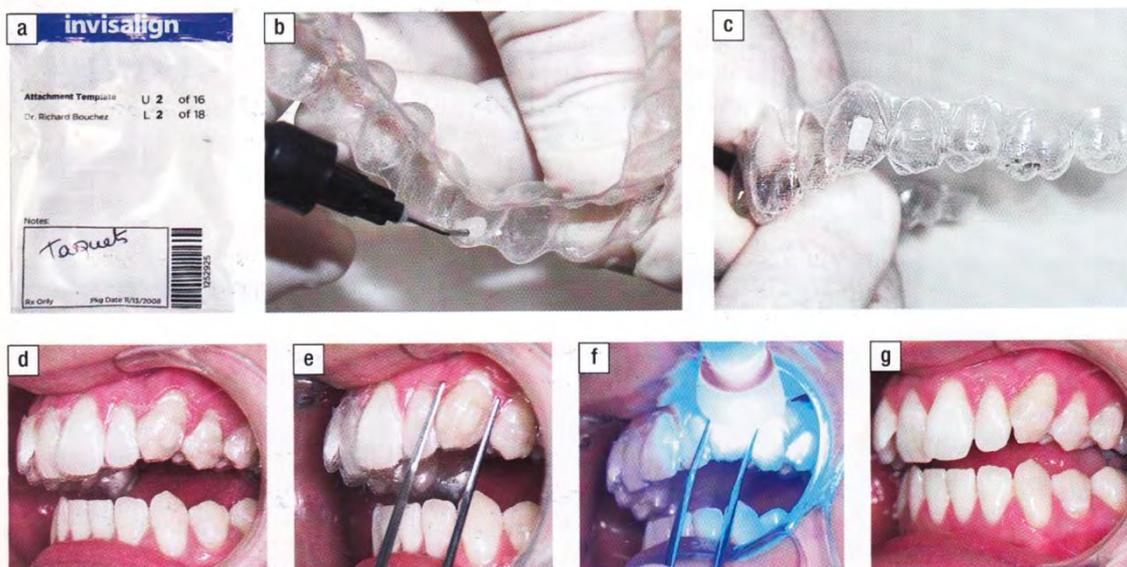
Aujourd'hui la plus grande majorité des praticiens utilisent des résines composites photopolymérisables afin de réaliser les attachements des aligneurs (28).

Pour leur réalisation, il est nécessaire d'avoir ou de réaliser au préalable (pour les gouttières fabriquées au cabinet) une gouttière nommée « Template » le plus souvent en matériau souple, qui sera positionnée en bouche, elle agit comme un moule permettant de réaliser un positif des attachements directement en bouche(19).

Le protocole suivi par le praticien sera :

- réception et vérification du Template
- choix de la teinte du composite
- mordançage et application de l'adhésif sur les surfaces dentaires recevant les attachements
- remplissage du Template avec le composite
- mise en bouche du Template, il sera plaqué avec un instrument en bouche sur la surface de la dent afin de faciliter l'adhérence du composite
- photopolymérisation du composite à travers la gouttière transparente
- retrait et vérification de la rétention en bouche

Figure 14 : Protocole de collage des attachements



Source : Bouchez, « Les traitements orthodontiques Invisalign®, 2009.

Figure 15 : Photographie des attachements en bouche, Dr Baron®



C. Recommandations pour l'entretien et le suivi des patients portant des attachements.

L'utilisation des aligneurs versus les traitements par multi-bagues diminue nettement la modification de la flore buccale, on retrouve moins de lésions carieuses et parodontales pendant l'utilisation des aligneurs (10) (42).

Le changement régulier des aligneurs au cours du traitement (toutes les semaines voir tous les 10 jours) permet d'éviter la stagnation des bactéries au sein du matériau plastique pendant un laps de temps trop important.

Une revue systématique de février 2022 de Charavet et al. de 4 articles publiés entre 2014 et 2022 sur la mise en place d'un protocole de nettoyage et de désinfection des aligneurs a montré que la thérapeutique la plus efficace regroupait une séquence de plusieurs étapes :

- nettoyage des aligneurs avec le dentifrice ou avec dentifrice + immersion dans un bain de bouche à la chlorhexidine
- immersion dans un bain vibrant avec une solution de nettoyage Align Technology®
- immersion dans un bain ultrasonique avec des solutions ioniques.

Cette première revue systématique a permis de mettre en lumière que différents protocoles de nettoyage et désinfection paraissent aptes à contrôler l'adhésion et le développement du biofilm sur la surface des aligneurs.

La technique la plus appropriée semble être la combinaison d'une approche mécanique et d'une immersion permettant une désinfection chimique(46).

Les résines composites utilisées pour réaliser ces attachements ont été développées dans un souhait de développer des biomatériaux résistants aux conditions de la cavité orale mais aussi pour que ces surfaces limitent au maximum la formation d'un biofilm et qu'elles soient facile à nettoyer par le patient(47).

Les attachements vestibulaires et linguales se nettoient elles en même temps que la surface des dents. Les recommandations classiques retrouvées dans les cabinets dentaires et spécialisés sont les mêmes que pour la surface des dents, un brossage manuel ou électrique avec un dentifrice fluoré 3 fois par jour après les repas.

Conclusion

Les aligneurs sont un outil dont l'utilisation s'est vue démultipliée ces dernières années dans un contexte social de plus en plus axé sur l'esthétisme et la discrétion des appareils orthodontique(23).

Ce dynamisme des aligneurs répond de même à une catégorie différente de patients, ils visent des patients adultes, adhérant plus facilement à un traitement amovible, discret, dont ils peuvent s'affranchir occasionnellement lorsque le contexte l'exige(48).

Ces aligneurs sont réalisés en polymère thermoformable transparent, dont les principales caractéristiques recherchées en orthodontie sont la souplesse et la résilience, permettant des qualités importantes de modelage, une absence d'altération dans la salive et une résistance aux conditions buccales et aux produits de nettoyage quotidiens (7)(42).

La demande étant grandissante, de nombreux fabricants ont vu le jour depuis plusieurs années, on compte aujourd'hui plus d'une centaine de fabricants différents dans le monde d'aligneurs dont les principaux cités sont Invisalign®, Spark® ou encore Orthocaps®.

L'utilisation des aligneurs requièrent des attachements collés aux dents, permettant soit de maintenir l'aligneur en place sur l'arcade, soit d'induire des mouvements et d'en améliorer l'efficacité(49).

Ces rétentions doivent répondre à un cahier des charges précis, tant sur l'esthétisme recherché par l'utilisation d'aligneurs transparents que sur leurs propriétés mécaniques à résister aux différentes sollicitations retrouvées dans la cavité buccale et lors de l'insertion et la désinsertion(42).

Par manque de littérature sur le sujet et par habitudes d'utilisation, les attachements d'aligneurs se réalisent en résines composites fluides ou visqueuses photopolymérisables par protocole de moulage en positif dans la cavité buccale grâce à une gouttière nommée « Template », après un protocole adhésif selon le choix du praticien.

Il paraît évident que pour éviter les mouvements parasites et les échecs de traitement, ces rétentions ne doivent pas être placées à main levée sur les surfaces des dents.

Aujourd'hui la littérature scientifique manque de recherches quant à l'utilisation d'autres matériaux pour la réalisation d'attachements d'aligneurs malgré la présence de quelques revues décrivant l'utilisation de ciments de verre ionomères pour le collage des brackets orthodontiques(25).

Vu le Président du Jury

Vu les directeurs de Thèse



Le Président du Jury
Florent Destruhaut



Table des figures

Figure 1 : Schéma indiquant la position des attachements sur les dents	16
Figure 2 : Tableau : Type de traitements réalisables par aligneurs orthodontiques.....	19
Figure 3 : Exemple d'indications des aligneurs orthodontiques, SPARK®	21
Figure 4 : Mouvement de version	27
Figure 5 : Mouvement de translation	28
Figure 6 : Mouvement de torque	30
Figure 7 : Exemples d'attachements utilisés en fonction du mouvement recherché	32
Figure 8 : Exemple d'application des forces sur les attachements	33
Figure 9 : Exemple d'un ClinCheck sur le logiciel Invisalign®	37
Figure 10 : Type d'attachements selon Topsakkal et Gökmen.....	39
Figure 11 : Processus de polymérisation.....	44
Figure 12 : Photographie AlignerFlow LC société VOCO®	48
Figure 13 : Tableau : Caractéristiques et indications des composites et des CVI en dentisterie.....	51
Figure 14 : Protocole de collage des attachements	55
Figure 15 : Photographie des attachements en bouche, Dr Baron®	56

Bibliographie et Références

1. Papageorgiou SN, Koletsi D, Iliadi A, Peltomaki T, Eliades T. Treatment outcome with orthodontic aligners and fixed appliances: a systematic review with meta-analyses. *Eur J Orthod*. 23 juin 2020;42(3):331-43.
2. Topsakal KG, Gökmen Ş, Yurdakurban E, Duran GS, Görgülü S. The effect of layer thickness on the accuracy of the different in-house clear aligner attachments. *Clin Oral Investig*. 18 juill 2023;
3. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J* [Internet]. mars 2017 [cité 6 déc 2023];62(S1):58-62. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/adj.12480>
4. Chaudret F. Biomécanique des aligneurs en orthodontie.
5. Khan W. Nouveaux concepts de traitement par aligneurs : le système Orthocaps. *Orthod Fr* [Internet]. sept 2014 [cité 20 sept 2023];85(3):253-64. Disponible sur: <https://www.jle.com/10.1051/orthodfr/2014011>
6. Baron P. Les appareils orthodontiques invisibles et presque invisibles. *Orthod Fr* [Internet]. mars 2014 [cité 20 sept 2023];85(1):59-91. Disponible sur: <https://www.jle.com/10.1051/orthodfr/2014004>
7. Cellier PL. Les aligneurs orthodontiques: nouvel outil thérapeutique, utilisation au cabinet et perspectives.
8. Le set-up numérique la révolution de l'orthodontie digitale [Internet]. *LEFILDENTAIRE magazine dentaire*. 2019 [cité 9 déc 2023]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/orthodontie/le-set-up-numerique-la-revolution-de-l-orthodontie-digitale/>
9. iSmile. iSmile. [cité 9 déc 2023]. Invisalign - Déroulement du traitement. Disponible sur: <https://www.ismile-orthocare.be/fr/invisalign-deroulement-du-traitement?.AbsoluteUri>
10. Shokeen B, Viloría E, Duong E, Rizvi M, Murillo G, Mullen J, et al. The impact of fixed orthodontic appliances and clear aligners on the oral microbiome and the association with clinical parameters: A longitudinal comparative study. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. mai 2022;161(5):e475-85.
11. Corbin. Thérapeutique orthodontique par aligneurs, une alternative pertinente aux systèmes fixes multi-attaches ? 2010.
12. Site SPARK [Internet]. Disponible sur: <https://sparkaligners.com/fr-fr>

13. Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod* [Internet]. févr 2022 [cité 11 déc 2023];11(1):12-21. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212443821000576>
14. Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, Garino F, Reverdito M, Capuozzo R, et al. Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design. *Prog Orthod*. 16 janv 2023;24(1):2.
15. Lombardo L, Arreghini A, Ramina F, Huanca Ghislanzoni LT, Siciliani G. Predictability of orthodontic movement with orthodontic aligners: a retrospective study. *Prog Orthod* [Internet]. 13 nov 2017 [cité 21 août 2023];18:35. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5682257/>
16. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: A systematic review. *Angle Orthod* [Internet]. sept 2015 [cité 25 juill 2023];85(5):881-9. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8610387/>
17. Lemay. Déplacement des dents en orthodontie. 2018.
18. Boileau MJ. Orthodontie de l'enfant et du jeune adulte : principes, moyens traitements. 2022^e éd. Elsevier Masson; 2022. 624 p. (Techniques dentaires).
19. Bouchez R. Les traitements orthodontiques Invisalign. Quintessence. 2009. (Réussir).
20. Tuncay OC. The invisalign System. 2006. 330 p.
21. Nucera R, Dolci C, Bellocchio AM, Costa S, Barbera S, Rustico L, et al. Effects of Composite Attachments on Orthodontic Clear Aligners Therapy: A Systematic Review. *Materials* [Internet]. 11 janv 2022 [cité 13 déc 2023];15(2):533. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8778413/>
22. Sulaiman TA. Materials in digital dentistry—A review. *J Esthet Restor Dent* [Internet]. mars 2020 [cité 16 déc 2023];32(2):171-81. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jerd.12566>
23. Putrino A, Barbato E, Galluccio G. Clear Aligners: Between Evolution and Efficiency—A Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 11 mars 2021 [cité 21 août 2023];18(6):2870. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7998651/>
24. Ergül T, Güleç A, Göymen M. The Use of 3D Printers in Orthodontics - A Narrative Review. *Turk J Orthod*. 22 juin 2023;36(2):134-42.
25. Frickers J. Therapeutic properties of glass-ionomer cements: Their application to orthodontic treatment. *Aust Dent J*. mars 2022;67.
26. Nagarkar S, Theis-Mahon N, Perdigão J. Universal dental adhesives: Current status, laboratory testing, and clinical performance. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*

- [Internet]. août 2019 [cité 22 nov 2023];107(6):2121-31. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jbm.b.34305>
27. Delrieu J, Meredith C, Canceill T, Joniot S. Les adhésifs universels,. 2020;
 28. Heintze SD, Loguercio AD, Hanzen TA, Reis A, Rousson V. Clinical efficacy of resin-based direct posterior restorations and glass-ionomer restorations – An updated meta-analysis of clinical outcome parameters. *Dent Mater* [Internet]. mai 2022 [cité 16 déc 2023];38(5):e109-35. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564121003122>
 29. Loguercio AD, Muñoz MA, Luque-Martinez I, Hass V, Reis A, Perdigão J. Does active application of universal adhesives to enamel in self-etch mode improve their performance? *J Dent* [Internet]. sept 2015 [cité 22 nov 2023];43(9):1060-70. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571215000883>
 30. Heintze SD, Rousson V, Mahn E. Bond strength tests of dental adhesive systems and their correlation with clinical results – A meta-analysis. *Dent Mater* [Internet]. avr 2015 [cité 15 nov 2023];31(4):423-34. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564115000275>
 31. Takamizawa T, Barkmeier WW, Tsujimoto A, Scheidel DD, Watanabe H, Erickson RL, et al. Influence of water storage on fatigue strength of self-etch adhesives. *J Dent* [Internet]. déc 2015 [cité 22 nov 2023];43(12):1416-27. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300571215300646>
 32. Leprince J, Leloup G, Vreven J, Weiss P, Raskin A. Polymères et résines composites.
 33. Smith DC. Development of glass-ionomer cement systems. *Biomaterials* [Internet]. 1 avr 1998 [cité 12 déc 2023];19(6):467-78. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142961297001269>
 34. MJÖR IA. Minimum requirements for new dentals materials. *J Oral Rehabil* [Internet]. 2007 [cité 15 déc 2023]; Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2842.2007.01726.x>
 35. Watts DC. Resin composite or composite resin? *Dent Mater* [Internet]. sept 2020 [cité 16 déc 2023];36(9):1115. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0109564120301895>
 36. Li Y, Liu M, Xue M, Kang Y, Liu D, Wen Y, et al. Engineered Biomaterials Trigger Remineralization and Antimicrobial Effects for Dental Caries Restoration. *Molecules* [Internet]. 31 août 2023 [cité 15 déc 2023];28(17):6373. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10489995/>
 37. Ypei Gia NR, Sampaio CS, Higashi C, Sakamoto A, Hirata R. The injectable resin composite restorative technique: A case report. *J Esthet Restor Dent* [Internet]. avr 2021 [cité 16 déc 2023];33(3):404-14. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jerd.12650>

38. Veloso SRM, Lemos CAA, De Moraes SLD, Do Egito Vasconcelos BC, Pellizzer EP, De Melo Monteiro GQ. Clinical performance of bulk-fill and conventional resin composite restorations in posterior teeth: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* [Internet]. janv 2019 [cité 19 déc 2023];23(1):221-33. Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s00784-018-2429-7>
39. Site VOCO [Internet]. Disponible sur: <https://www.voco.dental/en/home.aspx>
40. Vallittu PK, Forss H. Adhesion of glass ionomer cement to a ceramometal alloy. *J Prosthet Dent* [Internet]. janv 1997 [cité 12 déc 2023];77(1):12-6. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022391397702002>
41. Millett DT, Glenny AM, Mattick RC, Hickman J, Mandall NA. Adhesives for fixed orthodontic bands. Cochrane Oral Health Group, éditeur. *Cochrane Database Syst Rev* [Internet]. 25 oct 2016 [cité 13 déc 2023];2016(11). Disponible sur: <http://doi.wiley.com/10.1002/14651858.CD004485.pub4>
42. Kreth J, Merritt J, Pfeifer CS, Khajotia S, Ferracane JL. Interaction between the Oral Microbiome and Dental Composite Biomaterials: Where We Are and Where We Should Go. *J Dent Res* [Internet]. sept 2020 [cité 16 déc 2023];99(10):1140-9. Disponible sur: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0022034520927690>
43. Benson PE, Alexander-Abt J, Cotter S, Dyer FMV, Fenesha F, Patel A, et al. Resin-modified glass ionomer cement vs composite for orthodontic bonding: A multicenter, single-blind, randomized controlled trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* [Internet]. janv 2019 [cité 12 déc 2023];155(1):10-8. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889540618308345>
44. Millett DT, McCabe JF. Orthodontic bonding with glass ionomer cement--a review. *Eur J Orthod* [Internet]. 1 août 1996 [cité 12 déc 2023];18(4):385-99. Disponible sur: <https://academic.oup.com/ejo/article-lookup/doi/10.1093/ejo/18.4.385>
45. Charles C. Bonding orthodontic brackets with glass-ionomer cement. *Biomaterials* [Internet]. avr 1998 [cité 12 déc 2023];19(6):589-91. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142961297001415>
46. Charavet C, Gourdain Z, Graveline L, Lupi L. Cleaning and Disinfection Protocols for Clear Orthodontic Aligners: A Systematic Review. *Healthcare* [Internet]. 10 févr 2022 [cité 19 déc 2023];10(2):340. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2227-9032/10/2/340>
47. Sterzenbach T, Helbig R, Hannig C, Hannig M. Bioadhesion in the oral cavity and approaches for biofilm management by surface modifications. *Clin Oral Investig* [Internet]. déc 2020 [cité 19 déc 2023];24(12):4237-60. Disponible sur: <https://link.springer.com/10.1007/s00784-020-03646-1>
48. AlMogbel A. Clear Aligner Therapy: Up to date review article. *J Orthod Sci* [Internet]. 4 sept 2023 [cité 3 déc 2023];12:37. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10597356/>

49. Fan D, Liu H, Yuan CY, Wang SY, Wang PL. Effectiveness of the attachment position in molar intrusion with clear aligners: a finite element study. *BMC Oral Health* [Internet]. 27 oct 2022 [cité 13 déc 2023];22:474. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9644447/>

LES ALIGNEURS ORTHODONTIQUES : TECHNIQUES DE CONCEPTION ET MATERIAUX POUR LA CONCEPTION DES ATTACHEMENTS

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS :

L'utilisation d'aligneurs orthodontiques s'est vue démultipliée ces dernières années dans un contexte social où l'esthétisme des traitements prône une place de plus en plus importante. L'utilisation de rétentions pour les aligneurs est de ce fait le quotidien des praticiens réalisant ce type de traitements. L'objectif de cette thèse est de faire un état des lieux des techniques et matériaux utilisables pour la réalisation de ces rétentions.

ORTHODONTIC ALIGNERS: DESIGN TECHNIQUES AND MATERIALS FOR ATTACHMENTS DESIGN

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLÉS : aligneurs orthodontiques, biomatériaux, résine composite, chirurgien- dentiste, orthodontiste.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR

Université Toulouse III-Paul Sabatier
Faculté de Santé - Département d'Odontologie
3 chemin des Maraîchers 31062 Toulouse Cedex 09

DIRECTEURS DE THÈSE : Dr Thibault CANCEILL et Dr Pascal BARON