



HAL
open science

Intérêts des ancrages osseux dans les traitements par aligneurs

Marin Bonnaud Priollaud

► **To cite this version:**

Marin Bonnaud Priollaud. Intérêts des ancrages osseux dans les traitements par aligneurs. Médecine humaine et pathologie. 2023. dumas-04506064

HAL Id: dumas-04506064

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04506064>

Submitted on 15 Mar 2024

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

THÈSE

***POUR OBTENIR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE***

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

École de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

***Intérêts des ancrages osseux
dans les traitements par aligneurs.***

Thèse soutenue le **Vendredi 27 octobre 2023**

Présentée par

BONNAUD PRIOLLAUD Marin

Né le 8 juillet 1998

À Paris 15^{ème}

Devant le jury composé de

Président : Professeur LE GALL Michel

Assesseurs : Docteur BOHAR Jacques

Docteur PHILIP-ALLIEZ Camille

Docteur FOUQUES Agathe

THÈSE

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

Présentée et publiquement soutenue devant

Aix-Marseille Université
(Président : Monsieur le Professeur Éric BERTON)

Faculté des Sciences Médicales et Paramédicales
(Doyen : Monsieur le Professeur Georges LEONETTI)

École de Médecine Dentaire
(Directeur : Monsieur le Professeur Bruno FOTI)

Intérêts des ancrages osseux dans les traitements par aligneurs.

Thèse soutenue le **Vendredi 27 octobre 2023**

Présentée par

BONNAUD PRIOLLAUD Marin

Né le 8 juillet 1998

À Paris 15^{ème}

Devant le jury composé de

Président : Professeur LE GALL Michel

Assesseurs : Docteur BOHAR Jacques

Docteur PHILIP-ALLIEZ Camille

Docteur FOUQUES Agathe

ADMINISTRATION

Doyens Honoraires

Professeur	Raymond SANGIUOLO†
Professeur	Henry ZATTARA
Professeur	André SALVADORI
Professeur	Jacques DEJOU

Directeur

Professeur	Bruno FOTI
------------	------------

Directeurs adjoints

Professeur	Michel RUQUET
Professeur	Anne RASKIN

Chargés de missions

Formation Initiale	Professeur	Michel RUQUET
Recherche	Professeur	Anne RASKIN
Formation Continue	Professeur	Frédéric BUKIET

Relations Internationales	Professeur	Hervé TASSERY
Internat et Diplômes d'études spécialisées	Professeur	Virginie MONNET-CORTI
Affaires générales	Docteur	Alain TOSELLO

Responsable Administrative

Madame	Katia LEONI
--------	-------------

PROMOTIONS :

2019 Raymond SANGIUOLO
2020 Gaston BERGER
2021 Joseph MIGOZZI
2022 Jérôme GALLION
2023 Serge DIBART

LISTE DES ENSEIGNANTS

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS

BUKIET Frédéric (58-01)
ESCLASSAN Rémi (58-01)
FOTI Bruno (56-02)
LE GALL Michel (56-01)
MONNET-CORTI Virginie (57-01)
PHILIP-ALLIEZ Camille (56-01)
RASKIN Anne (58-01)
RUQUET Michel (58-01)
TARDIEU Corinne (56-01)
TARDIVO Delphine (56-02)
TASSERY Hervé (58-01)
TERRER Elodie (58-01)

PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS

ABOUT Imad (65)

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS

ABOUDHARAM Gérard (58-01)	JACQUOT Bruno (58-01)
ANTEZACK Angeline (57-01)	LABORDE Gilles (58-01)
BALLESTER Benoît (58-01)	LAN Romain (56-02)
BELLONI Didier (57-01)	LAURENT Michel (58-01)
BLANCHET Isabelle (56-01)	MENSE Chloé (58-01)
BOHAR Jacques (56-01)	NOIRRIT-ESCLASSAN Emmanuelle (56-01)
CAMOIN Ariane (56-01)	POMMEL Ludovic (58-01)
CAMPANA Fabrice (57-01)	PRECKEL Bernard-Éric (58-01)
CASAZZA Estelle (58-01)	RÉ Jean-Philippe (58-01)
CATHERINE Jean-Hugues (57-01)	ROCHE-POGGI Philippe (57-01)
GAUBERT Jacques (56-01)	SILVESTRI Frédéric (58-01)
GIRAUD Thomas (58-01)	STEPHAN Grégory (58-01)
GIRAUDEAU Anne (58-01)	TOSELLO Alain (58-01)
GUIVARC'H Maud (58-01)	

PRATICIENS HOSPITALIERS UNIVERSITAIRES

MANSUY Charlotte (58-01)
PILLIOL Virginie (58-01)



CHEFS DE CLINIQUE DES UNIVERSITÉS - ASSISTANTS DES HÔPITAUX

BAUDINET Thomas (58-01)

BOREL Guillaume (56-02)

BRINCAT Arthur (57-01)

BROS Agnès (56-01)

CHAMAYOU Chloé (56-01)

CURIALE Léa (56-01)

DUPRAT Florence (56-01)

FERRE Enzo (58-01)

FOUQUES Agathe (56-01)

HAMMOUTENE Stéphane (57-01)

HOARAU Emilie (57-01)

LAFONT Jacinthe (57-01)

OHANESSIAN Romain (57-01)

ONGHENA Tom (56-01)

PASCHEL Laura (58-01)

PRINCE Fanny (58-01)

RANCHAIN Théo (57-01)

RAYNAUD Camille (58-01)

REYNAL Florence (56-01)

ROMAO Vincent (57-01)

ROUSCOFF Eva (56-01)

RUFAS Pierre (58-01)

RUIZ Pierre-Mathieu (58-01)

SADOWSKI Camille (57-01)

STALLA Martin (58-01)

TERRER Jérémy (58-01)

VIEILLARD Pierre (56-01)

CHEFFE DE CLINIQUE DES UNIVERSITÉS ASSOCIÉE

BROTONS Adèle (56-01)

Intitulés des sections CNU :

56^{ème} section : Développement, croissance et prévention

56-01 Odontologie pédiatrique et orthopédie dento-faciale

56-02 : Prévention – Epidémiologie – Economie de la santé – Odontologie légale

57^{ème} section : Chirurgie orale, Parodontologie, Biologie Orale

57-01 : Chirurgie orale – Parodontologie – Biologie orale

58^{ème} section : Réhabilitation orale

58-01 : Dentisterie restauratrice – Endodontie – Prothèses – Fonction-Dysfonction – Imagerie – Biomatériaux

L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse 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. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers

REMERCIEMENTS

À Monsieur le Professeur Michel LE GALL,
Président du jury,

*Docteur en Chirurgie Dentaire,
Spécialiste qualifié en Orthopédie-Dento-Faciale,
Professeur des Universités à l'École de Médecine Dentaire de Marseille, Praticien Hospitalier,
Chef du Département d'Orthopédie Dento-Faciale de l'École de Médecine Dentaire,
Chef de Service d'Orthopédie Dento-Faciale - Hôpital de la Timone Marseille,
Chercheur associé UMRT24 IFSTTAR Laboratoire de Biomécanique Appliquée,
Coordonnateur interrégion Sud du DES d'ODF.*

Vous me faites l'honneur de présider ce jury.

Je suis admiratif de la manière dont vous dirigez ce service avec passion et dévouement.

Pour l'énergie que vous nous transmettez au quotidien,

Pour votre expertise et votre curiosité vous poussant à actualiser en permanence vos savoirs,

Pour l'égalité dans le traitement de chacun de vos internes,

Pour votre sympathie et la qualité de nos discussions,

Veillez trouver dans ce travail l'expression de ma plus profonde admiration.

À Monsieur le Docteur Jacques BOHAR

Jury de thèse,

Docteur en Chirurgie Dentaire,

Spécialiste qualifié en Orthopédie-Dento-Faciale,

Maître de Conférences des Universités à l'École de Médecine Dentaire, Praticien Hospitalier.

C'est un honneur pour moi de vous voir siéger dans ce jury.

La passion que vous possédez pour votre métier est un exemple pour tous.

Pour le temps et l'énergie que vous dépensez dans la transmission de vos précieux savoirs,

Pour votre disponibilité en clinique et votre dévouement,

Veillez trouver dans ce travail le témoignage de ma grande estime.

À Madame le Docteur Camille PHILIP-ALLIEZ,
Jury de thèse,

*Docteur en Chirurgie Dentaire,
Spécialiste qualifié en Orthopédie-Dento-Faciale,
Maître de Conférences des Universités à l'École de Médecine Dentaire, Praticien Hospitalier,
Responsable de l'Unité Fonctionnelle d'Orthopédie Dento-Faciale – Hôpital de la Timone,
Chercheur associé UMRT24 IFSTTAR – Aix-Marseille Université.*

Je vous remercie de la confiance que vous m'accordez en acceptant d'être juge de ce travail.

Je suis admiratif de votre disponibilité et votre écoute attentive à tout moment,

De votre empathie dont vous faites preuve avec chacun d'entre nous et vos patients,

De votre bienveillance et votre humour, rendant nos discussions agréables,

Sachez toute la reconnaissance que j'ai à votre égard.

À Madame le Docteur Agathe FOUQUES,
Directrice de thèse,

*Docteur en Chirurgie Dentaire,
Spécialiste qualifiée en Orthopédie-Dento-Faciale,
Chef de clinique des universités - Assistant Hospitalier à l'École de Médecine Dentaire de
Marseille.*

Je vous remercie de m'avoir fait l'honneur de diriger ce travail.

Pour votre accompagnement et conseils cliniques lors de ma première année d'internat,

Pour votre rigueur et pertinence qui m'a été d'une aide précieuse pour rédiger ce travail,

Pour votre sympathie et votre jovialité,

Sachez toute la gratitude et le respect que j'ai à votre égard.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1 LES ANCRAGES OSSEUX.....	2
1.1 Généralités.....	2
1.1.1 Notion d’ancrage.....	2
1.1.2 Historique de l’ancrage	3
1.1.3 Intérêts des ancrages osseux	5
1.1.4 Biomécanique des ancrages osseux.....	6
1.2 Différents systèmes d’ancrages osseux.....	9
1.2.1 Mini-vis	9
1.2.2 Mini-plaques.....	14
1.2.3 Autres systèmes d’ancrage osseux	16
2 LES ALIGNEURS	20
2.1 Historique	20
2.2 Matériaux des aligneurs	21
2.2.1 Méthodes de fabrication des aligneurs	21
2.2.2 Différents types de matériaux utilisés	23
2.2.3 Propriétés des matériaux	25
2.3 Notions biomécaniques	32
2.3.1 Principes de la mécanique orthodontique.....	32
2.3.2 Biomécanique des aligneurs	33
2.4 Limitations actuelles.....	47
2.4.1 Efficience clinique des aligneurs	47
2.4.2 Raisons du défaut d’efficacité.....	48
2.5 Perspectives d’évolutions des aligneurs.....	51
2.5.1 Innovations des biomatériaux.....	51
2.5.2 Modifications pour optimiser l’utilisation actuelle.....	53
3 APPORTS DES ANCRAGES OSSEUX DANS L’EFFICACITE DES ALIGNEURS	56
3.1 Moyens techniques	56
3.1.1 Types d’attaches.....	56
3.1.2 Types d’éléments moteurs.....	57
3.2 Indications	58
3.2.1 Dimension transversale.....	58
3.2.2 Dimension antéro-postérieure.....	60
3.2.3 Dimension verticale.....	72
3.2.4 Canines incluses	84
CONCLUSION	87
TABLE DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX	A
BIBLIOGRAPHIE.....	I

INTRODUCTION

Le domaine de l'orthodontie a récemment connu deux révolutions marquantes. La première a eu lieu il y a plus de deux décennies avec l'introduction des ancrages osseux, en particulier les mini-vis. Cette avancée a bouleversé le concept d'ancrage en offrant de nouvelles perspectives pour les cas complexes et en repoussant les limites orthodontico-chirurgicales. Dernièrement, une autre révolution a émergé avec l'avènement de l'orthodontie digitale. Cette approche repose sur la simulation numérique de plans de traitement, entièrement individualisés, souvent suivie de l'utilisation d'aligneurs.

Toutefois, ces simulations virtuelles, trop peu souvent réalisées par des orthodontistes et dépendantes d'algorithmes reposants sur une intelligence artificielle encore imparfaite, ne doivent prétendre en aucun cas représenter fidèlement la réalité clinique. Ces "sets up" idéalisés peuvent faire oublier aux praticiens les limites des aligneurs, qui obéissent pourtant aux mêmes lois que les autres moyens orthodontiques étudiées depuis des décennies. D'autant plus que les aligneurs sont le fruit d'une technique récente, dont certains des mécanismes restent à ce jour incompris, particulièrement leur biomécanique. C'est alors à l'orthodontiste, par son expérience et ses connaissances cliniques, de juger de la faisabilité du plan de traitement proposé. Il en dépendra la réalisation des objectifs et la durée du traitement.

Afin d'améliorer la prédictibilité des simulations virtuelles, de nombreux outils dits « auxiliaires » sont venus compléter l'arsenal thérapeutique de l'orthodontiste. Les ancrages osseux apparaissent comme l'un d'entre eux. Toutefois, l'utilisation de ces derniers n'étant pas anodine, il convient de les indiquer à bon escient. La limite entre ce qui est réalisable avec ou sans ancrage osseux reste parfois difficile à établir. De plus, les moyens techniques utilisés afin d'optimiser leur association avec les aligneurs sont divers, avec leurs propres spécificités biomécaniques et implications cliniques.

Le but de ce travail de thèse est de passer en revue les avancées récentes concernant l'utilisation des ancrages osseux dans les traitements par aligneurs. Pour ce faire, nous commencerons par examiner les différents types d'ancrages osseux utilisés aujourd'hui en orthodontie et leur application. Ensuite, nous aborderons les connaissances actuelles sur les biomatériaux et la biomécanique des aligneurs, afin de définir leurs limites et leurs perspectives d'évolution. Enfin, selon les trois dimensions (transversale, antéro-postérieure, verticale), nous identifierons les indications où les ancrages osseux pourraient augmenter la prédictibilité des traitements ou les faciliter.

1 LES ANCRAGES OSSEUX

1.1 Généralités

1.1.1 Notion d'ancrage

L'**ancrage**, considéré du point de vue mécanique, se réfère à un moyen ou une structure utilisée pour retenir ou stabiliser un objet ou un système. Selon la SFODF (190), en mécanique orthodontique, l'ancrage peut être associé à un procédé ou dispositif qui, dans un système de force réciproque s'exerçant entre deux points, assure une stabilité suffisante pour l'un des deux. Autrement dit, l'ancrage fournit une résistance à des mouvements dentaires non voulus, dits effets parasites. Cette résistance, peut alors servir de point d'appui à l'application d'un système de force régi par les lois de la mécanique, et notamment la 3^{ème} loi de Newton : lorsqu'un corps A exerce une force F1 sur un corps B, le corps B exerce en réaction une force F2 sur A de même intensité mais de force opposée (**Figure 1**).

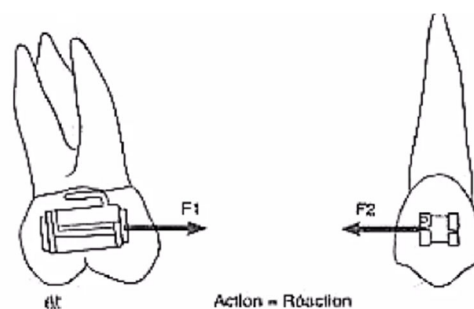


Figure 1 : 3^{ème} loi de Newton (47).

Toutefois, pour qu'une dent, un groupe de dents ou une arcade puissent servir d'ancrage, il faut que sa résistance soit supérieure à celle de l'entité à déplacer et à la force qui engage le déplacement. Ainsi, la résistance stable (RS), matérialisée par l'entité d'ancrage doit être supérieure à la résistance mobile (RM) et à la force motrice (FM) qui sont respectivement les dents à déplacer et le système de forces appliqué sur les dents : $RS > FM > RM$, c'est le trinôme de De Nevrezé. Si la résistance stable s'avère inférieure aux deux autres composants, il y aura donc une perte d'ancrage, qui peut être considérée comme un mouvement parasite lorsqu'elle n'est pas souhaitée.

Le contrôle de l'ancrage est donc un élément clé dans le succès des thérapeutiques orthodontiques entreprises, auquel il convient de songer et de résoudre avant l'entame du traitement.

1.1.2 Historique de l'ancrage

Depuis les débuts de la profession, la gestion de l'ancrage n'a jamais cessé d'interroger les orthodontistes. Izard, dans son ouvrage intitulé « L'orthodontie » (93), publié en 1930, le définissait comme un élément résistant sur lequel peut s'appuyer une force motrice. Il dissociait l'ancrage, partie du squelette ou dentaire, et le moyen d'ancrage, dispositif artificiel qui unit l'ancrage à la force motrice (**Figure 2**).

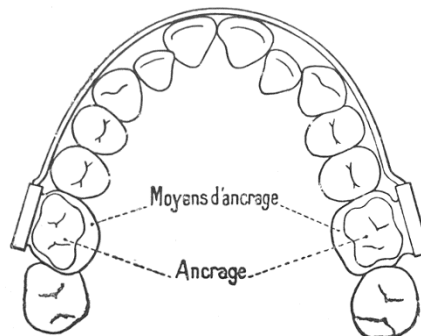


Figure 2 : Ancrage et moyens d'ancrage (93).

Par la suite, avec l'avènement des appareils multi-attaches, la gestion de l'ancrage a évolué et les moyens employés se sont multipliés.

- La manière la plus évidente consistait à s'appuyer seulement sur l'ancrage dentaire naturel, ou **ancrage intra-buccal**.

Dans cette méthode, certaines dents, disposant chacune de leur propre valeur d'ancrage, sont sollicitées en tant qu'unité d'ancrage afin de réaliser des mouvements sur d'autres dents de la même arcade ou opposée. La capacité d'ancrage de l'entité est variable et limitée. Celle-ci peut fréquemment se retrouver dépassée par des besoins de traitement plus complexes (63).

Dans des techniques plus anciennes tel que l'Edgewise, des adaptations furent parfois mises en place afin de préparer l'ancrage d'une ou d'un groupe de dents et donc éviter les effets parasites. Longtemps, la **préparation d'ancrage** a été une étape importante de certains traitements. Elle consistait à incorporer des informations d'angulations négatives dans les attaches des secteurs postérieurs, afin de renforcer l'ancrage prémolo-molaire, notamment pour contrer la composante mésialante mandibulaire d'une mécanique de cl II (**Figure 3**).

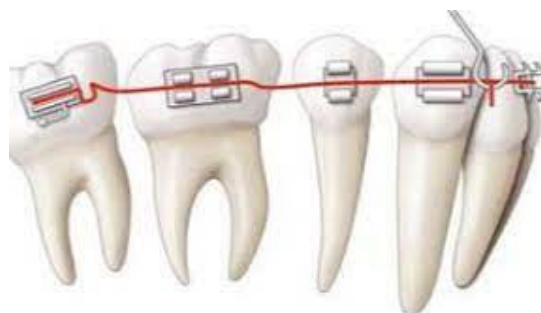


Figure 3 : Préparation d'ancrage à la mandibule (47).

Il a également été pensé des moyens pour simplement **renforcer** cet ancrage, soit par le port de mécanique intra-orale qui peuvent modifier les systèmes de forces, soit en ligaturant entre elles certaines dents, ou en utilisant la friction entre les fils et les attaches.

Toutefois, ces situations de gestion d'ancrage sont délicates. Elles nécessitent la coopération, et peuvent rapidement mener à des effets parasites majeurs si l'ancrage n'est pas correctement contrôlé au moment où il le requiert.

- En réponse à ces difficultés, **les ancrages extra-oraux** se sont développés en tant qu'autre moyen de renforcer l'ancrage dentaire naturel.

Ces dispositifs sont placés à l'extérieur de la cavité buccale et fixés au crâne ou à la nuque. Ils offrent une résistance suffisante pour éviter les effets réciproques entre résistance stable et mobile. Toutefois, selon le type de traction les composantes de la force exercée ne seront pas les mêmes et peuvent provoquer des effets de rotation sur le complexe maxillaire et un impact sur la hauteur de l'étage inférieur de la face. Ces effets doivent être connus et maîtrisés du praticien utilisant ces dispositifs (168). Les limites restent le besoin de coopération, indispensable à l'efficacité de l'appareillage. De plus, il est souvent compliqué de faire accepter ces dispositifs aux patients, inconfortables et inesthétiques, d'autant plus chez l'adulte.

- Puis progressivement et grâce aux progrès réalisés en implantologie, **les ancrages osseux** sont venus révolutionner la problématique d'ancrage en orthodontie.

Le premier type d'ancrage osseux à visée orthodontique à avoir été développé sont les mini-vis. Les premiers essais cliniques concluants ont été réalisés par Creekmore et Eklund (45) qui publièrent un cas d'ingression et de vestibulo-version des incisives maxillaires à l'aide de vis chirurgicales insérées dans l'épine nasale antérieure. A cette époque, c'est l'apparition des implants ostéo-intégrés (Douglas et Killiany 1987, Roberts 1990, Oddlan 1992) puis de l'Onplant (Block et Hoffman 1995) (7).

Ces systèmes, bien que proposant une solution aux problématiques d'ancrage, présentaient les mêmes inconvénients que les implants dentaires conventionnels : délais d'ostéo-intégration avant la mise en charge, exclusion chez les adolescents qui présentent encore une apposition/résorption osseuse importante, interventions invasives à la pose/dépose, coût économique... Les orthodontistes ont rapidement senti le besoin d'un système d'ancrage temporaire, simple d'utilisation, sans délai d'attente pour la mise en charge orthodontique et facilement déposable. Depuis, les designs et tailles de mini-vis se sont multipliés et leur utilisation a connu un grand essor.

En parallèle du développement des mini-vis, Jenner a été le premier à rapporter l'utilisation de mini-plaques comme système d'ancrage orthopédique et orthodontique en 1985 (94). Ces plaques d'ostéosynthèse modifiées étaient couramment utilisées dans la chirurgie orthognathique. Au cours des dix dernières années, Hugo De Clerck (50) et Junji Sugawara (195) ont codifié l'introduction de ce système d'ancrage en orthodontie.

Plus récemment, certains auteurs tentent de développer de nouveaux types d'ancrages osseux permettant de répondre à des situations spécifiques. Chillès et al.(39), ont alors élaboré un système qui consiste à enfouir une micro-vis sous la gencive libre, duquel émerge un bras en TMA pouvant être relié au dispositif orthodontique. L'Abalakov (46), ingénieuse technique inspirée de l'alpinisme est un autre exemple de nouveaux moyens d'ancrage osseux.

1.1.3 Intérêts des ancrages osseux

En assurant un ancrage fixe et fiable dans le tissu osseux, dit absolu, les ancrages osseux permettent de réaliser des mouvements dans des environnements où **l'ancrage dentaire naturel est insuffisant**. Ces situations sont fréquentes, particulièrement chez le patient adulte (117) :

- Nombre de dents réduit : agénésies, extractions multiples ;
- Crêtes alvéolaires résorbées ;
- Densité osseuse moindre ;
- Rapports d'occlusion parfois instables ;
- Maladie parodontale pouvant entraîner des mobilités et des migrations dentaires.

Ils autorisent également la réalisation **de déplacements complexes** à effectuer par des mécaniques conventionnelles, les principaux étant :

- Le contrôle vertical chez les hyperdivergents ;
- L'ingression des secteurs postérieur et antérieur en cas de sourire gingival (159, 172, 205) ;
- Le recul molaire(100, 102) ;
- La gestion des mécaniques asymétriques ;
- Les bascules du plan d'occlusion.

Dans ces cas précis, les ancrages osseux vont permettre d'améliorer les résultats du traitement en dépassant les limites du simple moyen orthodontique utilisé. Classiquement, ce moyen a été depuis de nombreuses années un auxiliaire à l'utilisation d'un appareil multi-attaches. Bien que certaines indications soient communes, nous reviendrons dans notre troisième partie, sur les indications des ancrages osseux plus particulièrement adaptées aux traitements par aligneurs.

De plus, ils **limitent la coopération du patient** en permettant parfois de s'affranchir des renforts d'ancrage tels que des forces extra-orales ou des tractions intermaxillaires.

Enfin, ces ancrages peuvent être employés dans le cadre de **thérapeutique orthopédique** pour contrôler ou réorienter la croissance.

Dans le cadre des traitements des dysmorphoses, les trois indications principales sont :

- Le traitement de la rétrognathie maxillaire dans certaines typologies de classe III. Les travaux d'Hugo De Clerck, utilisant la pose de mini-plaques comme ancrage associé à des tractions intermaxillaires, a démocratisé une pratique permettant de repousser les limites chirurgicales (51) ;
- La disjonction squelettique qui peut être accomplie en posant des ancrages de part et d'autre de la suture palatine et connectés à un dispositif susceptible de produire les forces nécessaires à la rupture de la suture, dont l'efficacité a maintenant été démontrée par des méta-analyses (16, 99) ;
- Le traitement de l'hyperdivergence, dans lequel les ancrages seront utilisés afin d'appliquer des forces ingressives au niveau molaire, provoquant une diminution de la hauteur faciale inférieure.

1.1.4 Biomécanique des ancrages osseux

Comme expliqué précédemment, la qualité de l'ancrage offert par les ancrages osseux a ouvert de nouvelles possibilités dans la réalisation de nos traitements orthodontiques. Afin de comprendre leur apport, une maîtrise de la biomécanique orthodontique élémentaire est fondamentale.

1.1.4.1 Centre de résistance

Le centre de résistance (CR) est le point du corps à partir duquel si une force passe, elle développera un mouvement de translation pure de ce corps. Celui-ci dépend du milieu dans lequel l'objet est placé. Une dent sur l'arcade est placée dans un milieu hétérogène :

- Couronne dans la cavité buccale ;
- Racine dans l'os alvéolaire.

Chaque dent dispose de son propre centre de résistance individuel qui sera déplacé vers le milieu le plus dense, c'est-à-dire la partie apicale. Sa position précise dépend de sa morphologie ainsi que du contexte osseux et parodontal qui influencera le milieu. Lorsque l'on considère un groupe de dents, le centre de résistance du système se situera quelque part sur une ligne joignant les centres de résistance de ces dents.

Sa position est décrite pour être située environ 7mm au-dessus de la crête alvéolaire pour les dents antérieures, et autour de la zone de furcation pour les dents postérieures, dans une étude à partir de l'imagerie 3D par Nabbout et al. (154). Pour le CR d'une arcade complète, il a été théoriquement défini autour de la seconde prémolaire au maxillaire et légèrement plus distalement à la mandibule (**Figure 4**).

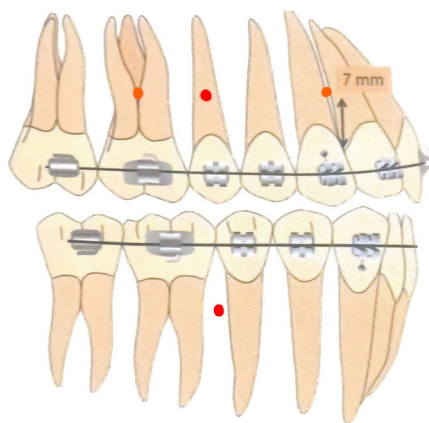


Figure 4 : Positionnement des centres de résistances (CR) des dents antérieures et postérieures (En orange), et des arcades (En rouge) (58).

Il est essentiel de comprendre l'intérêt du passage par le CR pour effectuer nos mouvements orthodontiques. En effet, plus la force motrice passe à distance du CR sur une dent, un groupe de dents, ou une arcade, plus les effets parasites seront importants (versions, rotation d'arcade...). A l'inverse, une force passant par le centre de résistance générera un mouvement de translation.

L'utilisation des ancrages osseux, offrant la possibilité de travailler proche du CR, rend cette compréhension encore plus cruciale, tout en permettant un contrôle plus facile des systèmes de force appliqués.

1.1.4.2 Ancrage Direct

Une mini-vis utilisée comme ancrage direct constitue le point d'ancrage de la force. Sa ligne d'action passera alors par la tête de la mini-vis. L'élément moteur (élastique intra-arcade, ressort, chaînette élastomérique) est directement attaché à cette dernière. La force délivrée s'exprimera depuis la vis jusqu'à son point d'application.

En conséquence, la nouvelle situation générée dans la dimension antéro-postérieure et pour le plan occlusal sera dépendante du contrôle de paramètres tels que (58) :

- Le positionnement vertical de la mini-vis, idéalement en position médiane dans la continuité de centres de résistance de l'arcade, toujours dans la gencive attachée ;
- Le point d'ancrage sur le dispositif orthodontique, qui conditionnera la ligne d'action de la force exercée, et donc le moment instauré sur les incisives et la rotation d'arcade associée.

Ces situations vont être décrites à partir de deux exemples :

Dans cette première situation (**Figure 5**), l'objectif est la rétraction en masse de l'arcade mandibulaire pour corriger la mésioposition du secteur 4, simultanément à une distalisation séquentielle du secteur 1.

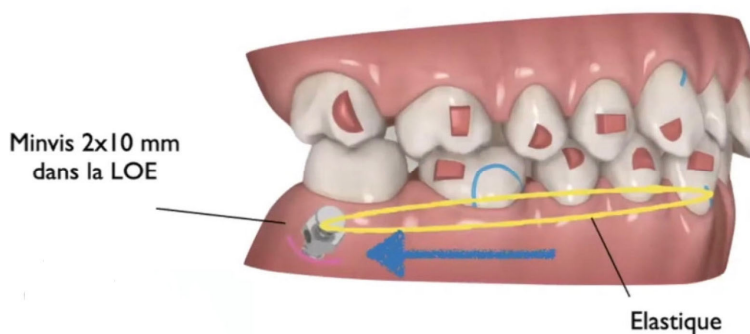


Figure 5 : Traction directe exercée entre la mini-vis et la canine
(Courtoisie du Dr Bouhnik).

La mini-vis est placée dans la continuité du centre de résistance de l'arcade mandibulaire. Toutefois, par le point d'ancrage orthodontique utilisé, ici un bouton collé sur la canine liée à l'arcade par la gouttière, la ligne d'action de la force passe au-dessus du centre de résistance du bloc antérieur et de l'arcade mandibulaire. Il sera donc généré un moment de version corono-linguale du secteur antérieur mandibulaire.

Afin d'éviter ces effets parfois non souhaités, un point d'ancrage médian, à l'aide d'un power arm collé (**Figure 6**), peut permettre d'instaurer un vecteur plus horizontal, sans rotation du plan occlusal.



Figure 6 : Distalisation d'arcade sur mini-vis à l'aide de power arms collés (Courtoisie du Dr Bouhnik).

Dans cette seconde situation, la ligne d'action passant proche des centres de résistances dentaires et de l'arcade, l'effet résultant en sera majoritairement une translation.

1.1.4.3 Ancrage Indirect

L'ancrage osseux peut également être utilisé comme un renfort d'ancrage dentaire préexistant en étant relié à une ou plusieurs dents, ou à un moyen d'ancrage, illustré par la configuration ci-dessous (**Figure 7**). Les mécaniques orthodontiques utilisées seront alors conventionnelles, seulement ce complément d'ancrage permettra de limiter les mouvements dentaires réactionnels.

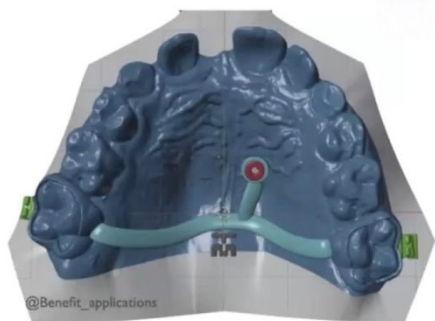


Figure 7 : Renfort d'ancrage des premières molaires maxillaires par un arc transpalatin directement relié à une mini-vis palatine. Visualisation numérique pré-impression d'un appareil individualisé (Courtoisie du Dr Bouhnik).

L'ancrage indirect peut s'avérer crucial dans certaines situations (58) :

- Stabiliser un segment d'arcade afin de transférer l'action à un autre groupe de dents ou à l'arcade antagoniste (mécaniques d'arcade asymétriques) ;
- Renforcer l'ancrage dentaire naturel qui peut être utilisé avec excès dans des situations particulières (mise en place de dent incluse, mésialisation molaire) ;
- Dans les cas où un obstacle anatomique rend impossible la pose d'un ancrage osseux dans un site favorable à un ancrage direct.

1.2 Différents systèmes d'ancrages osseux

Il existe 3 grands dispositifs d'ancrage temporaire pouvant être utilisés dans le cadre d'un traitement orthodontique.

1.2.1 Mini-vis

L'ancrage osseux le plus fréquemment utilisé en orthodontie est la mini-vis, particulièrement en raison de sa simplicité de pose et de dépôt pouvant être réalisées par l'orthodontiste.

1.2.1.1 Terminologie

Beaucoup de termes sont retrouvés dans la littérature (116) : micro-implant, mini-implant orthodontique, micro-vis, mini-vis, vis d'ancrage ...

Pour certains auteurs, tout dispositif inséré dans l'organisme doit être appelé implant. De plus, ce terme se justifierait par sa proximité avec l'implant dentaire à visée prothétique : sa biocompatibilité, l'usage du titane et une part d'ostéo-intégration dans le tissu osseux. À l'inverse, d'autres réfutent ce terme face à l'aspect temporaire du dispositif. Dans la littérature, rédigée en anglais, le terme le plus retrouvé est mini-screw implants.

Enfin, l'ensemble des dispositifs d'ancrages orthodontiques peut être référé par l'abréviation anglo-saxonne TAD'S (Temporary Anchorage Devices).

1.2.1.2 Ostéo-intégration ou fibro-intégration ?

En s'accordant à la définition faite par Brånemark, l'ostéo-intégration est effective lorsqu'un contact cellulaire os-implant recouvre 50% de la surface du dispositif.

Toutefois, à la différence des implants dentaires, l'ostéo-intégration n'est pas nécessaire pour l'utilisation des mini-vis en orthodontie. Il s'agit plutôt d'une fibro-intégration, ce qui est confirmé par de nombreux auteurs (147). Le taux d'ostéo-intégration varie selon les études et les patients, et a tendance à augmenter avec le temps (143, 167).

La survie des mini-vis est donc particulièrement dépendante de sa stabilisation initiale :

- Un protocole d'insertion limitant le traumatisme chirurgical ;
- Des conditions de cicatrisation favorables ;
- Qualité de l'os (densité, épaisseur) ;
- Mise en charge (intensité et délai).

1.2.1.3 Matériau : acier ou titane ?

Dans tous les cas, les mini-vis sont fabriquées dans des matériaux **biocompatibles**.

Historiquement, la plupart des systèmes optaient pour du titane de grade 4, comme les implants dentaires. Plus récemment, sont utilisés des alliages de titane associés au vanadium et à l'aluminium (TiAl7V4). Cet alliage offre une résistance à la corrosion (vanadium), aux fractures (aluminium), et par leur biocompatibilité un certain degré d'ostéo-intégration, assurant stabilité sans complexifier la pose.

L'acier, qui fournit pourtant une grande résistance mécanique, présente un risque d'allergie lié au nickel dans 1 à 2% des cas et est plus cher à fabriquer (116).

1.2.1.4 Designs de mini-vis

La mini-vis est composée de trois parties (3) (**Figure 8**):

- Une partie intra-osseuse, le corps, fileté, cylindro-conique, qui conditionnera les qualités mécaniques. Les dimensions sont variables selon les sites implantaires :
 - Diamètre de 1,2 à 2mm. Les faibles diamètres facilitent la pose de la vis dans les procès alvéolaires en situation inter-radicaire mais augmentent le risque de fracture. Le diamètre devra être augmenté dès que l'espace d'insertion le permet ;
 - Longueur de 6 à 12 mm. La longueur est adaptée au site anatomique et à la qualité osseuse. Lorsque la corticale osseuse est fine et qu'une partie de l'ancrage est recherché dans l'os trabéculaire on augmente la longueur de la vis (145). Ce choix de longueur doit assurer une profondeur intra-osseuse d'un minimum de 6mm ;
 - La pointe, à l'extrémité du corps, est cruciale afin de faciliter son insertion. Aujourd'hui, toutes les vis sont auto-taraudantes et la plupart sont auto-forantes, évitant ainsi un préforage sur toute la longueur de la vis qui peut provoquer un traumatisme chirurgical ou bien altérer la stabilité du dispositif.
- Une partie transgingivale, le col, disposant d'un rôle physiologique. Il est lisse afin d'éviter l'accumulation de plaque et les phénomènes inflammatoires et dont la hauteur doit être adaptée à l'épaisseur gingivale ;
- Une partie extra gingivale, la tête, permettant le vissage et facilitant le lien avec l'appareillage orthodontique. Plusieurs formes de tête sont proposées en fonction des fabricants et des situations cliniques : on distingue des têtes offrant un seul point d'ancrage (bouton, trou, gorge) de celles en forme de bracket qui permettent d'assurer un contrôle tridimensionnel (117, 145).

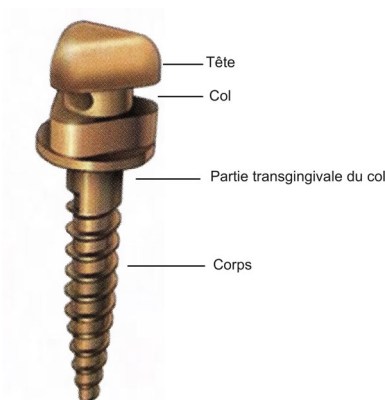


Figure 8 : Les différentes parties d'une mini-vis orthodontique (58).

1.2.1.5 Localisations

La sélection du site de mise en place de la mini-vis doit être considérée comme un élément majeur dans le succès de l'approche thérapeutique. Les sites d'insertion possibles ont été établis après analyse d'une série de crânes secs par Melsen (145).

La localisation des mini-vis peut être divisée en deux grandes catégories, les mini-vis inter-radiculaires et extra-radiculaires. L'ensemble des possibilités de positionnement des mini-vis au sein de la cavité buccale sont décrites dans les illustrations ci-dessous (**Figure 9**).

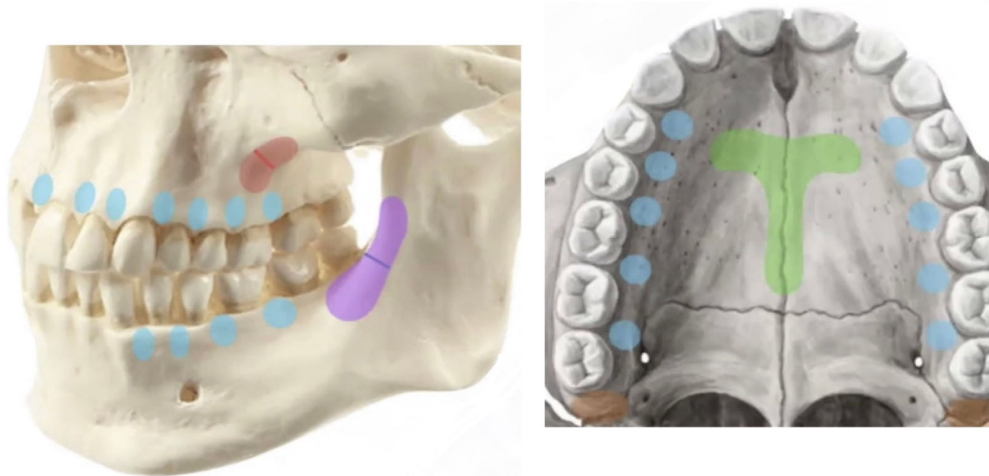


Figure 9 : Différents sites d'insertion des mini-vis : inter-radiculaires (Bleu), infra-zygomatique (Rouge), ligne oblique externe (Violet), zone palatine (Vert) (145).

1.2.1.5.1 Inter-radiculaires

La distance inter-radiculaire est souvent un facteur limitant de la pose de ce type de vis (163).

Prenant compte de cette limitation, les mini-vis présenteront les caractéristiques suivantes :

- Une longueur réduite 8 mm ;
- Un diamètre réduit de 1,3 à 1,4 mm ;
- Des localisations diverses, guidées par les orientations radiculaires, la quantité d'os présent et les mouvements à réaliser ;
- Plutôt simple à placer, souvent en antérieur où la visibilité est bonne ;
- Positionnement en gencive attachée, la cicatrisation sera favorable.

1.2.1.5.2 Extra-radiculaires

L'avantage évident du placement des mini-vis en position extra-radiculaire est l'absence d'interférence anatomique ce qui permettra une grande amplitude de mouvement orthodontique. Elles présenteront les caractéristiques suivantes :

- Des localisations précises ;
 - o Au maxillaire, zone infra-zygomatique, basse et haute, et zone palatine en T ;
 - o À la mandibule, ligne oblique externe ou plus en distal au niveau du ramus ;
- Une longueur augmentée : 8-14 mm ;

- Un diamètre augmenté : 2 mm ;
- Une variabilité du volume osseux dans la zone d'insertion dépendant de la divergence faciale. Par exemple, une étude réalisée à partir de l'analyse de CBCT a démontré que les hyperdivergents ont tendance à présenter des zones infra-zygomatiques plus longues et profondes (**Figure 10**). Cette particularité anatomique peut être prise en compte dans le choix de la longueur de la mini-vis à insérer (89) ;

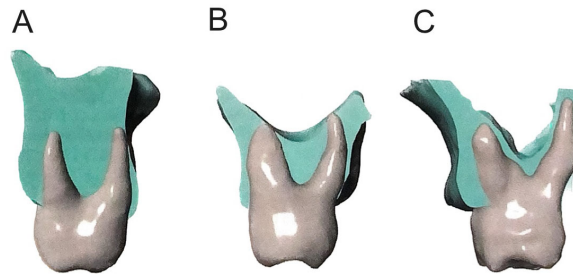


Figure 10 : Reconstruction 3D de la quantité osseuse de la zone infra-zygomatique.
A. Sujet hyperdivergent, B. Sujet normodivergent, C. Sujet hypodivergent (89).

- L'acte chirurgical nécessitera une bonne connaissance anatomique et une certaine expérience ;
- Un placement des mini-vis en gencive libre augmentant donc le risque d'interférences avec les tissus mous et d'enfouissement.

1.2.1.6 Techniques de mise en place

Le succès des mini-vis est en grande partie dû à la relative simplicité de la procédure chirurgicale et de la gestion post-opératoire en comparaison aux autres moyens d'ancrages osseux.

1.2.1.6.1 Mise en place et dépose aisées

Le protocole de pose débute par une analyse de la situation du site d'insertion. Tout obstacle anatomique (racines, sinus, émergence des structures vasculo-nerveuses), ainsi que la qualité (volume, densité) de l'os et des tissus parodontaux, doivent être identifiés et examinés par des examens cliniques et radiographiques.

Bien qu'un examen d'imagerie en 3D (CBCT) procure des images précises et utiles dans certaines situations, un examen 2D type rétro-alvéolaire fournira des informations suffisantes dans la majorité des cas (98).

Les examens 3D seront indiqués dans les conditions plus délicates. Ils permettront une sélection de la longueur de la mini-vis et de l'angle d'insertion le plus approprié (58).

La mise en place se déroulera ensuite de la manière suivante :

- Anesthésie de surface, seulement gingivale. Le tissu osseux n'étant pas innervé, une insertion strictement osseuse ne procurera aucune douleur au patient. À l'inverse, si un contact entre la vis et une racine dentaire se produit, une alerte douloureuse du patient informera le patient d'une erreur devant être rectifiée immédiatement ;
- Le pré-forage préalable à l'insertion permet de réduire considérablement la force verticale requise pour pénétrer la corticale osseuse : de 15N sans à 4,7N avec pré-

forage pour une vis de diamètre de 1,3 mm (143). Une force trop importante lors du vissage peut provoquer un risque de fracture métallique majoré. Dans ce sens, le pré-forage ne sera indiqué que dans des densités osseuses importantes (zone rétro-molaire mandibulaire) (158) ;

- Le vissage peut être réalisé manuellement, ce qui permet de conserver une sensation tactile et donc une alerte en cas de résistance, ou à l'aide d'un contre-angle à basse vitesse, pour certains sites moins accessibles par son angulation. Plus récemment, des rotatifs manuels permettent une simplicité et sécurité majorées en combinant les intérêts mécaniques et la sensation tactile ;
- Les axes d'insertion horizontal et vertical devront être maintenus durant l'ensemble de la procédure.

À l'issue de son utilisation, la dépose sera réalisée sans anesthésie.

1.2.1.6.2 Mise en charge immédiate

La majorité des études recommandent une activation initiale de 30 à 50g. Pour des densités osseuses plus importantes, l'intensité de la force peut augmenter jusqu'à 200g. Ces dernières démontrent que cette procédure de mise en charge n'empêche en rien la formation osseuse autour de la mini-vis (185). Cette mise en charge immédiate est surtout un avantage considérable pour l'orthodontiste.

1.2.1.7 Complications

Les complications les plus fréquemment retrouvées sont les suivantes :

- **Instabilité** de la mini-vis ;

Le taux d'échec de la mise en place des mini-vis est fortement corrélé à son site d'insertion. Une revue systématique regroupant plus de 60 études, s'est intéressée au taux d'échec des mini-vis selon la localisation de mise en place (149) (**Figure 11**). Selon les auteurs, les mini-vis ayant le meilleur taux de survie sont palatines (0 à 5% de perte), bien meilleures qu'en vestibulaire (9 à 10%). Les vis les plus sujettes à l'échec sont ensuite celles inter-radicaire mandibulaires, en raison de la difficulté d'accès et de la plus grande mobilité gingivale. Enfin les mini-vis les plus instables sont les infra-zygomatiques (+ de 15%). Nous pouvons également noter que les auteurs ont volontairement écarté la position linguale mandibulaire, non recommandée en pratique courante (gêne pour le patient, fort taux d'échec...).

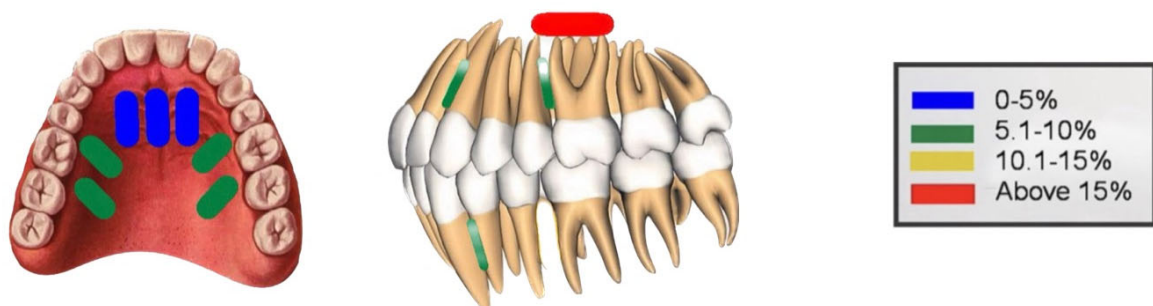


Figure 11 : Taux d'échec des mini-vis corrélé au site d'insertion (149).

- **Dommages radiculaires ;**

Les fractures ou lésions radiculaires représentent le plus grand risque lié au placement des mini-vis et sont généralement dues à un manque d'observance du protocole de la part de l'opérateur :

- Absence de pré-forage dans un os d'une densité excessive ;
- Changement d'axe d'insertion ;
- Insertion en force en dépit d'une racine ;
- Incomplète insertion de la tête de vis.

Lorsque la lésion est limitée au ciment, elle reste bien souvent réversible. À l'inverse, si celle-ci atteint la dentine, un processus de résorption sera mis en place et la dent devra bénéficier d'une prise en charge endodontique (97).

- **Inflammation gingivale ;**

L'inflammation gingivale peut conduire à la perte de la mini-vis (6). L'insertion en gencive libre augmente grandement ce risque, par enfouissement progressif de la tête de vis. Le patient doit veiller à maintenir une hygiène stricte autour de celle-ci.

- **Fracture** de la mini-vis ;

Les facteurs favorisant ce type de complication sont (117) :

- Vis d'un faible diamètre (en dessous de 1,6 mm) ;
- Selon le type de matériau : risque plus élevé avec le titane pur suivi de l'alliage de titane et enfin l'acier ;
- Dans un os de forte densité nécessitant un torque de vissage incompatible avec le type de vis (alliage et diamètre).

La fracture de la mini-vis peut intervenir lors du dévissage, certainement en raison d'une ostéo- intégration partielle ou d'une fatigue due aux sollicitations mécaniques et musculaires.

1.2.2 Mini-plaques

1.2.2.1 Description

Ce sont des plaques d'ostéosynthèse issues de la chirurgie orthognathique. Elles ont été modifiées afin de correspondre aux exigences d'un traitement orthodontique. Elles peuvent être placées sur divers sites de la corticale osseuse externe maxillaire et mandibulaire.

La principale différence face aux plaques chirurgicales réside dans la **modification de leurs extrémités** pour qu'elles puissent s'ancrer facilement au dispositif orthodontique (170) (**Figure 12**) :

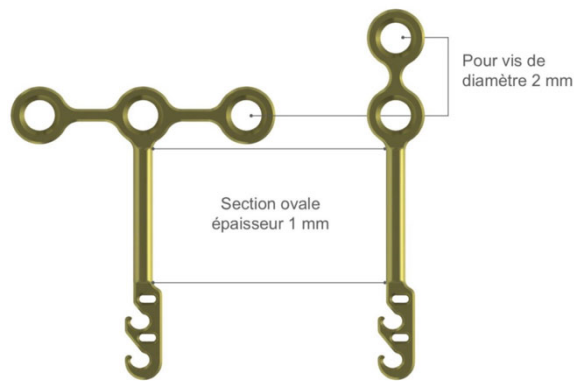


Figure 13 : Deux types de mini-plaques, en T et en I (170).

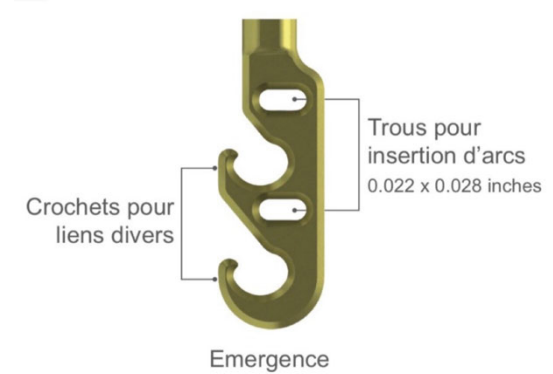


Figure 12 : Spécificités de l'émergence des mini-plaques orthodontiques (170).

- Leur épaisseur est réduite, d'environ 1,5 mm, et sont fabriquées en titane ou en alliage de titane ;
- Elles existent en différentes formes (**Figure 13**) et tailles (194) et peuvent être pliées ou découpées pour s'adapter au contour de la corticale au niveau du site d'insertion ;
- Elles sont temporairement fixées à l'aide de vis mono-corticales.

Toutes les plaques se composent de **trois parties distinctes** :

- La tête, point d'ancrage au système orthodontique :

C'est la partie visible dans la bouche, émergeant au niveau de la gencive attachée. Elle peut avoir différentes formes : circulaire, en crochet ou en tube, permettant la fixation des systèmes de traction orthodontique (41). Certaines têtes sont flexibles, leur forme étant modifiable selon les besoins.

- Le bras, conditionnant la santé parodontale :

Il peut être rectangulaire ou rond. Il traverse les tissus mous au niveau de la jonction muco-gingivale, soit de manière transgingivale, soit transmuqueuse.

- Le corps, assurant la stabilité au contact du tissu osseux :

Il se situe sous le périoste et est fixé à l'os par 2 ou 3 vis de fixation. Il peut se présenter sous quatre formes différentes : T, L, Y, I.

Le choix du **type de plaque** (T, L, Y, I), de la **longueur du bras** (5, 7, 10 mm) et du **nombre de vis** repose sur **plusieurs paramètres** (202) :

- Le site d'insertion ;
- La densité osseuse (2 ou 3 vis) ;
- La profondeur du vestibule ;
- La typologie faciale ;
- Les nécessités thérapeutiques.

1.2.2.2 Avantages face aux mini-vis

Le choix entre une mini-vis ou une mini-plaque est parfois difficile à établir. Pour cela, le praticien doit avoir à l'esprit les principales caractéristiques des mini-plaques :

- Premièrement, elles disposent d'une **grande fiabilité** :

Selon la littérature, leur taux de réussite varie entre 94% dans le traitement de cas divers (197) et 97% dans le traitement orthopédique des classes III squelettiques. Une revue systématique en 2012 a rapporté un taux de succès supérieur à 90% pour les mini-plaques (203). Cette fiabilité est considérée comme leur avantage majeur.

- Ensuite, leur **stabilité** est remarquable :

La stabilité primaire des mini-plaques dépend de la rétention mécanique des vis de fixation dans l'os avec une mise en charge immédiate sans attendre l'ostéo-intégration. Une étude conclut que les mini-plaques offrent une stabilité supérieure aux mini-vis (146).

- De plus, elles permettent une **amplitude de mouvement** dentaire étendue :

Les mini-plaques peuvent être positionnées sur des sites osseux éloignés de la crête alvéolaire, évitant ainsi les racines dentaires et les structures anatomiques sensibles. Elles réduisent le risque de lésions tissulaires telles que l'impact radiculaire et permettent un mouvement libre des racines à déplacer, offrant ainsi la possibilité de réaliser des déplacements dentaires de grande amplitude sans obstacle-(34,43).

Cependant, face aux mini-vis, elles présentent également des inconvénients non négligeables :

- Leur pose nécessite une **intervention chirurgicale plus invasive** :

En effet, l'utilisation des mini-plaques implique deux interventions chirurgicales avec un décollement sous-périosté : une pour l'insertion et une pour la dépose. Les suites opératoires peuvent être marquées par un œdème parfois important. On considère donc leur mise en place comme un acte invasif.

- Enfin, leur **coût** est globalement plus **élevé** (32).

Par les avantages décrits ci-dessus, leurs indications dépassent celles des mini-vis. Leur qualité d'ancrage supporte des forces plus importantes, indispensables à des reculs en masse d'arcade ou à une utilisation à visée orthopédique.

1.2.3 Autres systèmes d'ancrage osseux

En parallèle des deux systèmes principaux qui sont les mini-vis trans gingivales longues et les mini-plaques, d'autres types d'ancrage se sont développés.

1.2.3.1 Mini-vis ou micro-vis corticales courtes enfouies

Les mini-vis corticales courtes utilisées comme ancrage squelettique ont été développées par Chillès et al. (39). Elles sont enfouies sous la muqueuse en fond de vestibule et sont reliées à un fil formé d'une boucle et d'un ou deux bras. La vis passe à travers la boucle et la plaque contre la surface osseuse. Le bras émerge dans la cavité buccale à travers la mini-vis et forme un crochet pour pouvoir être finalement relié à un moyen de traction (chainette, élastique...) (**Figure 15**).

A l'instar des mini-vis trans gingivales, les mini-vis corticales sont en alliage de titane TiAl6V4, de surface lisse, auto-forantes et auto-taraudantes. Toutefois, elles sont courtes (5 mm) et de faible diamètre (2 mm). La partie intra-osseuse d'environ 3 mm est quasiment limitée à la corticale (**Figure 14**).

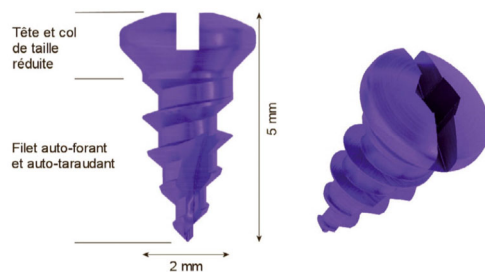


Figure 14 : Dessin d'une micro-vis (39).



Figure 15 : La micro-vis est enfouie, la connectique émerge au fond du vestibule (39).

Les fils utilisés comme connectiques sont de section ronde et de diamètre 0.018-in (0,45 mm). Ils peuvent être en TMA, généralement activés en ressort pour un ancrage direct actif, ou bien en acier, plus rigides pour un ancrage direct passif, ou indirect. Ils sont façonnés par le praticien à l'aide d'une pince de tweed de sorte à créer une ou deux boucles suffisamment larges pour ne pas être entraînées en rotation lors du vissage, tout en étant suffisamment étroites pour ne pas s'échapper de la tête de la vis lors du serrage final.

Les sites d'implantation sont tous extra-alvéolaires, en fond de vestibule, l'os cortical étant à ce niveau épais et dense (**Figure 16**). Au maxillaire, on les retrouve à l'orifice piriforme et au processus zygomatique (zones A et B). À la mandibule, ils peuvent se placer dans la symphyse, sur la ligne oblique externe, ou bien dans la zone rétro-molaires (zones C, D et E).

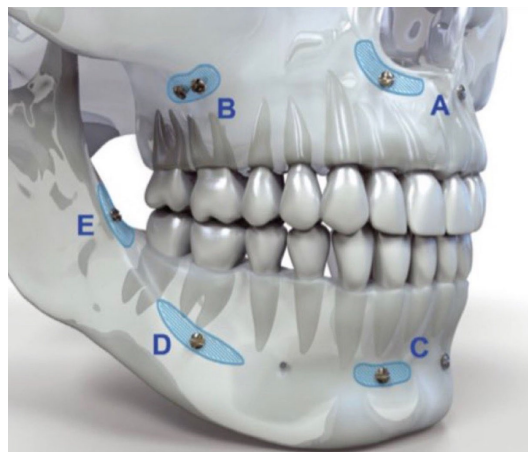


Figure 16 : Différents sites d'implantation des micro-vis (39).

Finalement, selon les auteurs, en comparaison aux autres types d'ancrage osseux, l'intérêt des micro-vis est à plusieurs niveaux (38) :

Au niveau **matériel**, quelques connectiques de forme standard permettent de traiter tous les cas cliniques. Elles sont stérilisées sous sachet et placées en même temps que les vis.

Aux niveaux **anatomique et chirurgical**, les sites d'insertion sont bien définis et ne nécessitent pas d'examen complémentaire. Les micro-vis sont toujours placées dans un os basal bien corticalisé quels que soient l'âge et le cas clinique. Elles sont utilisables même dans les cas d'atteintes parodontales importantes (37) ou de corticotomies, contrairement aux mini-vis transgingivales qui nécessitent, elles, de trouver un os alvéolaire de bonne qualité sous de la muqueuse attachée (193). C'est une chirurgie mini-invasive simple, rapide et sans risque qui peut être à la portée de l'orthodontiste lui-même.

Au niveau **mécanique**, la situation de la vis au-delà des apex limite le risque d'interférence avec les racines dentaires. Les mouvements dentaires peuvent être de grande amplitude car l'émergence en fond de vestibule permet une grande longueur active de fil. Le système est totalement polyvalent. Tous les mouvements orthodontiques peuvent être réalisés, de manière autonome ou en complément d'un appareil multi-attache ou des aligneurs.

Au niveau **confort**, il n'y a aucune tête de vis apparente ni aucun relief mécanique susceptible d'irriter la muqueuse jugale ou labiale. À l'émergence de la connectique, au fond du vestibule, il n'y a pas de déplacement fonctionnel des tissus, donc pas de risque non plus d'interférence avec la muqueuse libre. Toutefois, ce dernier doit veiller à être correctement replié : ni trop proche car il risquerait l'enfouissement, ni trop éloigné car il provoquerait une irritation.

Au niveau **fiabilité**, une étude longitudinale a été réalisée au sein du cabinet du Dr Chillès et au centre hospitalier universitaire de Strasbourg avec un échantillon de 434 dispositifs consécutifs posés par cinq praticiens différents, avec au minimum une année de recul, montrant un taux de succès de 96,8% (52). Trois raisons, entre autres, permettent d'expliquer la bonne fiabilité des micro-vis :

- Anatomique : l'os est toujours bien corticalisé, ce qui diminue la nécessité d'un ancrage dans l'os spongieux (182) ;
- Mécanique : le bras de levier est quasiment inexistant, il n'y a pas de mouvement tendant à faire basculer la vis ;
- Biologique : la distance importante entre la vis et l'émergence du fil dans la cavité buccale garantit une absence de contamination bactérienne et limite l'inflammation, facteur clé de la stabilité des ancrages osseux (6, 33, 109, 151).

1.2.3.2 Système Abalakov

Le **système Abalakov** est un dispositif d'ancrage osseux conçu par Filippi et Cresseaux (46). Il est inspiré d'une technique d'alpinisme développée par Vitali Abalakov, célèbre alpiniste soviétique, qui consiste à relier 2 trous dans la glace par une cordelette, formant alors un amarrage irréprochable dans la glace (**Figure 18** ; **Figure 17**).



Figure 18 : Vitali Abalakov (1906-1986) (46).



Figure 17 : Situation finale de l'ancrage glacier, vue de face (46).

Appliquée à l'orthodontie par transversalité entre deux domaines d'apparence opposés, l'idée est de faire passer un fil d'ostéosynthèse en acier dans la branche montante mandibulaire en regard de la moitié de la hauteur coronaire molaire (**Figure 19**). Ce fil, de généralement 3/10^{ème} de mm de diamètre, est ensuite toronné et rattaché au moyen orthodontique. La mise en traction par l'orthodontiste peut avoir lieu rapidement après la mise en place du système.

L'idéal est de profiter de l'extraction des 3^{èmes} molaires pour mettre en place cet ancrage postérieur mandibulaire stable. Ce dernier pourra ensuite permettre une distalisation d'arcade.

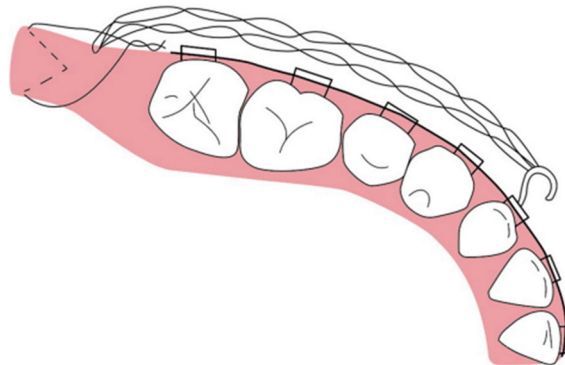


Figure 19 : Illustration d'un dispositif Abalakov (46).

Ses principaux avantages sont :

- Son faible coût, puisqu'il ne nécessite qu'un fil d'acier chirurgical ;
- Sa facilité à placer par le chirurgien, et à déposer sans nouvelle intervention ;
- Son confort pour le patient.

Toutefois, la littérature restant pauvre à ce sujet, certaines questions restent à élucider afin de parfaire le dispositif :

- La fiabilité du système : elle devra être démontrée par un plus grand nombre de cas cliniques, puisque des pertes ont été rapportées, le fil faisant effet de « fil à couper le beurre » sur la branche montante. Le diamètre du fil utilisé semble avoir une influence sur ce type d'événement indésirable : il est conseillé de soit doubler le fil, soit d'augmenter la taille jusqu'à 6/10^{ème} de mm ;
- La position verticale de l'Abalakov : s'il est placé trop haut, cela peut engendrer une rotation du plan d'occlusion dans le sens anti-horaire (**Figure 20**).

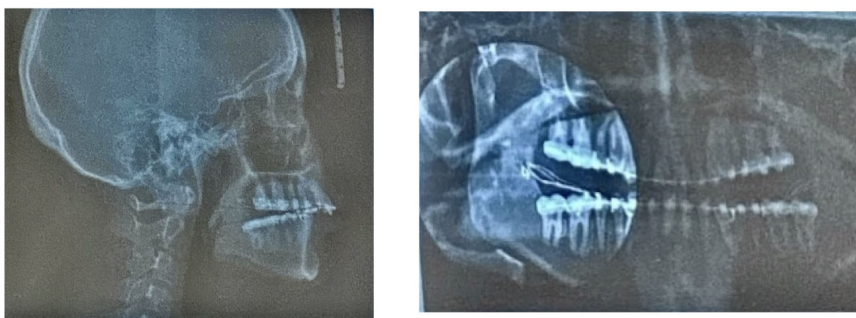


Figure 20 : Rotation anti-horaire du plan d'occlusion due à une position trop haute du dispositif Abalakov (Courtoisie du Dr Barthelemi).

2 LES ALIGNEURS

Selon le dictionnaire de la SFODF (190), un aligneur est un néologisme désignant un dispositif amovible destiné à assurer une étape de traitement orthodontique : l'alignement des dents. Cette gouttière transparente en polymère, le plus souvent thermoformée, permet le déplacement dentaire par l'application de mouvements de faible amplitude.

2.1 Historique

Les aligneurs, qui semblent à première vue être une innovation récente, sont en réalité le fruit de découvertes bien plus anciennes. L'orthodontie par aligneurs débute dès 1945, par une idée de Kesling (103) : « Des mouvements dentaires majeurs pourraient être accomplis avec une série de positionneurs, en changeant légèrement la position des dents au fur et à mesure que le traitement progresse ».

En 1993, l'orthodontiste américain Sheridan (187) développe son propre système d'alignement, Essix, qui contribue à démocratiser cette technologie en Amérique du Nord. Il réalise toute une série de moulages en plâtre dont chacune des dents est segmentée selon le type de mouvement qu'il souhaite réaliser, puis fabrique des gouttières transparentes utilisant du polypropylène, feuille de copolyester thermoplastique.

Cependant, malgré l'ingéniosité de ces innovations, fabriquer ces appareils en prenant des empreintes, en coulant des moulages, en sectionnant individuellement les dents, en les réarrangeant pour les aligner correctement afin d'obtenir un moulage final et en répétant ce processus à chaque rendez-vous clinique était un processus extrêmement laborieux et chronophage. C'est quelques années plus tard, en 1997 que deux étudiants de Stanford, Zia Chishti et Kelsey Wirth, créent ce qui deviendra Invisalign® (13). Chishti est un patient en fin de traitement d'orthodontie lorsque son dispositif de contention lui donna une idée : et si une telle approche pouvait-être informatisée et utilisée pour réaliser des déplacements dentaires ?

Ce fut la création d'Align Technology (Santa Clara, CA), qui proposa une alternative commerciale aux traitements conventionnels par attaches vestibulaires métalliques collées : des séries d'aligneurs amovibles thermoplastiques, en polyuréthane, conçues virtuellement à partir d'un set up individualisé. En plus de répondre à une demande esthétique croissante des traitements orthodontiques, cette solution est décrite comme plus hygiénique et confortable. D'un point de vue technique, ce système qui ne permettait initialement que des fermetures d'espaces ou des résolutions de petits encombrements (19), a connu une évolution grâce à l'introduction d'auxiliaires et l'amélioration des matériaux de fabrication (161).

Depuis, les sociétés commercialisant des aligneurs se sont multipliées et les technologies numériques de conception, simulation et fabrication ne cessent de progresser.

2.2 Matériaux des aligneurs

Le type de matériau utilisé pour leur fabrication est un élément essentiel qui conditionne leur rendu esthétique, leurs propriétés biomécaniques ainsi que leur biocompatibilité. Finalement, cette composition influence directement la performance clinique des aligneurs (133,216).

2.2.1 Méthodes de fabrication des aligneurs

Tout d'abord, la composition est influencée par le processus de fabrication de l'aligneur qui peut être divisé en deux catégories :

- La méthode conventionnelle de thermoformage sous vide avec moulage de matériaux thermoplastiques sur des modèles physiques ;
- L'impression directe en 3D sans modèle physique intermédiaire (104, 138).

2.2.1.1 Méthode commerciale actuelle

Actuellement, la fabrication par thermoformage est largement adoptée à la fois commercialement et cliniquement, y compris pour la production interne d'aligneurs (21).

L'évolution de cette méthode est en grande partie liée à Invisalign®, qui a développé ce qui reste l'unique méthode de fabrication commerciale actuelle, utilisant la technologie CAD/CAM et le protocole de flux de travail numérique (**Figure 21**) :

L'acquisition digitale des images est obtenue par approche directe, par l'intermédiaire d'une caméra intra-orale, ou indirecte après un scan d'un moulage obtenu par empreinte physique. Ces images fournissent une représentation numérique de la dentition du patient qui constitue le cadre de base pour la planification virtuelle des mouvements dentaires souhaités (85).

La planification virtuelle du traitement et les manipulations des mouvements dentaires sont ensuite effectuées à l'aide de plateformes de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Des algorithmes informatiques segmentent les couronnes cliniques individuelles du modèle 3D numérisé. Une visualisation supplémentaire des racines des dents est désormais possible grâce à l'importation et à la superposition de données de tomographie informatisée (CT). La position des dents est manipulée par des mouvements séquentiels vers les positions finalement souhaitées, ce qui permet de générer des modèles virtuels intermédiaires avec des dents dans les positions prévues pour chaque étape (85). Réalisées par des ingénieurs, ces planifications sont directement visualisables et modifiables par l'orthodontiste, ce qui lui offre une visibilité améliorée sur le plan de traitement choisi.

Au niveau de la fabrication, l'impression en 3D de chacun de ces modèles virtuels génère des modèles physiques en série par le biais de la technologie FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur), par des techniques de fabrication soustractive (fraisage) ou additive (impression en 3D). L'impression tridimensionnelle est actuellement la principale technologie utilisée pour la fabrication de modèles orthodontiques. Enfin, un procédé de thermoformage sur les modèles physiques produits permet de générer la série d'aligneurs transparents.

Toutefois, le processus d'impression 3D de modèles numériques en série puis de thermoformage prend du temps, nécessite beaucoup de main-d'œuvre et est coûteux en fonction du type de malocclusion, du protocole de changement de gouttières et du nombre de finitions. Par ailleurs, des inquiétudes ont été exprimées quant à l'impact du plastique sur l'environnement, ce qui justifie des recherches sur l'impact environnemental de la production de gouttières transparentes (85).

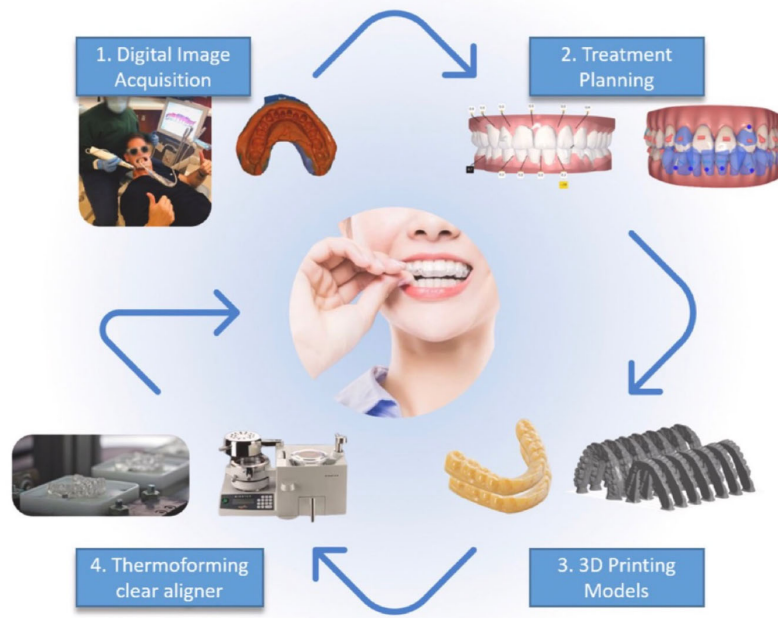


Figure 21 : Flux de travail de fabrication d'aligneurs transparents par la procédure du thermoformage (21).

2.2.1.2 Impression directe en 3D des aligneurs

Avec les progrès technologiques, le prochain changement de paradigme impliquerait probablement l'impression directe en 3D de gouttières à partir de dessins numériques (55). Nasef a été crédité de la première tentative novatrice d'impression directe en 3D de gouttières de contention (157).

Toutefois, à l'exception du Tera Harz TC-85 (Graphy®, Séoul, Corée du Sud), qui a été approuvé par la Commission européenne (CE) et la Food and Drug Administration (FDA) (121), il n'y a pas d'autre matériau imprimable en 3D actuellement disponible dans le commerce qui réponde aux normes de biocompatibilité, de translucidité et dispose des propriétés mécaniques appropriées (56, 96).

La recherche dans ce domaine sera un enjeu important à l'avenir car les avantages de l'utilisation d'aligneurs transparents imprimés en 3D sont nombreux :

- Ils permettent la **réduction des erreurs cumulées** introduites par l'empreinte analogique, le scanner intraoral, le modèle physique imprimé en 3D et le processus thermoplastique qui s'ensuit (96). Il en résulte donc une augmentation de la précision d'impression ;
- L'impression 3D peut raccourcir les chaînes d'approvisionnement, **réduire les coûts** et conduire à un processus plus durable en générant **moins de déchets** (165) ;

- En théorie, l'impression directe en 3D permet de fabriquer des gouttières transparentes avec une **épaisseur personnalisée** et un contrôle spatial de l'épaisseur de la gouttière sur l'ensemble de l'arcade. L'épaisseur de la gouttière et le matériau choisi influencent non seulement l'ampleur de la force exercée sur les dents, mais aussi les propriétés mécaniques des gouttières (56).

Le processus de fabrication par étapes des gouttières transparentes imprimées directement en 3D est présenté ci-dessous (**Figure 22**).

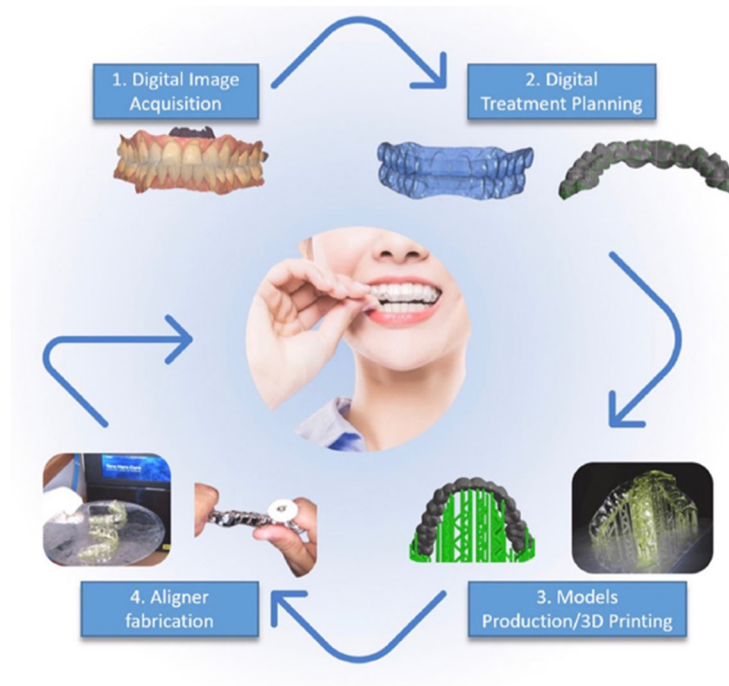


Figure 22 : Procédure de fabrication des aligneurs par impression 3D directe (21).

2.2.2 Différents types de matériaux utilisés

2.2.2.1 Polymères thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques peuvent être classés en polymères amorphes ou semi-cristallins en fonction de leur structure moléculaire inhérente.

Les **polymères amorphes** présentent des structures moléculaires irrégulières caractérisées par un faible degré d'empaquetage moléculaire. Les **polymères semi-cristallins**, quant à eux, comprennent à la fois des zones de chaînes uniformément et étroitement empaquetées (domaines cristallins) et des zones irrégulièrement arrangées (régions amorphes). Le rôle des domaines cristallins dans les polymères thermoplastiques peut être comparé à celui des charges dans les matériaux composites, qui confèrent dureté et rigidité au matériau thermoplastique. En général, les polymères amorphes sont plus souples, transparents, présentent un faible retrait et possèdent une meilleure résistance aux chocs. À l'inverse, les polymères semi-cristallins sont durs, opaques translucides, possèdent une bonne résistance chimique et présentent un point de fusion élevé (138).

Les polymères (individuels ou mélangés) les plus couramment utilisés pour la fabrication de gouttières orales en plastique transparent sont le **polyester**, le **polyuréthane**, le **polypropylène**, le **polycarbonate**, l'**éthylène-acétate de vinyle** et le **chlorure de polyvinyle**, entre autres (86).

Parmi les **polyesters**, le **polyéthylène téréphtalate** (PET) et le **polyéthylène téréphtalate glycol** (PETG) - un copolymère amorphe non cristallisant du PET - sont largement utilisés dans la production de gouttières transparentes, principalement en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques et optiques. Le polyéthylène téréphtalate (PET) existe à la fois sous forme amorphe et cristalline, et son type de forme (rubans, films, fibres) influence les propriétés du matériau (53). La structure amorphe du PET est transparente et présente une ductilité supérieure, tandis que la structure cristalline est opaque et blanche et présente une dureté, une rigidité et une bonne résistance. Le PET peut être rigide ou semi-rigide en fonction des méthodes de traitement employées et présente d'excellentes propriétés mécaniques, une grande ténacité et une résistance à divers solvants (62).

Le **PETG** est un copolyester non cristallin, une forme modifiée de PET qui transforme le PET d'un état semi-cristallin à un état amorphe, ce qui permet au matériau d'être plus transparent et plus esthétique. La transparence, les propriétés mécaniques et optiques améliorées font du PETG un matériau approprié pour la fabrication d'aligneurs transparents (87).

Le **polyuréthane thermoplastique** (TPU), est principalement un autre polymère extrêmement polyvalent qui présente de nombreuses propriétés favorables telles que d'excellentes caractéristiques mécaniques et élastomériques, une résistance chimique et à l'abrasion, des propriétés d'adhésion ainsi qu'une grande facilité d'usinage (61,216). Lorsqu'il est soumis à une charge, le TPU change de forme mais peut retrouver sa forme initiale lorsque la charge est retirée et il est capable de s'allonger et de se rétablir grâce à la flexibilité du matériau. Le matériau présente également une résistance élevée à la déchirure et une large gamme de résilience (115).

Les matériaux des aligneurs transparents ont connu de nombreuses évolutions, passant du plastique monocouche ou monophasé aux matériaux en polyuréthane de deuxième génération, puis aux matériaux multicouches de troisième génération actuellement utilisés, qui comprennent souvent des couches dures et souples. Alors que la couche souple confère la propriété de déformation élastique permettant une mise en place en douceur de l'aligneur, la couche dure assure la solidité et la durabilité (108).

En 2013, les aligneurs Invisalign® sont passés d'une couche unique de polyuréthane, Exceed-30 (EX30), à un nouveau polymère, SmartTrack™ (LD30) - un polyuréthane/copolyester thermoplastique multicouches (175). Selon Aligntech®, le nouveau matériau devrait conférer aux gouttières une plus grande élasticité et produire des forces plus constantes, améliorant ainsi leur efficacité clinique. Cependant, en termes de résultats cliniques, il n'y avait pas de différences significatives entre les deux types d'aligneurs (76).

2.2.2.2 Mélange de polymères

Les gouttières orthodontiques transparentes thermoplastiques doivent idéalement exercer des forces continues et contrôlées pour produire les mouvements dentaires souhaités (216). Les propriétés mécaniques des polymères peuvent être **améliorées en mélangeant différents types de polymères** tels que le **polyester**, le **polyuréthane** et le **polypropylène**. Les mélanges de ces trois polymères sont couramment utilisés dans la fabrication commerciale des gouttières transparentes (216). De nombreuses études sur les mélanges de polymères thermoplastiques ont montré que les mélanges de polymères présentent des propriétés mécaniques et chimiques améliorées, ce qui permet de bonifier les performances cliniques des gouttières transparentes (184).

Le rapport utilisé pour mélanger les polymères influence considérablement les caractéristiques du mélange. Par exemple, **le mélange PETG/polycarbonate (PC)/TPU** dans un rapport de 70/10/20 a permis d'obtenir de meilleures propriétés mécaniques par rapport aux autres rapports, et il a été démontré que les forces orthodontiques étaient suffisantes et durables par rapport à d'autres produits commercialisés (216).

2.2.2.3 Polymères imprimés en 3D

Les avantages potentiels des aligneurs imprimés en 3D ont été examinés précédemment et leurs apports apparaissent indéniables. Mais cette méthode, très prometteuse, **nécessite ces matériaux spécifiques**. Les principaux matériaux pouvant être utilisés pour l'impression 3D en orthodontie comprennent le plastique acrylonitrile-butadiène-styrène, les matériaux de stéréolithographie (résines époxy), l'acide polylactique, le polyamide (nylon), le polyamide chargé de verre, l'argent, l'acier, le titane, les photopolymères, la cire et les polycarbonates (171). Diverses études ont examiné les propriétés mécaniques et biologiques des résines adaptées à l'impression 3D de gouttières transparentes (142,155). **Tera Harz TC-85** est une résine photopolymérisable, biocompatible, qui a permis la production des premiers aligneurs directement imprimés en 3D (220).

2.2.3 Propriétés des matériaux

Comme vu précédemment, les matériaux thermoplastiques utilisés sont principalement des polymères qui présentent des caractéristiques différentes et répondent donc de manière variable aux multiples types de contraintes associées à la cavité buccale :

- Les contraintes mécaniques associées aux mouvements fonctionnels et parafonctionnels ;
- Les contraintes thermiques générées au processus de thermoformage de la gouttière et à l'exposition aux changements de température buccale ;
- Les contraintes chimiques créées par l'exposition à la salive ainsi qu'à la consommation de diverses boissons.

Le cahier des charges du matériau d'aligneur idéal serait des grandes qualités mécaniques (résilience élevée, faible dureté, élasticité suffisante, résistance adéquate aux différentes contraintes et distorsions), optiques (excellente transparence), chimiques, ainsi qu'une faible cytotoxicité et une biocompatibilité élevée (219).

2.2.3.1 Mécanique

2.2.3.1.1 Principales propriétés mécaniques

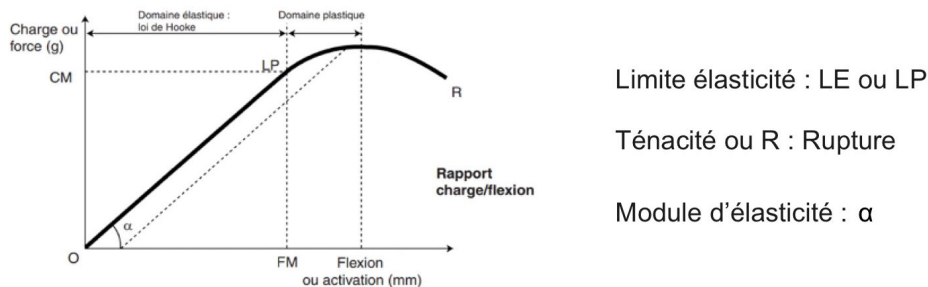


Figure 23 : Courbe charge/flexion. CM : charge maximale ; FM : force maximale (Courtoisie du Dr Vieillard).

La courbe charge/flexion permet de définir les principales propriétés mécaniques des matériaux thermoplastiques (**Figure 23**) :

- Généralement, les matériaux thermoplastiques suivent **la loi de Hooke** lorsqu'ils sont soumis à des forces de courte durée, ce qui indique qu'à l'intérieur de la limite d'élasticité de la courbe contrainte-déformation, lorsque la contrainte est proportionnelle à la déformation, le matériau présente un comportement élastique avec un retour à sa taille et à sa forme d'origine lors de la suppression de la contrainte appliquée (110) ;
- **La limite d'élasticité** (LE ou LP) d'un matériau peut être décrite comme la contrainte au-delà de laquelle la déformation n'est plus proportionnelle à la contrainte et le matériau n'est plus élastique et se comporte comme une matière plastique. Ensuite, **la ténacité (R)** du matériau est définie comme l'énergie absorbée par le matériau avant qu'il ne se rompe, qui peut être calculée par l'aire sous la courbe contrainte-déformation ;
- **Le module d'élasticité** ou module de Young (α) est une mesure de la rigidité d'un matériau et peut être défini comme le rapport entre la contrainte et la déformation correspondante ;
- Un matériau qui peut être facilement déformé avec une force minimale peut être décrit comme ayant une faible **résilience**, c'est-à-dire la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie lorsqu'il est "chargé" ou déformé élastiquement, et à libérer cette énergie lorsqu'il est "déchargé", sans provoquer de déformation permanente du matériau. La mesure de la résilience est le point au-delà duquel le matériau subit une certaine déformation permanente. La décharge peut être décrite comme la mesure de la force exercée par un matériau pour déplacer les dents (110).

2.2.3.1.2 Caractéristiques du matériau d'aligneur

Pour la fabrication des aligneurs transparents, les matériaux thermoplastiques idéaux présenteraient les caractéristiques suivantes :

- Une limite d'élasticité élevée ainsi qu'une grande ténacité, afin d'appliquer des forces importantes sans déformation permanente du matériau ni de rupture ;
- Un module d'élasticité permettant une rigidité suffisante pour exercer les forces et les moments nécessaires à la réalisation du mouvement dentaire prévu. Toutefois, si le matériau utilisé pour la fabrication de la gouttière présente un module d'élasticité très élevé (ou une rigidité élevée), la gouttière résultante sera très rigide, ce qui entraînera des difficultés de mise en place et de retrait de l'appareil pour le patient. À l'inverse, un matériau peu rigide ne sera pas en mesure de générer les forces adéquates nécessaires au déplacement dentaire. Les aligneurs actuels disposent d'un module d'élasticité faible, 40 à 50 fois inférieur à celui d'un arc Niti (**Figure 24**). Cela indique qu'ils se déformeront facilement par un faible niveau de contrainte, mais tout en restituant des forces relativement faibles, parfois même insuffisantes.

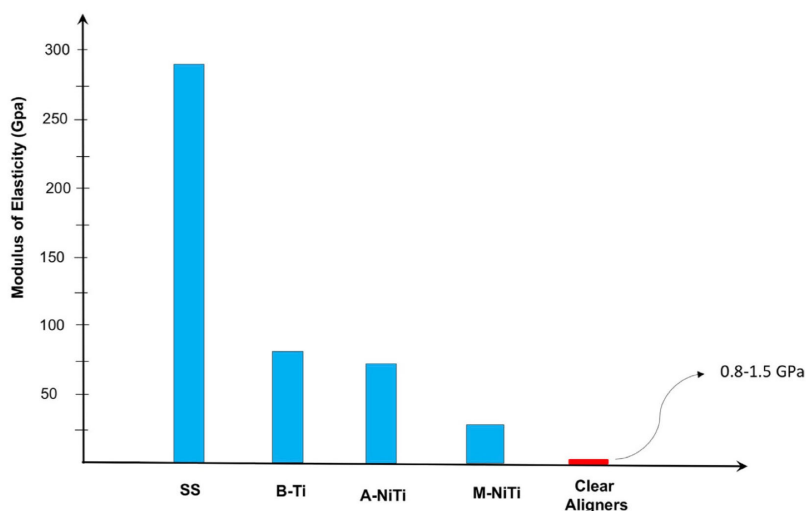


Figure 24 : Module d'élasticité des différents matériaux utilisés pour les arcs orthodontiques en comparaison à ceux des aligneurs. SS = Stainless Steel. B-Ti = Beta Titanium. M-NiTi= Martensitic Nickel Titane. A-NiTi= Austenitic Nickel Titane. Gpa =Gigapascal (206).

- Une résilience élevée, or les aligneurs absorbent peu d'énergie car ils se déforment de façon permanente sous des charges modérées à lourdes (1) et présentent une résilience considérablement plus faible que les arcs métalliques (112). Cliniquement, un faible encombrement qui pourrait être résolu par un seul fil d'arc en nickel-titane, nécessitera plusieurs aligneurs pour le corriger. En effet, les arcs métalliques sont capables de stocker de l'énergie (charge) et de transférer (décharge) cette énergie aux dents sur une période donnée tout en subissant une fatigue minimale. Une comparaison relative des courbes contrainte-déformation de différents matériaux orthodontiques est exposée ci-dessous (**Figure 25**) (17).

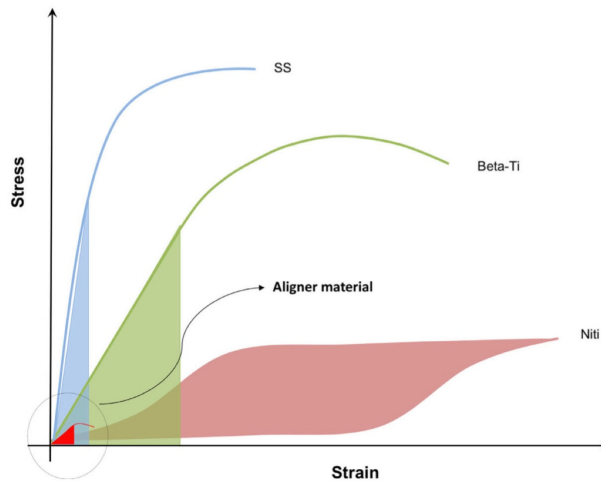


Figure 25 : Faible niveau de résilience des aligneurs en comparaison aux arcs orthodontiques.
 SS = Stainless Steel. Beta-Ti = Beta Titanium. NiTi= Martensitic Nickel Titane (206).

En réalité, lorsque les matériaux thermoplastiques sont soumis à des forces à long terme, ils ne suivent pas la loi de Hooke et présentent plutôt des propriétés "**viscoélastiques**" qui montrent une relation entre la contrainte et la déformation en fonction du temps (69). Les matériaux des aligneurs sont de nature "viscoélastique", leurs propriétés se situant à mi-chemin entre celles des matériaux purement visqueux et celles des matériaux purement élastiques. Le comportement des matériaux viscoélastiques peut varier de manière significative dans le temps lorsqu'ils sont soumis à une charge telle que la mise en place initiale de l'aligneur sur l'arcade, et même avant que le mouvement dentaire prévu n'ait été initié (138).

2.2.3.1.3 Phénomène de relaxation des contraintes

La relaxation des contraintes est probablement **le facteur le plus crucial** pour déterminer l'efficacité des gouttières transparentes. Il s'agit d'une réduction des forces exercées par la gouttière à partir de sa mise en place en fonction du temps. La réduction de la force observée n'est pas linéaire dans le temps, mais plutôt inversement exponentielle, ce qui se traduit par une chute spectaculaire de la force au cours des premières heures d'utilisation des aligneurs, ce qui indique une fatigue du matériau (**Figure 26**) (133). En comparaison, un arc en nickel-titane soumis à des niveaux de contrainte similaires ou supérieurs reste actif pendant des semaines (15).

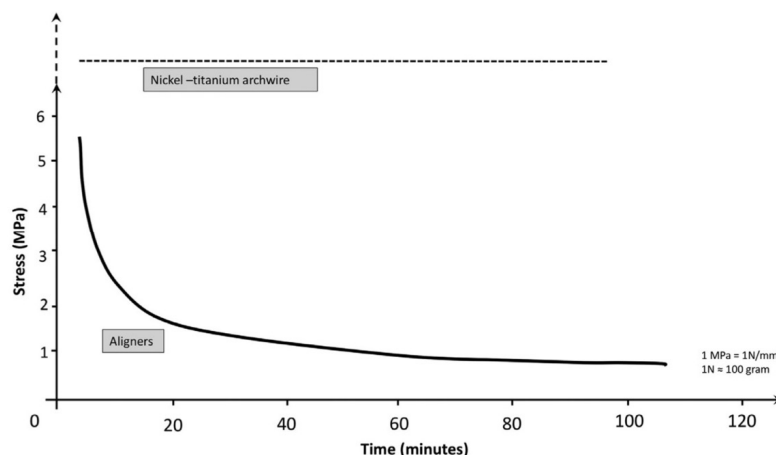


Figure 26 : Phénomène de relaxation des contraintes des aligneurs, en comparaison à un arc NiTi. Plus de 90% de la force est perdue dans les premières heures (206)

Lombardo et ses coauteurs (133) ont examiné la relaxation des contraintes de quatre types différents de matériaux d'aligneurs, deux matériaux monocouches à base de PETG et de polyuréthane et deux matériaux multicouches. Tous les échantillons ont été soumis à une charge constante pendant 24 heures dans un environnement humide et à une température constante après un test de résistance initial. Les résultats de l'étude démontrent que bien que les quatre matériaux aient montré une relaxation significative à la contrainte rapide dans les 8 premières heures, les matériaux multicouches ont généralement connu des taux de relaxation de la contrainte et des valeurs de contrainte initiale plus faibles que les matériaux monocouches.

Il semble que le type de polymère thermoplastique utilisé pour la fabrication des aligneurs n'est pas le seul facteur responsable de ce phénomène. Ce processus de relaxation des contraintes est également affecté par la température de la cavité buccale, l'ampleur de la force à laquelle une partie spécifique de l'aligneur est soumise ainsi que l'épaisseur du matériau utilisé (130).

En résumé, les aligneurs présentent les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Ils appliquent de faibles forces ;
- Ils sont plus performants avec des activations moindres ;
- Ils présentent une faible flexibilité ;
- Ils subissent une dégradation rapide de la force.

2.2.3.2 Thermique

La capacité du matériau d'alignement à **s'adapter ou à se conformer aux modèles pendant le processus de thermoformage** est une exigence importante. À une température définie d'environ 110°C, de nombreuses études ont montré que la **transparence**, la **dureté** et l'**épaisseur** du matériau de l'aligneur présentaient des changements après avoir été soumis au processus de thermoformage pendant la fabrication de l'aligneur transparent (20,179).

- Ryu et al. (179) ont étudié l'épaisseur et la transparence des matériaux d'aligneurs avant et après le processus de thermoformage et ont démontré des changements dans quatre types différents de matériaux d'aligneurs transparents (dont deux à base de copolyester : Essix A+ et Essix ACE, et les deux autres, à base de PETG : Duran et ECligner). Les résultats de l'étude ont révélé que le thermoformage réduisait la transparence des matériaux thermoplastiques.
- Une autre étude, réalisée par Bucci et ses coauteurs (20) en 2019, ayant porté sur deux types d'aligneurs, un matériau PETG passif et un autre actif d'une épaisseur de 0,75mm, a montré que le processus de thermoformage modifiait l'épaisseur des aligneurs transparents. Cependant, les auteurs mentionnent que la variation de l'épaisseur ne semble pas affecter négativement la performance clinique des aligneurs.
- Une étude in vitro réalisée par Dalaie et ses coauteurs (48) a examiné les modifications des propriétés thermomécaniques de deux thermoplastiques en PETG de deux épaisseurs différentes, 1 et 0,8mm, après le processus de thermoformage. Elle a conclu que la dureté du matériau diminue d'environ 7,6% après le thermoformage, pour les deux types de matériau.

Les polymères thermoplastiques doivent également être capable de **résister aux variations des températures** pouvant être rencontrées **dans la cavité orale**. Ils présentent une température à partir de laquelle leur état rigide se transforme en un état caoutchouteux. La température de la cavité buccale peut atteindre 57°C après la consommation d'une boisson chaude et il peut s'écouler plusieurs minutes avant qu'elle ne revienne à sa température initiale. Il a également été démontré que ces changements de température affectent les propriétés mécaniques des matériaux thermoplastiques, comme le montrent de multiples études in vivo et in vitro (20,91).

L'étude in vivo menée par Bucci et al. en 2019 (20) a également pris en compte les variations de température dans la cavité buccale ainsi que les fonctions buccales normales et les habitudes parafonctionnelles auxquelles les aligneurs transparents sont soumis. Une série d'aligneurs passifs et actifs formés à partir de feuilles de PETG a été utilisée dans cette étude. Les patients devaient porter ces gouttières 22 heures par jour pendant 10 jours et l'étude a évalué les changements d'épaisseur de la gouttière au fil du temps. Les auteurs ont constaté de légères réductions de l'épaisseur des gouttières après 10 jours, mais ont déclaré que ces réductions n'étaient pas suffisamment importantes pour affecter les performances cliniques des gouttières transparentes et ont estimé que le PETG présentait une stabilité adéquate dans l'environnement buccal.

2.2.3.3 Optique

Les matériaux d'alignement doivent présenter une bonne transmission de la lumière. Ils doivent idéalement **pouvoir transmettre au moins 80 % de la lumière visible** pour une clarté optimale. Les polymères thermoplastiques amorphes présentent une grande translucidité et sont donc préférés aux polymères cristallins qui sont très opaques et inesthétiques.

De nombreuses études ont examiné la stabilité de la couleur et la transparence des aligneurs lorsqu'ils sont exposés à des agents colorants et à la salive (48, 127) en évaluant divers matériaux d'aligneurs transparents tels que le polyuréthane thermoplastique multicouche avec élastomère intégré (SmartTrack™), le matériau PETG (Erkodur), le matériau copolyester (Essix ACE) et deux matériaux à base de PET (Essix Plastic et Ghost aligner).

Les valeurs de changement de couleur des gouttières Invisalign® à base de polyuréthane se sont avérées beaucoup plus élevées que celles des gouttières à base de polycarboxylate et de PETG. Diverses études ont conclu que le polyuréthane est plus sensible à l'absorption des pigments et n'offre pas une stabilité de couleur adéquate (199,215).

2.2.3.4 Chimique

En plus des variations de température dans la cavité buccale, les aligneurs transparents sont constamment exposés à la salive et à ses différents enzymes, et sporadiquement à des boissons autres que l'eau, ce qui peut avoir un effet négatif sur la composition chimique des polymères thermoplastiques qui les composent, modifiant ainsi la forme de l'aligneur et/ou ses propriétés mécaniques au fil du temps. Certains polyesters tels que les polycarbonates et les polyamides peuvent présenter une hydrolyse irréversible qui peut conduire à la dégradation de leur structure polymérique, c'est pourquoi il est souhaitable que les polymères utilisés pour la fabrication de **l'aligneur soient résistants à l'hydrolyse et à la dégradation par l'eau** (69).

Un aligneur est également soumis à des forces continues et intermittentes associées aux fonctions orales normales telles que la mastication, l'élocution, la déglutition et les activités parafunctionnelles telles que le serrement et le grincement des dents. Le matériau d'un **aligneur doit être durable** lorsqu'il est exposé à l'environnement buccal et posséder une grande résistance à l'usure pour supporter les contraintes masticatoires et associées afin d'éviter toute déformation susceptible de compromettre ses performances cliniques (69).

Des microfissures, des zones délaminées, des dépôts de biofilm calcifié et une perte de transparence de l'aligneur ont tous été signalés dans des aligneurs Invisalign® utilisés pendant 2 semaines (183). Une modification de l'ajustement de l'aligneur et une modification des forces orthodontiques résultantes exercées par l'aligneur peuvent se produire en raison de l'expansion hygroscopique intrabuccale. Il a été démontré que l'absorption d'eau des matériaux thermoplastiques augmente avec le temps, le matériau de l'aligneur Invisalign® présentant les valeurs d'absorption les plus élevées, suivi du PETG (178). Toutefois l'étude de Bucci et al. (20) avait déclaré que ces modifications n'étaient pas suffisamment importantes pour affecter les performances cliniques des gouttières transparentes et ont estimé que le PETG présentait une stabilité adéquate dans l'environnement buccal.

2.2.3.5 *Biocompatibilité*

En tant que matériau d'appareil intra-oral, les polymères thermoplastiques sont censés ne pas libérer de toxines potentielles susceptibles de produire des réactions locales ou systémiques indésirables, ne pas être cancérogènes par nature et ne pas provoquer de défauts de développement (91).

Allareddy et ses coauteurs ont résumé les événements cliniques indésirables rapportés lors de l'utilisation des gouttières Invisalign® selon une analyse rétrospective de la FDA (Food and Drug Administration). Les effets indésirables les plus fréquemment signalés associés aux gouttières, au cours d'une période d'observation de dix ans, comprenaient des difficultés respiratoires, des maux de gorge, un gonflement de la gorge ou de la langue, de l'urticaire, des démangeaisons et une anaphylaxie (4).

2.3 Notions biomécaniques

2.3.1 Principes de la mécanique orthodontique

En plus des notions d'ancrage et de centre de résistance, déjà abordées dans la partie 1, les grands principes de la mécanique orthodontique ne manquent pas de s'appliquer aux aligneurs (47).

2.3.1.1 La force

La force est une puissance physique qui, appliquée à un corps, permet son déplacement.

Elle est définie par cinq éléments fondamentaux : son intensité, sa ligne d'action, son sens, le point d'application, ainsi que la durée et la manière dont elle est appliquée dans le temps (continuellement ou de manière discontinue/intermittente).

Elle est représentée par un vecteur.

2.3.1.1 Centre de rotation

Nous avons vu que lorsqu'une force passe par le centre de résistance d'un objet, elle produit un mouvement de translation pure. Pour toute autre ligne d'action de la force, la translation produite sera associée à une rotation : la dent pivote autour d'un « centre de rotation » qui dépend uniquement du système de forces utilisé.

La position du centre de rotation détermine le type de mouvement obtenu :

- Centre de rotation situé à l'infini ;
⇒ Déplacement en translation pure (la force passe par le centre de résistance du système)
- Centre de rotation confondu avec le centre de résistance ;
⇒ Déplacement en rotation pure (tous les points pivotent autour du centre de résistance)
- Centre de rotation situé entre ces deux positions extrêmes ;
⇒ Déplacement en roto-translation (version + gression)

Le centre de rotation dépend du système de forces appliqué à un corps.

2.3.1.1 Le moment de la force

Le moment (M) d'une force exercée sur une dent est calculé en multipliant la force (F) par la distance entre le point d'application de la force et le centre de résistance :

$$\mathbf{M = F \times D}$$

Une dent peut subir l'influence d'une ou plusieurs forces, et ces forces multiples se combinent pour agir conjointement en tant que force unique, connue sous le nom de résultante des forces.

Lorsqu'une force (ou résultante) est appliquée à une dent, deux scénarios se présentent :

- Si la ligne d'action de la force passe par le centre de résistance, le moment est nul. En conséquence, la dent se déplace dans une direction unique, suivant la force appliquée (mouvement de translation, d'ingression ou d'égression) ;
- Si la ligne d'action de la force ne traverse pas le centre de résistance, le moment diffère de zéro. Le mouvement n'est plus restreint à une seule direction, mais devient un mouvement combiné. La dent se met alors à tourner sur elle-même en plus de son déplacement global par rapport à un point distant pris comme référence. Ce mouvement rotatif est généré par le moment.

2.3.1.2 Le couple de forces

À l'origine du concept de couple se trouve l'inévitabilité d'une paire de forces :

- De lignes d'action parallèles ;
- D'intensité égale ;
- De sens opposés ;
- En des points d'application distincts.

Quel que soit l'endroit du corps où un couple est appliqué, il provoque une rotation du corps autour de son centre de résistance : le centre de rotation est donc confondu avec le centre de résistance. On obtient un mouvement de rotation pure, sans translation.

L'intensité du moment de ce couple est égale à la somme des intensités des moments engendrés par les deux forces. Si les deux moments ont le même sens, on les ajoute, sinon on les retranche et le sens de rotation du couple est donné par la force qui passe le plus loin du centre de résistance.

2.3.2 Biomécanique des aligneurs

2.3.2.1 Principes de base du déplacement dentaire par aligneurs

Le traitement orthodontique à base d'aligneurs implique un mouvement progressif des dents, par l'utilisation de plusieurs aligneurs successifs, chacun d'entre eux repositionnant progressivement les dents par petites quantités (208). Ce mouvement progressif est provoqué par deux mécanismes principaux :

- L'effet de **moulage de la forme**

Cette méthode a été le premier moyen de traitement utilisé par les aligneurs transparents dans les années 1940. La méthode consiste à "mouler" le mouvement des dents cibles en fonction de la forme de l'aligneur utilisé. Les décalages (ou activations) préétablis entre la forme de l'aligneur et la géométrie de la couronne dentaire génèrent des systèmes de force distribués sur toutes les surfaces de contact (12). Il existe des zones de contact et de relief entre la gouttière et la surface de la dent. Un traitement complet consiste en une succession de gouttières dont les formes varient séquentiellement, de la géométrie anatomique initiale aux positions finales des dents (200).

- Utilisation d'éléments auxiliaires

Les éléments auxiliaires, tels que les taquets ou les lames de pression, sont des exemples de moyens utilisés pour améliorer la prédictibilité des mouvements dentaires (209). La disposition stratégique de ces éléments auxiliaires dans les gouttières ou sur les dents peut améliorer la transmission des forces (188). Ils sont utilisés stratégiquement pour délivrer des forces à des endroits spécifiques de la surface de la dent.

2.3.2.2 Quelle approche faut-il utiliser ?

Au niveau fondamental, le mouvement de la dent est une interaction entre le stress créé par l'appareillage orthodontique et le complexe biologique composé du parodonte et de l'os environnant. Pour initier le mouvement dentaire, un aligneur doit maintenir des niveaux de pression acceptables (notion de force optimale) tout au long du traitement. Cette force est créée et transmise au complexe parodontal environnant, par le biais de l'effet de moulage/modelage de la forme (208) ou d'éléments auxiliaires (141).

Théoriquement, la contrainte (force/surface) exercée par l'effet de modelage sera nettement inférieure à la contrainte créée par un taquet pour le même système de forces (188) (**Figure 27**), car le mouvement de la dent créé par l'effet de modelage entraîne la transmission de la force à une plus grande surface, par rapport à celle d'un attachement, dont la surface est nettement plus petite.

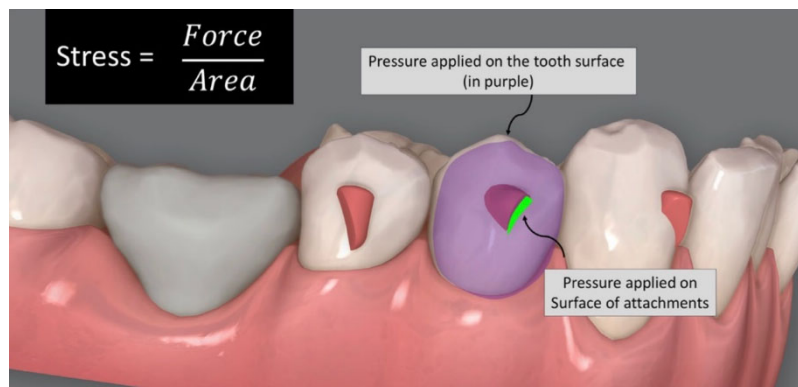


Figure 27 : Calcul de la contrainte exercée selon la surface d'application de la force (Surface de la dent ou taquet) (206).

Par exemple, partons du principe que nous nécessitons une force de 100g pour effectuer un mouvement de version linguale sur cette prémolaire, et que les surfaces violettes et vertes mesurent respectivement 100 mm^2 et 10 mm^2 . La contrainte exercée par aligneurs par l'effet de modelage sera de $100\text{g}/100 \text{ mm}^2 = 1\text{g}/\text{mm}^2$, soit 10 fois moindre que celle engendrée au niveau du taquet ($100/10 \text{ mm}^2 = 10\text{g}/\text{mm}^2$) (206).

Malgré le fait que la force résultante soit moins importante, la plus grande partie du traitement semble être exécutée par l'effet de moulage de la forme (200, 208). En effet, une contrainte appliquée trop forte peut mener à des niveaux de déformation permanente plus importants (potentialisant le phénomène de relaxation des contraintes) et donc diminuer l'efficacité de l'aligneur.

Toutefois, le rôle du placement d'éléments auxiliaires tels que les taquets ne se limite pas à l'application d'une force. Ils permettent la rétention de la gouttière sur les surfaces dentaires : il est par exemple indispensable d'ajouter des taquets sur les dents porteuses de découpes boutons et sur les dents adjacentes pour éviter la désinsertion de la gouttière (**Figure 28**). Nous reviendrons par la suite sur l'utilité des auxiliaires pour le contrôle des différents mouvements.

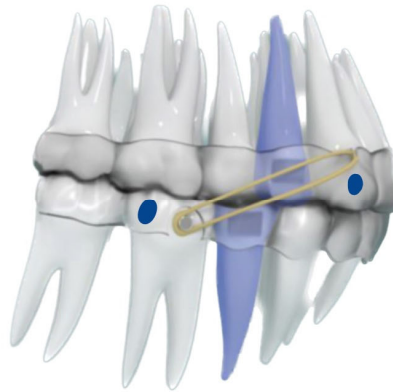


Figure 28 : Les taquets disposent d'un rôle de rétention essentiel, notamment en cas de port d'une mécanique inter-arcades favorisant la désinsertion de la gouttière (Courtoisie du Dr Vieillard).

2.3.2.3 Contrôle des différents mouvements

Le couple de forces, défini précédemment, intervient dans les trois sens de l'espace, définissant les trois « ordres » :

- Premier ordre : sens horizontal ;
→ Concerne principalement les rotations dentaires (rotations de prémolaires par exemple)
- Deuxième ordre : sens mésio-distal ;
→ Permet le redressement des racines après fermeture d'espace, la préparation d'ancrage...
- Troisième ordre : sens vestibulo-lingual.
→ C'est le torque classiquement incorporé dans le fil et/ou dans les attaches et bagues.

2.3.2.3.1 Paramètres influençant la prédictibilité des mouvements

Afin d'augmenter l'efficacité de la réalisation des différents mouvements, le praticien a la possibilité de jouer sur de nombreux paramètres (hors ancrages osseux, qui seront évoqués en partie 3) :

- La présence ou non d'auxiliaires (taquets, lames de pression, boutons pour port d'élastiques) ;
- Le type d'auxiliaires (design des taquets, différents moyens de traction) ;
- Le « staging » ou la quantité de mouvement demandé par aligneur, conditionnant finalement le nombre d'aligneurs total.

2.3.2.3.2 Méthodes des éléments finis (MEF)

Dans la littérature récente, afin de mettre en lumière les configurations les plus efficaces, de nombreuses études utilisent le modèle des éléments finis. Il s'agit d'un modèle mathématique virtuel permettant de tester les interactions entre les dispositifs et la dent (**Figure 29**). Selon plusieurs auteurs, la méthode des éléments finis (MEF) représente une méthode non invasive et précise qui fournit des données quantitatives et détaillées concernant les réponses physiologiques se produisant dans des tissus tels que le ligament parodontal et l'os alvéolaire. La MEF est une technique d'ingénierie utilisée pour calculer les contraintes et les déformations développées sur un solide géométrique soumis à des forces externes et est largement acceptée à des fins médicales (144).

La MEF a été proposée comme solution à des questions biomécaniques complexes et a été appliquée dans plusieurs cas en orthodontie afin d'évaluer le centre de résistance, divers aspects biomécaniques du mouvement des dents, différents appareils fixes, des modalités d'ancrage, les procédures de contention...

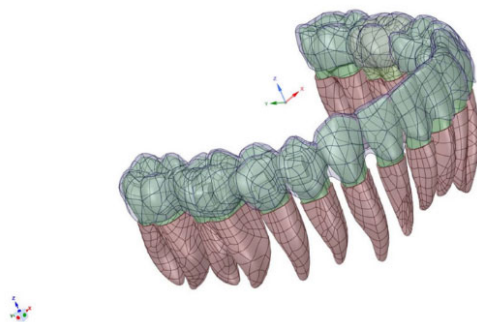


Figure 29 : Modèle virtuel conçu selon la méthode des éléments finis (MEF) (144).

2.3.2.3.3 Contrôle du 1^{er} ordre : les rotations

La principale difficulté du seul aligneur pour le contrôle des rotations réside dans des aspects géométriques : sur une couronne ronde d'une prémolaire, ou de faible surface d'une incisive latérale, la prise de l'aligneur sur la dent est très faible, entraînant **un effet de glissement**.

De plus, la ligne d'action des vecteurs force, résultant des forces tangentielles appliquées lors de la dérotation d'une couronne ronde par effet de modelage, se **rapproche très près du centre de résistance** de la dent, entraînant ainsi un faible moment de rotation (**Figure 30**)

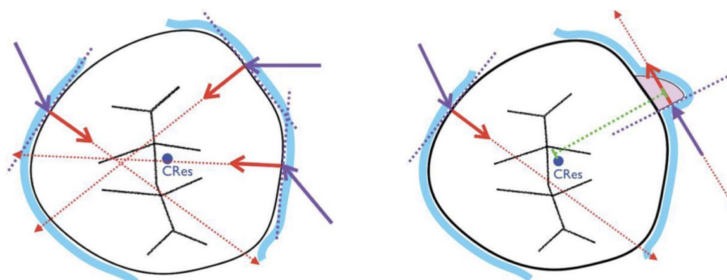


Figure 30 : L'importance du taquet dans le contrôle des rotations : limiter l'effet de glissement et ajouter un vecteur de force à distance du Cres (Courtoisie du Dr Vieillard).

Un effet de glissement conduisant à une inadaptation de l'aligneur sur la dent peut notamment conduire à un effet parasite ingressif (**Figure 31**).



Figure 31 : Effet parasite d'ingression sur 45 due à une inadaptation de l'aligneur (Courtoisie du Dr Godenèche).

Pour accroître l'efficacité du mouvement, l'ajout d'un **taquet** avec une surface active correctement positionnée permet de :

- Prévenir l'effet de glissement en améliorant la rétention ;
- Ajouter un vecteur force passant à distance du centre de résistance de la dent, engendrant ainsi un couple de forces avec un moment de rotation plus important.

Ces affirmations ont été confirmées par des études utilisant la méthode des éléments finis, démontrant que les rotations des dents aux formes arrondies pouvaient être contrôlées par les aligneurs, mais que ces derniers devaient obligatoirement être associés aux taquets (44, 64).

L'étude menée par Cortona et al. (44) a exploré différentes configurations par la méthode des éléments finis, analysant une dérotation de deuxième prémolaire inférieure. Trois variantes de positionnement des taquets ont été analysées : sans taquet, avec taquet rectangulaire uniquement sur 45, et avec taquets rectangulaires sur 44-45-46 (**Figure 32**).

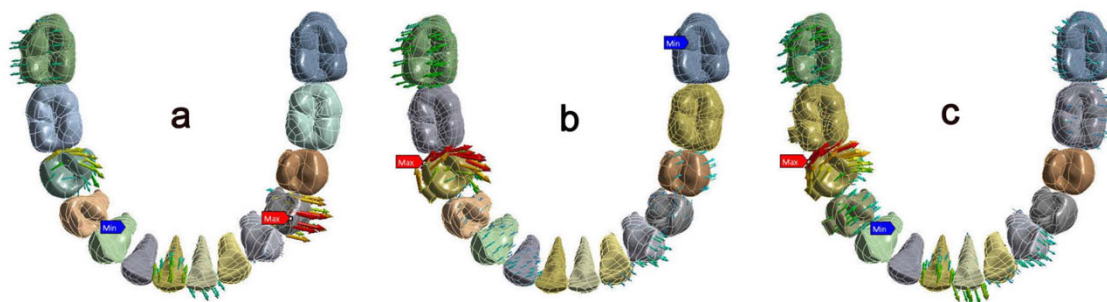


Figure 32 : 3 configurations de déplacements dentaires : pire scénario : (a) sans taquet et 1,2°/aligneur meilleurs scénarios : (b) taquet 45 et 1,2°/aligneur et (c) taquets sur 4-5-6 et 1,2°/aligneur (44).

Pour ces trois combinaisons, chacune a été étudiée en appliquant une rotation de 1,2° ou de 3° par aligneur. Les auteurs en concluent que la configuration avec un unique taquet sur 45, associée à une rotation de 1,2° par aligneur, est celle qui produit la dérotation la plus efficace.

Cette étude démontre à la fois que la présence d'un taquet est fondamentale pour permettre la dérotation, mais également qu'une activation de 1,2° par aligneur correspond au maximum de prescription. En effet, cela permet à la fois de se rapprocher du principe de la "force optimale" de la biologie du mouvement dentaire, tout en limitant les déformations permanentes de l'aligneur qui ont tendance à l'inactiver.

Enfin, certaines situations particulières facilitent la réalisation du mouvement de rotation :

- L'utilisation d'une **mécanique inter-arcades**, avec placement du bouton en vestibulaire ou en palatin de la canine, peut aller dans le sens du mouvement ;
- Ensuite, dans le cas d'une dent isolée sur l'arcade, la gouttière dispose alors d'une **prise sur les faces proximales**, limitant l'effet de glissement (**Figure 33**) ;



Figure 33 : Prise optimale de la couronne de 14 par liberté de sa face mésiale, facilitant le mouvement de dérotation (Courtoisie du Dr Godenèche).

- Pour réaliser les mouvements de 1^{er} ordre, il faut **éviter au maximum les blocages intra-arcades** en dégagant l'espace nécessaire à la dérotation (le plus souvent par expansion ou stripping préalable). Toutefois, la dérotation des PM est un cas particulier où la création d'espace n'est souvent pas nécessaire étant donné que le diamètre mésio-distal est moins important que le vestibulo-lingual.

2.3.2.3.4 Contrôle du 2^{ème} ordre

La version simple ou version incontrôlée est le mouvement le plus facilement obtenu par les aligneurs, nécessitant une simple force coronaire. Ce mouvement, qui est l'un des principaux mécanismes de gain d'espace sur l'arcade dans les corrections d'encombrement, requiert moins de précision, car le vecteur de force n'a pas besoin d'être en relation particulière avec le centre de résistance. La version est un sous-produit du moment induit par une force passant à distance du centre de résistance de la dent (119). Les aligneurs utilisent la pression sur la surface de la dent pour y parvenir, sans nécessité particulière d'un taquet. En fait, l'incapacité générale des aligneurs à diriger la force à travers le centre de résistance est en réalité dans ce cas un avantage, car le mouvement par défaut de la dent est une simple version (175).

A l'inverse, les difficultés de contrôle du 2^{ème} ordre sont un défi majeur de la réalisation d'un traitement de fermeture d'espaces antérieurs (diastèmes inter-incisifs), postérieurs (redressement molaire) ou d'extractions.

Dans toutes ces situations, l'enjeu biomécanique est similaire : assurer le contrôle radiculaire. La fermeture de l'espace est une interaction entre le moment de force, créé par la force de rétraction et le moment de couple (188). C'est le moment du couple qui joue un rôle prédominant dans le contrôle radiculaire. Sans ce dernier, le mouvement obtenu ne serait autre qu'une version incontrôlée.

La mise en place de taquets optimisés pour le contrôle radiculaire s'avère essentiel à la création du couple de forces (101) (**Figure 34**).

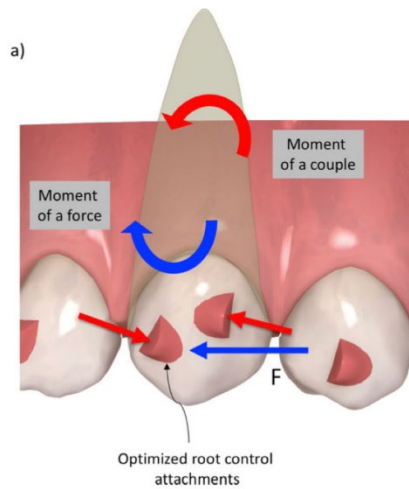


Figure 34 : Les taquets permettent de créer un couple de forces à l'origine d'un moment indispensable au contrôle radiculaire (206).

Le principe est le même pour les dents postérieures où un taquet horizontal doit être placé pour obtenir un couple de forces indispensable au redressement radiculaire (**Figure 35**).

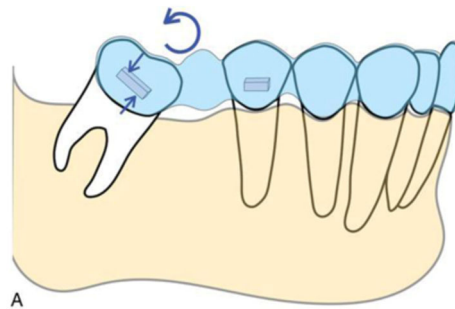


Figure 35 : Le redressement radiculaire d'une molaire est un mouvement complexe nécessitant un couple de forces (Courtoisie du Dr Vieillard).

Enfin pour les fermetures d'espaces importantes, afin de se rapprocher du centre de résistance des dents à déplacer et donc favoriser un mouvement de translation, il est possible d'utiliser des « power arms », présentés dans la partie 1. Ces potences, collées à la dent et associées à un taquet rectangulaire, sont mises en tension par une chaînette élastomérique (**Figure 36**).



Figure 36 : L'utilisation de « power arms » peut permettre de rapprocher les lignes d'actions des forces du centre de résistance des dents à déplacer afin de favoriser une translation (74).

2.3.2.3.5 Contrôle du 3^{ème} ordre

Le torque antérieur est l'un des mouvements les plus complexes à réaliser en orthodontie. Il nécessite obligatoirement un couple de forces à l'origine d'un moment important. Cependant, des études (82, 217) soulignent qu'un simple couple produit par les pressions des aligneurs à la surface vestibulaire et linguale de la dent aurait tendance à générer un mouvement de version des dents antérieures : la couronne de l'incisive centrale se déplace en direction palatine et la partie apicale en direction vestibulaire, le centre de rotation se situant approximativement entre les tiers médian et apical de la racine.

En cause, nous retrouvons une mauvaise prise de l'aligneur sur la dent, ayant tendance à glisser ou à se soulever (82), ainsi qu'un trop faible niveau de force déployé, avec un rapport moment force (M/F) négligeable (57).

Ce moment de couple tente d'être intensifié par des modifications sélectives des aligneurs tel qu'un renforcement mécanique de la zone cervicale, appelées lames de pression ou « power ridges » du système Invisalign®. Cette surépaisseur située à la limite cervicale de la dent, provoquera une pression responsable d'un moment de couple (**Figure 37**).

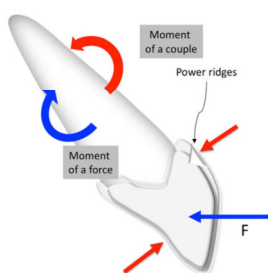


Figure 37 : Le « power ridge » vise à créer un moment de couple contrebalançant le moment horaire provoqué par la force distalante passant à distance du Cres (206).

De plus, contrairement à la technique Edgewise, la distance entre les points d'application peut-être plus éloignée, la force nécessaire pour obtenir le même moment est donc théoriquement inférieure avec les aligneurs (**Figure 38**).

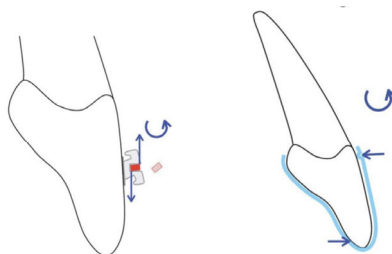


Figure 38 : La distance entre les points d'application étant plus importante dans les techniques par aligneurs, la force nécessaire pour l'obtention d'un même moment sera inférieure (Courtoisie du Dr Vieillard).

Le fonctionnement de la lame de pression réside dans l'instauration d'une déformation supplémentaire de l'aligneur, générant ainsi un angle entre la face interne de l'aligneur et la surface de la dent, ce qui favorise un contre-moment (**Figure 39**).

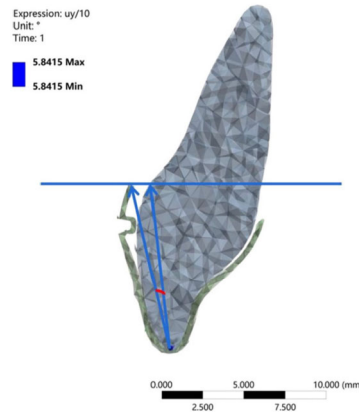


Figure 39 : Un angle de distorsion entre la surface de l'aligneur et de la dent est généré par le power ridge (35).

D'un point de vue mécanique, cet angle est déterminé par la hauteur de la lame de pression et reflète l'ampleur du contrôle du couple ; ces paramètres sont corrélés. En d'autres termes, d'après l'étude de Cheng (35), un mouvement de translation associé à une ingression peut être obtenu avec un angle de distorsion de 5,84 (avec une hauteur de crête correspondante de 0,7mm).

L'efficacité du contrôle radiculaire, notamment dans les cas d'extractions, pourrait également être amélioré par l'augmentation de l'épaisseur de l'aligneur (0,75mm) (36). Cependant, ces modifications semblent peu efficaces sur les incisives latérales qui présentent une égression relative. Cette situation pourrait découler de l'effet de glissement engendré par les aligneurs, car leur configuration avec les déformations de torque ne conviendrait pas à la forme des incisives latérales. De surcroît, l'augmentation de l'épaisseur des aligneurs, qui engendre des forces orthodontiques plus puissantes, serait responsable d'une plus grande perte d'ancrage dans les secteurs latéraux.

Étant donné l'incapacité des aligneurs à induire un mouvement de redressement radiculaire, des adaptations sont nécessaires dans la planification de nos traitements. Dans cette situation, l'objectif est de réaliser une ingression des incisives maxillaires associée à un torque radiculo-palatin (**Figure 40**). Cependant, il a été observé que ceci est l'un des mouvements les plus complexes à réaliser avec des aligneurs. Par conséquent, le protocole choisi dans ce type de cas consiste à segmenter la réalisation des mouvements : tout d'abord procéder à une vestibulo-version des incisives, suivi ultérieurement d'une rétraction incisive par un mouvement de translation (vraisemblablement avec l'aide de lames de pression). Ces adaptations sur le « staging », qui auront pour conséquence d'augmenter la durée des traitements, permettront d'accroître la prédictibilité du mouvement de 3^{ème} ordre.



Figure 40: Adaptation du séquençage des mouvements pour augmenter la prédictibilité des aligneurs (Courtoisie du Dr Peydro).

Quant au torque postérieur, les problématiques sont similaires. Lors de l'expansion des secteurs latéraux, l'effet indésirable classique des aligneurs se traduit par une manifestation de version corono-vestibulaire, pouvant aboutir à des risques parodontaux, incluant récessions parodontales et déhiscence osseuse.

Plusieurs stratégies ont été évaluées par l'étude de Yao et al. (214) afin de limiter cet effet parasite. Les conclusions de l'étude, se basant sur la méthode des éléments finis, sont les suivantes :

- Une **expansion** réalisée de manière **séquentielle**, similaire à celle effectuée pour une distalisation dans le plan sagittal, pourrait réduire la perte d'ancrage. Dans l'étude, la configuration ayant démontré le meilleur contrôle radicaire est celle où seule la première prémolaire et la première molaire ont été déplacées initialement ;
- Des **pressions** exercées sur l'aligneur au niveau des **secteurs latéraux**, telles que celles du power ridge en antérieur, ont été évaluées, mais sans démontrer une efficacité réelle. Il semble que pendant l'expansion, la gouttière ait tendance à se désinsérer de la face vestibulaire. Pour remédier à cela, il pourrait être pertinent de placer un taquet rectangulaire horizontal du côté vestibulaire. Cela aurait également pour effet de créer un couple de forces générant un moment de contrebalancement, éloignant ainsi le centre de rotation du système du centre de résistance de la dent (**Figure 41**) ;

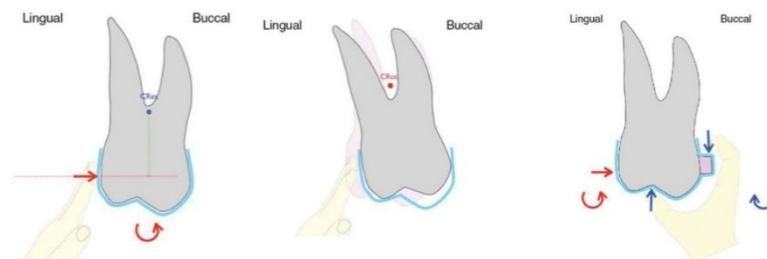


Figure 41 : Le placement d'un taquet vestibulaire permettra de limiter l'effet de désinsertion de la gouttière lors du mouvement d'expansion (Courtoisie du Dr Vieillard).

- Finalement, la mise en place d'un **torque radiculo-vestibulaire** de **compensation** pourrait permettre de limiter d'environ 0,02 mm la version coronaire par degré de torque instauré (**Figure 42**).

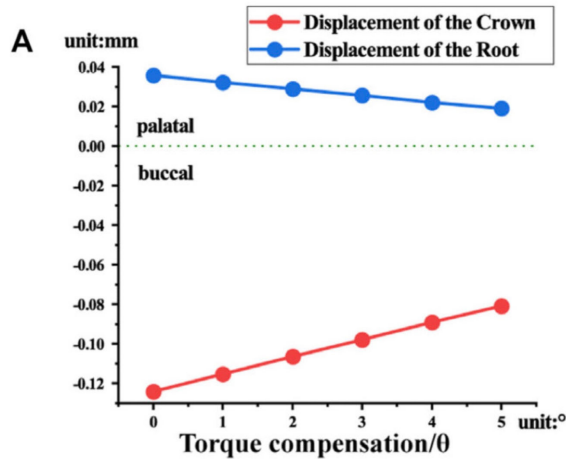


Figure 42 : La mise en place d'un torque radiculo-vestibulaire compensatoire durant l'expansion permettrait de limiter la version corono-vestibulaire (214).

2.3.2.3.6 Dimension verticale

- Correction de la **supraclusion**

La correction de la supraclusion à l'aide d'aligneurs peut être réalisée par 3 méthodes, seules ou combinées (206).

- Effet « graine de pastèque »

Les aligneurs ont la capacité inhérente d'engager simultanément les surfaces occlusales, vestibulaires et linguales des dents. Cette capacité leur confère une aptitude unique à appliquer des forces d'ingression à partir de toutes les directions, d'où l'expression "effet graine de pastèque". L'idée sous-jacente à cet effet est de créer un vecteur de force résultant qui passe par le centre de résistance des dents cibles (95). Cependant, même si cela peut sembler intéressant, les couronnes dentaires ne sont pas des structures symétriques. Cette asymétrie crée souvent une distribution inégale des forces, et la force résultante manquera très probablement le centre de résistance et créera un moment. Si ce moment peut être prédit à l'avance, des zones de pression (29) peuvent être ajoutées aux aligneurs pour créer une force supplémentaire qui redirigera la force d'ingression à travers le centre de résistance (**Figure 43**). À noter que l'effet ingressif appliqué en antérieur aura tendance à désinsérer la gouttière postérieurement par effet d'action-réaction. Des taquets veilleront à être placés sur les secteurs latéraux.

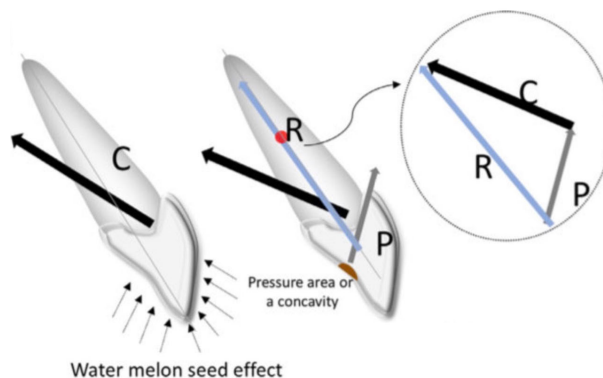


Figure 43 : l'effet ingressif créé par les aligneurs peut être rééquilibré par des zones de pression visant à rediriger le vecteur de force par le Cres des dents cibles (206).

➤ Rampes d'occlusion

La correction de la supraclusion est également obtenue par l'égression des dents postérieures. L'étape clé consiste à supprimer les forces occlusales. Des rampes d'occlusion, au fonctionnement similaire aux cales rétro-incisives peuvent être ajoutées à la surface palatine des incisives ou des canines maxillaires près de la zone du cingulum, afin de désoccluser les dents postérieures et d'encourager l'égression (73). Les rampes d'occlusion auront également pour effet une potentialisation de l'ingression antérieure (**Figure 44**).



Figure 44 : Les rampes d'occlusion permettent de potentialiser l'égression postérieure et l'ingression antérieure (206).

➤ Effet de pont-levis

La simple bascule des dents antérieures peut entraîner une pseudo-corrrection de la supraclusion, connue sous le nom d'effet « pont-levis » (**Figure 45**). Cet impact n'implique pas une « véritable » ingression des dents antérieures (un mouvement le long de l'axe longitudinal des dents) mais plutôt un simple mouvement relatif de la couronne incisive vers le bas et vers l'arrière. Cette méthode pourrait bien être le moyen le plus simple de corriger une forte supraclusion, car il est très difficile de faire passer les forces par le centre de résistance des dents cibles (95).

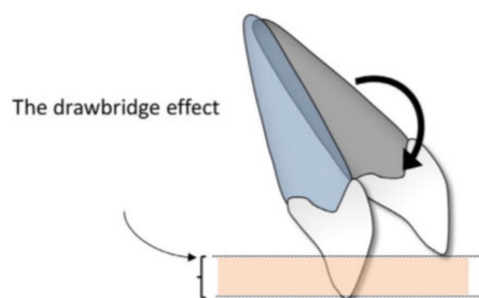


Figure 45 : L'effet « pont levis » est la méthode la plus prédictible de correction d'une supraclusion (206).

Toutefois, malgré ces 3 méthodes, une étude récente ayant étudié la correction de la supraclusion en aligneurs conclut qu'en moyenne la prédictibilité de correction de l'excès de recouvrement n'est seulement que de 33%, avec une grande discordance entre ce qui est planifié (3,35 mm) et ce qui est produit (1,15 mm). Cela oblige le praticien à programmer des sur-corrrections ou bien à effectuer des séries supplémentaires de finitions (186).

- Correction des **béances**

La correction des béances est essentiellement l'inverse de la correction de la supraclusion. Les principes de base sont similaires à ceux décrits ci-dessus. Les dents antérieures doivent être égressées au lieu d'être ingressées ; les dents postérieures doivent être ingressées au lieu d'être égressées ; et les incisives doivent être linguo/palato versées pour une pseudo-corrrection de la béance (84). La mécanique et les éléments auxiliaires sont également similaires. L'ingression des dents postérieures, potentialisée en aligneurs par l'effet « bite-block », provoque une rotation de la mandibule vers l'avant et dans le sens anti-horaire, ce qui participe à la réduction de la béance (66).

Harris et al. (84) ont tenté de quantifier l'importance des différents mécanismes intervenant dans la fermeture de la béance :

- Le principal mécanisme de fermeture de béance provient de **l'effet de pont-levis** ou de la simple version des incisives, qui représente près de **60 %** de la correction observée ;
- Cette fermeture est suivie par **l'autorotation de la mandibule (Figure 46)** causée par l'ingression des dents postérieures, qui représente **30 %** de la correction totale ;
- Enfin, **l'extrusion réelle des dents antérieures** ne contribue qu'à **10 %** ou moins de la correction.

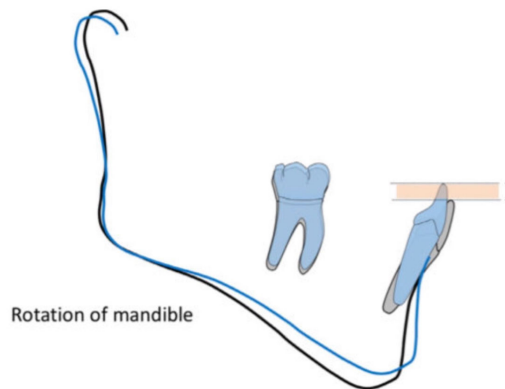


Figure 46 : L'ingression des dents postérieures peut causer une légère rotation anti-horaire de la mandibule favorisant la fermeture des béances (206).

Bien que ces pourcentages demandent la réalisation d'autres études cliniques pour être validés et qu'ils dépendent de la prescription mise en place, cette constatation n'est pas surprenante puisque des rapports cliniques ont suggéré que l'égression est l'un des mouvements les plus difficiles à réaliser par les aligneurs (174). En effet, les faces vestibulaire et palatine des incisives étant convergentes un taquet est obligatoire pour ce mouvement pour éviter l'effet de glissement de la gouttière et instaurer un vecteur de force vertical (114) (**Figure 47**).

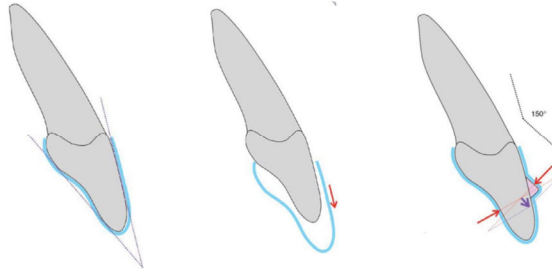


Figure 47 : La convergence des faces palatine et vestibulaire oblige à la présence d'un taquet pour la réalisation du mouvement d'égression (77).

Un essai clinique randomisé réalisé par Groody et al. (77) s'est intéressé à l'impact du design du taquet sur l'efficacité du mouvement d'égression sur les incisives latérales. 4 designs de taquets ont été testés :

- Un taquet optimisé d'Invisalign®, de forme ovoïde (O) ;
- Un taquet rectangulaire non biseauté (H) ;
- Un taquet rectangulaire biseauté en occlusal (HIB) ;
- Un taquet rectangulaire biseauté en gingival (HGB).

Les résultats démontrent que la présence des taquets rectangulaires, quels qu'ils soient, augmentent significativement l'efficacité du mouvement d'égression (76% du mouvement planifié) en comparaison au taquet ovoïde (62% du mouvement planifié).

- Nivellement de **la courbe de Spee**

Niveler une courbe de Spee ne consomme pas forcément d'espace, c'est niveler une courbe par un arc droit continu qui en consomme. Les courbes de Spee peuvent être différentes, leur nivellement doit être individualisé, ce qui est impossible avec un arc droit continu, imposant alors une technique segmentée.

Les traitements par gouttières réalisant une segmentation de mouvement unitaire sur chaque dent et étant individualisés permettent de niveler les courbes par égression et/ou ingression sans l'effet indésirable de disto-version ou vestibulo-version antérieure se produisant en arc droit (**Figure 48**) (177).

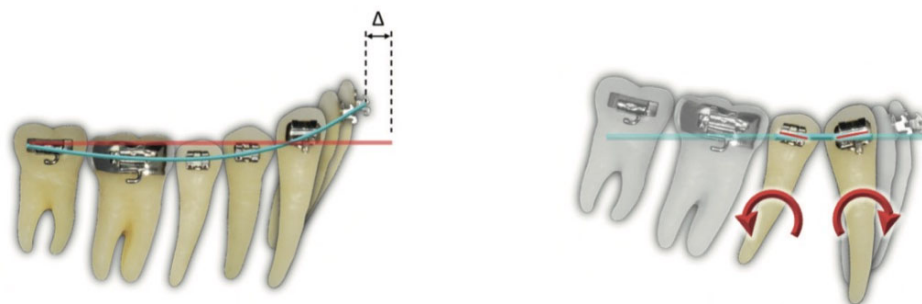


Figure 48 : Le delta entre la longueur d'arcade et celle de l'arc droit peut conduire à des réactions parasites de disto-version postérieure ou de vestibulo-version antérieure (22).

Néanmoins, ces mouvements sont indéterminés car bien que l'étude de Rozzi (177) affirme que le nivellement par aligneurs se produit majoritairement par ingression des incisives mandibulaires, on ne sait pas exactement dans quelles proportions d'ingression antérieure ou d'égression postérieure il se réalise. D'après une autre étude sur le nivellement de la courbe physiologique maxillaire (124), il semblerait qu'en comparaison à la simulation, les mouvements d'ingression ont tendance à être surexprimés. A l'inverse, les mouvements d'égression seraient sous exprimés voir même provoquer une ingression. L'utilisation d'auxiliaires (non employés dans cette étude) ou la sur-correction des mouvements d'égression doivent être pris en compte lors de la réalisation du plan de traitement.

2.4 Limitations actuelles

2.4.1 Efficience clinique des aligneurs

Une bonne façon d'estimer l'efficacité du déplacement des dents à l'aide d'un aligneur est de trouver le rapport entre le mouvement dentaire final/réalisé et le mouvement dentaire souhaité/prévu, comme suit (31) :

$$\text{Efficacité des gouttières (en \%)} = \frac{\text{Mouvement dentaire clinique}}{\text{Mouvement dentaire prédit ou souhaité}} \times 100.$$

La **Figure 49** représente une description quantitative de l'efficacité des gouttières pour les différents types de mouvements dentaires. Ces données constituent une version simplifiée des données de la littérature effectué par Upadhyay et al. (206) à partir de revues récentes (31, 83, 107, 188).

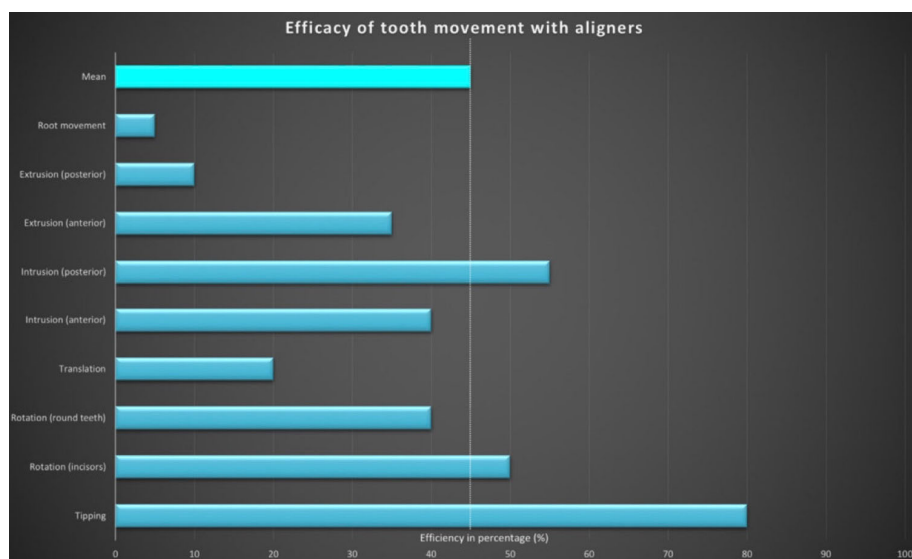


Figure 49 : Prédicibilité des mouvements dentaires par aligneurs selon une revue de la littérature (206).

Cette étude rapporte que **l'efficacité moyenne** des gouttières est d'environ **50 %** (107). En effet, ce n'est pas parce que les dents peuvent être facilement déplacées à l'aide d'un logiciel qu'elles réagiront nécessairement de la même manière dans la réalité. Cependant, grâce aux progrès de la technologie des gouttières et à une meilleure compréhension de la biomécanique, l'efficacité des gouttières a été améliorée au cours des dernières années (83).

Il s'agit de mouvements dentaires absolus et non relatifs. Par exemple, dans la section précédente, nous avons montré que la correction de la supraclusion peut être obtenue en faisant une simple version des dents ; cependant, cette version n'indique pas une véritable ingression ou égression (65).

Globalement, au niveau vertical, les gouttières sont plus efficaces pour l'ingression que pour l'égression des dents (175). En effet, les aligneurs déplacent les dents en les poussant plutôt qu'en les tirants (62), en permettant un contact intime entre la surface de la dent et l'aligneur. Cela facilite une répartition uniforme des contraintes et améliore la transmission et le contrôle de la force sur le mouvement de la dent (134).

Une évaluation des déplacements dentaires par CBCT a montré que les aligneurs effectuaient majoritairement des mouvements de couronne, et bien plus faiblement des racines, ce qui fait de la version le mouvement dentaire le plus prévisible (80%) et du mouvement radiculaire le moins prévisible (20%)(217). Toutefois, un mouvement radiculaire peut avoir lieu pendant que la version se produit également (version incontrôlée). Dans cette étude, les auteurs entendent le mouvement radiculaire au sens de torque pur, qui signifie spécifiquement un mouvement radiculaire avec un mouvement minimal ou nul de la couronne. En d'autres termes, un déplacement où le centre de rotation est situé au niveau de la couronne. Les tentatives de créer un mouvement radiculaire pur avec des aligneurs n'ont pas été couronnées de succès (200, 201, 217).

D'autres types de mouvements dentaires se situent avec des taux d'efficacité entre la version et le torque radiculaire. La rotation des dents arrondies telles que les prémolaires et les molaires est plus difficile que celle des incisives (83, 107, 174). Cette différence est encore amplifiée par les situations dans lesquelles une rotation supérieure à 15 degrés est souhaitée (106,188). Enfin, la translation par les aligneurs n'est observée que pour de très petits déplacements (< 1 mm) (95).

2.4.2 Raisons du défaut d'efficacité

Au-delà du mouvement de version, tous les autres mouvements ont des prédictibilités faibles (inférieures à 50%). Plus de la moitié des traitements nécessitent des finitions , des réévaluations, ou bien l'association à des appareils fixes (31,125). Les raisons du défaut d'efficacité des aligneurs peuvent être expliquées par certaines de ses limitations, énoncées ci-dessous :

2.4.2.1 *Mouvement dentaire par défaut, la version, le plus prédictible*

Comme présenté précédemment dans les mouvements du 2^{ème} ordre, **la version simple dite version incontrôlée est le mouvement dentaire "par défaut" en orthodontie**, tant pour les aligneurs que pour les appareils fixes. Une force unique appliquée par voie labio/linguale au niveau de la couronne crée ce résultat (201). Le clinicien n'a pas besoin de calibrer de manière complexe le type, la quantité, la méthode ou la direction de l'application de la force. En revanche, les mouvements dentaires plus spécifiques, tels que l'égression et l'ingression, nécessitent une planification détaillée pour diriger le système de forces à travers le centre de résistance, tandis que d'autres, tels que la version contrôlée, la translation et le torque, nécessitent l'application d'un couple de forces (moment de couple) pour optimiser le mouvement de la dent (27, 189).

2.4.2.2 *Force délivrée par les aligneurs*

Les appareils fixes offrent aux praticiens plusieurs options pour concevoir différents types de systèmes de force. La modification du type de l'arc (nickel titane ou acier ayant des modules d'élasticité différents), et/ou des dimensions et formes, en conjonction avec l'utilisation de différents types de systèmes de brackets (prescriptions ; clapets auto-ligaturants actifs/passifs) (88, 150) permet de créer le type de mouvement dentaire souhaité. Ces combinaisons permettent de choisir entre différentes intensités d'un système de forces. Les aligneurs n'offrent pas cette adaptabilité. **Les thermoplastiques utilisés pour les aligneurs sont dotés d'une rigidité de flexion définie** (E, I) qui ne peut pas être modifiée de manière significative (112, 133). De plus, la dégradation de la structure moléculaire du polymère par absorption d'eau peut se produire dans l'environnement oral, ce qui peut entraîner une diminution des forces orthodontiques réelles délivrées par les aligneurs au fil du temps (178).

2.4.2.3 *Faible résistance à la contrainte mécanique*

La relaxation des contraintes cause une **chute drastique de la force** au cours des premières heures d'utilisation des aligneurs, par la fatigue du matériau (**Figure 26**) (133). Cette diminution des forces doit être prise en compte lors de la planification du traitement avec les aligneurs (40).

2.4.2.4 *Notion d'activation de l'aligneur*

Comme indiqué précédemment, les mouvements dentaires complexes tels que la translation et le contrôle radiculaire nécessitent une force plus importante (201). Une façon d'obtenir cette force est d'augmenter l'activation des aligneurs (122). Les fils orthodontiques sont régulièrement activés par la flexion ou la torsion du fil, ou par le repositionnement de la bague : plus l'activation est importante, plus la force est élevée. Il n'en va pas de même pour les aligneurs. L'activation de l'aligneur entraîne une diminution de l'amplitude de la force par l'effet de relaxation des contraintes (105). **En fait, plus l'activation est importante, plus la chute de force est prononcée** (81). Cette tendance devrait favoriser le praticien à appliquer "l'effet de modelage" plutôt que l'utilisation des taquets, qui produisent des rafales soudaines d'activation suivies de chutes abruptes de la force. Il est énoncé précédemment que ces baisses deviennent exponentielles avec le temps (133).

2.4.2.5 Algorithmes simulateurs comprennent des variables inconnues

Au fur et à mesure que le traitement progresse, la mécanique des gouttières ne peut pas être ajustée, comme c'est le cas avec les appareils fixes. Au contraire, le système de forces et le mouvement dentaire qui en résulte doivent être prédits à l'avance pour toute la durée du traitement (23, 200). Cette prévision nécessite une compréhension approfondie non seulement des propriétés des matériaux et du système de forces, mais aussi des structures biologiques environnantes. Toute lacune dans les connaissances peut constituer un sérieux défi pour ces algorithmes de simulation. Nous pouvons énumérer certaines d'entre elles :

- La **prise en compte de l'anatomie de la racine** n'est pas systématique (bien que la fusion avec le CBCT proposée par certains logiciels soient prometteuses). Cette dernière est primordiale afin de localiser le Cres de la dent, et donc le système de forces à instaurer pour un mouvement dentaire spécifique, pouvant nécessiter la mise en place d'un couple de forces ;
- La **prise de l'aligneur sur la dent** et l'impact qu'aura celle-ci sur la réalisation du mouvement. La désinsertion de la gouttière due à l'effet de « glissement » empêche la bonne lecture des mouvements appliqués, en particulier ceux demandant la mise en place d'un moment important ;
- La **capacité du matériau d'aligneur à délivrer une force constante et suffisante** est mal représentée par les logiciels, ayant souvent tendance à la surévaluer.

Par conséquent, la prédictibilité du système de forces est médiocre et conduit à la réalisation de simulations partiellement réalisables.

2.4.2.6 Dégradation intra-orale des aligneurs

Le matériau d'aligneur présente des signes d'abrasion, de délamination, d'absorption de téguments et de biofilm calcifié localisé sur certains sites (71). **Ces effets peuvent diminuer le module d'élasticité des aligneurs**, ce qui les rend fragiles et susceptibles de développer des fissures (42). De telles occurrences sont fréquentes en cas d'utilisation prolongée des aligneurs en tant qu'appareils de rétention (69). En outre, contrairement aux arcs et aux bagues, les aligneurs subissent une dégradation de leur structure moléculaire en polymère par absorption d'eau dans l'environnement buccal. Cette dégradation peut entraîner **une diminution des forces orthodontiques** délivrées par les aligneurs au fil du temps (112, 178).

2.4.2.7 Les aligneurs sont des matériaux "viscoélastiques".

Les facteurs mis en évidence fournissent une compréhension fondamentale de ce que l'on peut attendre des aligneurs en termes de transmission de la force, de constance, d'ampleur et de dégradation. **Les aligneurs absorbent moins d'énergie parce qu'ils se déforment de façon permanente sous une charge modérée à lourde** (1). Ils ont beaucoup moins de résilience que les arcs (112) (**Figure 25**). Sur le plan clinique, cette différence est évidente. Une dentition encombrée qui peut être alignée par un seul arc en NiTi nécessite plusieurs gouttières pour la même correction. Les arcs métalliques sont capables de stocker de l'énergie (charge) et de transférer (décharge) aux dents pendant un certain temps, tout en subissant une fatigue minimale. En revanche, le peu d'énergie que les aligneurs absorbent est principalement dissipée sous forme de chaleur, et une quantité relativement faible est transférée aux dents. Ils sont de nature "viscoélastique". Les matériaux viscoélastiques absorbent mieux les chocs, les vibrations et les forces (133). Une application parfaite de ces matériaux peut être celle des "appareils de rétention".

2.5 Perspectives d'évolutions des aligneurs

2.5.1 Innovations des biomatériaux

Cette revue de littérature a mis en évidence les limites biomécaniques des aligneurs transparents. La plupart d'entre elles sont en lien avec le matériau d'aligneur lui-même. Des innovations dans la biochimie du matériau pourraient apporter des changements radicaux dans son application thérapeutique.

2.5.1.1 Polymères à mémoire de forme

La limite de quantité de mouvement pouvant être intégré dans un unique aligneur est un facteur limitant de l'efficacité des traitements (57, 131). Une solution pourrait être les matériaux à mémoire de forme. Ils présentent des propriétés élastiques qui leur permettent de reprendre leurs formes d'origine et cette reprise de forme peut à son tour générer des forces capables de produire un mouvement orthodontique (156).

Elshazly et ses coauteurs (59) ont mené une étude préliminaire in vitro sur un aligneur transparent à mémoire de forme, afin de démontrer la possibilité d'utiliser ce seul aligneur au lieu de trois aligneurs conventionnels successifs pour le même mouvement orthodontique. Les résultats de l'étude ont montré que la prédictibilité des mouvements réalisés était d'environ 93 % (1,76 mm). Les auteurs ont mentionné que, bien que les résultats soient prometteurs, cette étude ne pouvait être considérée comme une preuve de concept, en raison des multiples limitations d'une étude in vitro, basée sur le tyodont. L'étude postule que les matériaux à mémoire de forme pourraient être de plus en plus utilisés pour la fabrication d'aligneurs.

Par conséquent, le nombre de gouttières utilisées par traitement orthodontique pourrait être réduit, ce qui diminuerait les coûts de fabrication globaux et la durée nécessaire à la correction des malocclusions complexes (25, 26, 84), tout en réduisant la consommation de plastique.

2.5.1.2 Aligneurs imprimés en 3D

Comme évoqué précédemment, le processus actuel de fabrication d'une série de gouttières transparentes à partir d'un modèle obtenu soit à partir d'une empreinte, soit à partir d'un balayage intra-oral direct en 3D, est lourd, exigeant en main-d'œuvre et coûteux (**Figure 21**). Cela a fait naître le besoin d'une alternative plus viable, qui est actuellement testée sous la forme de gouttières transparentes imprimées directement en 3D à l'aide de résines appropriées. Graphy® a présenté le premier aligneur au monde directement imprimé en 3D, produit à partir de la propre résine d'impression 3D de l'entreprise.

Avec la rapide émergence de nouveaux matériaux d'aligneurs conçus en impression 3D et l'augmentation des coûts associés aux aligneurs transparents commerciaux, un intérêt croissant se manifeste parmi les orthodontistes pour la production « interne » d'aligneurs, directement au sein de leur cabinet, en contournant les sociétés de production tierces (118).

Cette approche innovante présente plusieurs avantages notables :

- Elle favorise l'adoption de circuits courts, offrant ainsi des avantages économiques et écologiques indéniables ;

- Elle permet de réduire les risques d'incompréhensions entre le praticien émettant la prescription et le technicien chargé d'interpréter les instructions, un processus qui peut s'avérer frustrant et chronophage pour l'orthodontiste ;
- Elle pousse l'orthodontiste à devenir un acteur au cours de l'élaboration du plan de traitement. Celui-ci peut préalablement sélectionner les mouvements à entreprendre et déterminer les forces à appliquer en fonction du diagnostic, des objectifs et du plan de traitement, plutôt que de se conformer a posteriori à une proposition thérapeutique générée par un algorithme standard qui hiérarchise les données selon sa propre logique.

Toutefois, la prise en main de ces nouveaux paramètres tels que le choix du type de matériaux d'aligneurs, le « staging » et les auxiliaires, ou leur méthode de fabrication implique la mise en place au sein du cabinet de l'équipement nécessaire (logiciel de set-up 3D, imprimantes 3D) (118).

2.5.1.3 Matériaux d'aligneurs : santé et environnement

La charge de plastique sur l'environnement liée aux gouttières transparentes est devenue une préoccupation majeure (166). L'attitude et la sensibilisation à l'environnement des trois parties impliquées dans le traitement par gouttières transparentes - le fabricant de gouttières, l'orthodontiste et le patient - jouent un rôle déterminant dans ce changement, et la situation actuelle ne semble pas satisfaisante :

- Premièrement, la majorité des **fabricants de gouttières** transparentes ne fournissent pas de directives à l'orthodontiste sur les moyens de recycler les gouttières usagées et proposent des forfaits illimités avec autant de gouttières que le praticien le souhaite pour une période de plusieurs années ;
- De même, la majorité des **praticiens** ne donne pas de conseils aux patients sur l'élimination ou le recyclage des gouttières usagées et les erreurs qu'ils commettent dans leurs protocoles par méconnaissance du fonctionnement amènent à la production de séries supplémentaires.

Toutefois, certaines sociétés d'aligneurs comme Smilers, s'engagent à proposer des solutions plus éthiques et éco-responsables. Leur initiative SmilersCARES® propose **le recyclage des gouttières** en les ramenant directement au praticien (**Figure 50**) qui assurera à son tour le retour dans l'entreprise. Le plastique recyclé sera utilisé à des fins médicales ou dans la voirie. Ce genre de solution doit être amené à se généraliser.



Figure 50 : Orthodontiste éco-responsable proposant une solution de recyclage (Via SmilersCARES) des aligneurs à ses patients (Image personnelle).

L'un des objectifs centraux de cette thèse consiste à souligner que, en attendant l'apport d'innovations technologiques, les sociétés spécialisées dans les aligneurs ainsi que les orthodontistes doivent collaborer en vue d'optimiser l'exploitation actuelle de ces dispositifs. Cette démarche en faveur d'une **meilleure compréhension des fonctionnements** et une **amélioration de la prédictibilité** des traitements aura pour effet **de réduire** tant **le nombre de gouttières** nécessaires que le total de séries prescrites, résultant à une diminution drastique de la consommation de plastique.

2.5.2 Modifications pour optimiser l'utilisation actuelle

Comme nous venons de le voir, sans innovation des biomatériaux, les aligneurs seront toujours limités par des contraintes biomécaniques et leurs performances seront inférieures à celles des appareils fixes. Cependant, certaines modifications concrètes, en réponse directe à leurs limites, peuvent être apportées dès à présent pour optimiser leur utilisation. Ces adaptations sont pour la plupart proposés par l'article de Upadhyay et al. (206).

2.5.2.1 *Version mouvement principal*

Les propriétés matérielles des gouttières transparentes sont principalement responsables de leur incapacité à appliquer un contrôle radiculaire (10,18). La "**version simple**" est le mouvement dentaire le **plus facilement réalisable** (31,106,217). La sélection des cas doit tenir compte de ce facteur. Toute malocclusion qui peut être corrigée par la version des dents aura une meilleure prédictibilité de traitement - c'est-à-dire la plupart des malocclusions -, telles que l'encombrement, les béances, les supraclusions et l'étroitesse des arcades. Cependant, si des malocclusions similaires nécessitent un mouvement exigeant de contrôle radiculaire, des moyens supplémentaires doivent être envisagés. Par exemple, une énorme différence dans le système de forces est nécessaire pour la fermeture de l'espace par version par rapport à une translation. Le rapport M/F nécessaire pour fixer la première est beaucoup plus faible que pour la seconde (189).

2.5.2.2 *Utiliser l'effet « shape molding » plutôt que les taquets*

L'effet de moulage de la forme crée une meilleure répartition de la force que les taquets et/ou les lames de pression. L'ampleur de la force initiale est similaire dans les deux cas, mais la contrainte exercée sur le matériau est plus faible dans le premier cas. Le niveau de contrainte plus faible contribuera à préserver plus longtemps les propriétés élastiques des gouttières et donc maintenir l'intensité du système de forces au fur et à mesure que le traitement progresse pour chaque aligneur.

2.5.2.3 *Prendre en compte la synergie des mouvements*

Les **paires de forces** se complètent conformément à la première loi de Newton ou loi d'équilibre, qui stipule que la somme de toutes les forces dans un plan quelconque doit être égale à zéro (22). Toute force mise en place se verra accompagnée d'une force de même direction et intensité mais de sens opposé. Cette considération doit être prise en compte car elle conditionnera la prédictibilité des mouvements à réaliser.

Elle se retrouve dans les 3 dimensions (**Figure 51**) :

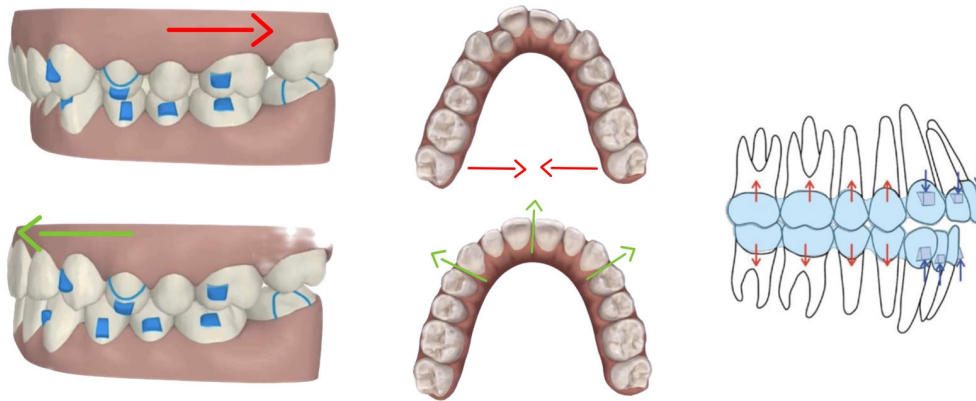


Figure 51 : La loi d'équilibre se retrouve lors des mouvements orthodontiques dans les 3 dimensions : antéro-postérieure, transversale et verticale (Image personnelle).

- Antéro-postérieure : la distalisation/mésialisation molaire sera associée à une vestibulo/palato-version incisive compensatrice ;
- Transversale : le toe in/out molaire favorisera le mouvement de vestibulo/palato-version incisive ;
- Verticale : l'égression/ingression antérieure sera accompagnée d'une forceressive/égressive sur les dents postérieures.

2.5.2.4 Épaisseur et limites gingivales des matériaux

Les aligneurs transparents peuvent présenter des épaisseurs et limites de formes et de hauteurs différentes :

- Les épaisseurs vont de 0,50 à 1,5 mm ;
- Les limites peuvent être droites ou festonnées ;
- Les limites sont plus ou moins hautes par rapport au feston gingival.

Une étude récente s'est intéressée à l'impact de ces designs sur la biomécanique des aligneurs, par la méthode des éléments finis (137). Elle a étudié 2 épaisseurs (0,5 ou 0,75 mm), deux formes de marges (droite ou festonnée) et 3 hauteurs (2 mm ; 0 mm ; -2 mm) (**Figure 52**).

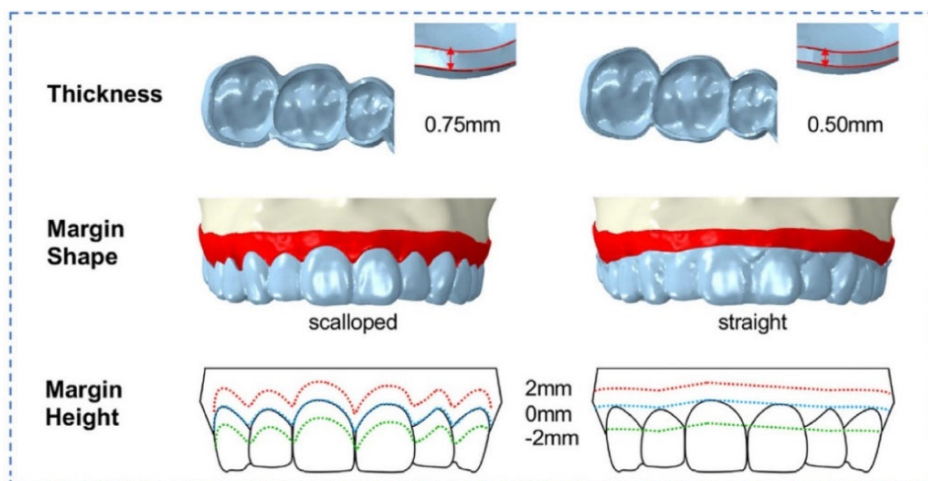


Figure 52 : Différents designs d'aligneurs selon l'épaisseur, la forme et la hauteur de la marge (137).

Elle conclut que l'épaisseur et la conception des marges des aligneurs ont affecté l'expression de la force orthodontique et ont donc influencé les mouvements dentaires :

- Les aligneurs de 0,75 mm d'épaisseur ont entraîné une contrainte sur le ligament parodontal plus élevée que ceux de 0,50 mm, mais sans qu'une corrélation significative ne soit trouvée entre la capacité de contrôle du mouvement dentaire et l'épaisseur, bien qu'une plus grande épaisseur aurait tendance à augmenter les mouvements radiculaires ;
- Pour différentes conceptions de marge, la contrainte a diminué de manière significative lorsque la hauteur était de 2 mm en dessous du zénith gingival. Les aligneurs à marge droite semblent exercer une force plus importante que les aligneurs de forme festonnée, mais l'effet de la forme de la marge était bien plus évident à une hauteur de 2 mm qu'à - 2mm.

A partir de ces données, les auteurs ont souhaité proposer **des recommandations** basées sur la biomécanique pour optimiser les conceptions d'aligneurs faites par les algorithmes d'intelligence artificielle. Il est proposé par leur algorithme la meilleure des configurations possibles sur chaque dent au cours des différentes étapes du mouvement dentaire. Il en ressort que la configuration optimisée serait des aligneurs de **0,75 mm d'épaisseur** avec des conceptions de **marges différentielles** (marge droite de 0 mm de hauteur pour les incisives, festonnée de 0 mm pour les canines et droite de 2 mm pour les dents postérieures). Ces recommandations peuvent servir de base à des études visant à valider ces hypothèses dans des situations cliniques réelles.

2.5.2.5 Moins d'activation par aligneurs

Une contrainte plus élevée entraîne une accumulation de fatigue dans les aligneurs. En fait, la potentialisation des aligneurs par plus d'activation conduit à une diminution plus importante du système de forces et du stress qui en résulte sur les aligneurs (105). Le fait de **réduire le mouvement** dent/aligneur permet **d'aplanir le déclin abrupt de la force** au fil du temps et de créer un système de forces cohérent et continu pendant toute la durée du port de l'aligneur.

2.5.2.6 Plus d'aligneurs par patient

Comme il ressort de ce qui précède, si moins de mouvement est intégré dans chaque gouttière, **davantage de gouttières seront nécessaires pour le traitement** (18, 192). Cette augmentation ne signifie toutefois pas qu'il faut plus de temps pour le traitement. La durée de port de la gouttière devrait donc diminuer. Par exemple, supposons qu'un mouvement de 1 mm soit effectué par une seule gouttière en 10 jours. Si le nombre d'aligneurs est porté à 5 pour le même mouvement de 1 mm, chaque aligneur ne doit être porté que pendant 2 jours. Bien entendu, cela suppose que le logiciel distribue le mouvement de 1 mm de manière égale entre les 5 gouttières. Le changement fréquent des gouttières présente à la fois de nombreux avantages liés à l'hygiène, à l'apparence et à la diminution de la dégradation du matériau, mais aussi un inconvénient majeur : son impact écologique.

3 APPORTS DES ANCRAGES OSSEUX DANS L'EFFICACITE DES ALIGNEURS

Comme évoqué dans la section précédente, les aligneurs présentent certaines limites dans la réalisation des mouvements, ce qui restreint l'exploitation complète des capacités de cette technique. Afin d'optimiser l'efficacité du traitement, il est possible d'intégrer un ensemble d'auxiliaires lors de la planification du cas. Parmi ces auxiliaires, les ancrages osseux jouent un rôle primordial, permettant la résolution de situations cliniques complexes.

L'objectif de cette troisième partie est de passer en revue les indications où l'ajout d'un ancrage osseux peut significativement améliorer l'efficacité ou faciliter le traitement par aligneurs. Nous examinerons en détail les recommandations des auteurs pour faciliter la synergie technique entre les deux approches. De plus, nous analyserons les conclusions de la littérature afin d'orienter judicieusement l'utilisation de ces ancrages, dont la pose n'est pas anodine, en vue d'améliorer la prédictibilité des mouvements orthodontiques et parfois même de repousser les limites entre l'orthodontie et la chirurgie orthognatique.

3.1 Moyens techniques

Pour commencer, nous allons recenser les considérations techniques qui établissent une connexion entre les ancrages osseux et les aligneurs.

3.1.1 Types d'attaches

Plusieurs possibilités de moyens d'application de la force sont envisageables (**Figure 53**) :

- Le **crochet** est le moyen le plus simple pouvant être utilisé. Il s'agit d'une découpe dans la gouttière (dite « precision cut ») fournissant un point d'ancrage à l'accroche d'un élément moteur ;
- Le **bouton** est directement collé sur la dent grâce à une découpe de la gouttière (là aussi appelée « precision cut »). Il peut être collé à différentes positions (vestibulaire ou palatin), ce qui modifiera le point d'application de la force. Son décollement peut être une source d'urgence ;
- Le **power arm** : sa potence, métallique ou céramique, permettra de rapprocher la ligne d'action de la force du centre de résistance de la dent et donc favoriser une translation.

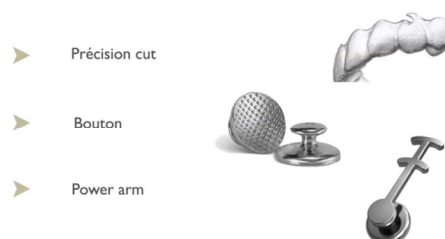


Figure 53 : Différents types d'attaches possibles (Courtoisie du Dr Bouhnik).

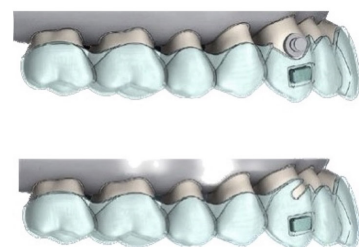


Figure 54: Configurations avec bouton collé (En haut) et avec crochet (En bas) (111).

D'après la littérature, le point d'accroche utilisé est décrit comme ayant un impact biomécanique important (**Figure 54**). Une étude à partir d'éléments finis (111) a tenté de clarifier l'influence de ces points d'attache dans le déplacement antérieur lors de la réalisation d'une distalisation séquentielle maxillaire appuyée d'une mécanique distalante (classe II ou ancrages osseux) :

- L'utilisation de precision cut provoquerait des **déformations de l'aligneur** plus importantes. En effet, la traction distale à partir d'un crochet directement sur la gouttière produit plutôt un effet sectoriel sur tout la zone antérieure en comparaison au bouton qui dispose d'un effet plus ciblé sur la canine. Les forces résultantes sur le secteur incisif serait alors majorées dans la première situation, favorisant un effet de « rabitting » ;
- De plus, la traction d'une mécanique de classe II sur le precision cut a **tendance à désinsérer l'aligneur**, ce qui diminue l'efficacité de la distalisation. Toutefois, cet effet est beaucoup moins prononcé lors d'une traction parallèle au plan occlusal réalisée grâce aux ancrages osseux.

Ces conclusions in vitro restent à prouver par des études cliniques plus approfondies. Elles permettront d'indiquer quel élément utiliser en fonction des situations cliniques.

3.1.2 Types d'éléments moteurs

On peut mettre en place différents moyens de traction (**Figure 55**) à cette attache, notamment :

- Les **élastiques** sont le moyen le plus simple, adapté à tous les types de patients. Ils offrent l'avantage de pouvoir être installés et retirés en même temps que la gouttière. De plus, la variété d'élastiques disponibles sur le marché permet d'appliquer des forces plus variées ;
- Les **chaînettes** ou les **ressorts Niti**, quant à eux, sont installés de manière permanente et n'exigent aucune participation active du patient (ni en termes de coopération, ni de dextérité). Cependant, cette option peut ne pas convenir à un patient qui prévoit de ne pas porter ses gouttières sur de longues périodes, car ces éléments pourraient alors engendrer des effets indésirables significatifs s'ils ne sont pas associés aux aligneurs.



Figure 55 : Différents moyens de traction utilisables (Courtoisie du Dr Bouhnik).

3.2 Indications

3.2.1 Dimension transversale

3.2.1.1 Disjoncteur appui osseux

La **prédictibilité des mouvements dans la dimension transversale des aligneurs** est décrite comme variant de 65% à 85% pour les deux arcades (49). Son efficacité dans la réalisation de l'expansion transversale est comparable à celle obtenue par un appareil dédié type Quad Hélix qui obtient la majeure partie de l'expansion par de la version corono-vestibulaire. Une étude ayant comparé la variation d'épaisseur de la corticale vestibulaire par CBCT avant et après expansion révèle que les aligneurs disposent d'une préservation de la quantité osseuse en hauteur et épaisseur similaire au quad-hélix, voir qui pourrait même être supérieure (9). Les auteurs l'expliquent par la vitesse d'expansion : étant plus lente et progressive, elle serait à l'origine d'un remodelage osseux et donc une conservation de la quantité osseuse. Cette hypothèse nécessitera des preuves scientifiques concrètes pour être validée. De plus, les aligneurs peuvent incorporer dans leur prescription un torque radiculo-palatin compensatoire limitant cette version incontrôlée (214).

Cependant, il est important de noter que l'utilisation de cette méthode ne permettra pas d'obtenir un bon contrôle radiculaire, ou très limité, ni d'atteindre des résultats significatifs sur le plan orthopédique. Il est également essentiel de rappeler que l'action étant uniquement dentoalvéolaire, ne doit pas être envisagée dans les cas où il existe un défaut squelettique avéré, appelé endognathie. En effet, Chang et al. (30) ont décrit les effets secondaires possibles de l'expansion palatine non chirurgicale qui, surtout chez les patients adultes, peuvent entraîner une version dentoalvéolaire responsable d'importants dommages parodontaux.

En 2010, Lee et al. (120) ont présenté un **appareil fixé au palais par des bagues conventionnels, associé à des mini-vis (Figure 56)**, nommé **MARPE** (Mini-screw Assisted Rapid Palatal Expansion). Il a été utilisé pour traiter un patient de 20 ans présentant une discordance transversale due à un prognathisme mandibulaire, évitant ainsi le recours à la chirurgie orthognathique. L'expansion a été réalisée avec succès, et les auteurs ont conclu que le MARPE était un moyen efficace de corriger les endognathies. De plus, étant donné que les mini-vis sont ancrées dans l'os basal, la force orthopédique exercée par l'appareil entraîne un mouvement squelettique quasi pur tout en minimisant les effets dentaires indésirables.



Figure 56 : MARPE (Mini-screw Assisted Rapid Palatal Expansion) (120).

Sur la base de l'étude de Lee et al., de nombreux auteurs ont récemment développé de nouveaux disjoncteurs squelettiques à l'aide de mini-vis, et de nouveaux dispositifs MARPE ont été utilisés pour corriger l'endognathie maxillaire chez des patients de différents âges, **sans intervention chirurgicale** (24).

Que ce soit pour un disjoncteur à fixation dentaire seule ou partielle dit disjoncteur à appui mixte, cela conduira la plupart du temps à une approche en deux phases : d'abord, une première période d'activation transversale à l'aide du dispositif, suivie d'une seconde période d'aligneurs.

Plus récemment, dans le but de ne provoquer aucun effet indésirable sur l'ancrage dentaire, ce qui est primordial dans les cas les plus critiques, **l'utilisation d'un disjoncteur à ancrage squelettique exclusif** (seulement par mini-vis) a été décrit dans des traitements par aligneurs (132, 135). Par ailleurs, d'autres auteurs ont mis au point des techniques afin de faciliter la mise en place de ces dispositifs, en introduisant des guides chirurgicaux (Miniscrew Assisted Palatal Appliance, MAPA system) (**Figure 57**). L'insertion de la mini-vis dans le palais est planifiée au préalable grâce au CBCT et reportée dans la salle opératoire à l'aide d'un guide chirurgical afin d'éviter d'endommager les structures anatomiques (139).

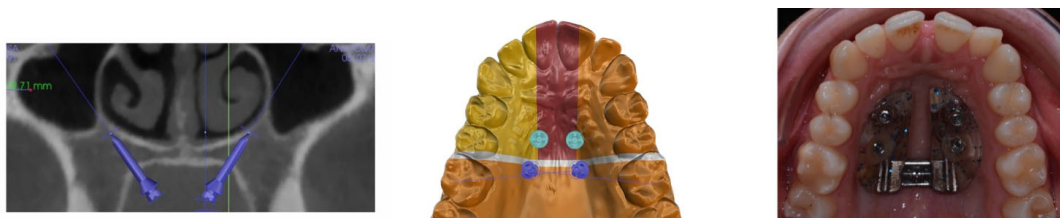


Figure 57 : Positionnement virtuel des mini-vis par CBCT pour pose d'un disjoncteur à appuis uniquement osseux (132).

En plus de son effet squelettique strict, un disjoncteur à appui uniquement osseux présente des avantages spécifiques au traitement par aligneurs, en n'interférant pas entre la surface dentaire et l'aligneur évitant une nouvelle empreinte après la dépose du dispositif et permettant de disposer dès le début du traitement d'une prise optimale de la gouttière sur les secteurs latéraux. Toutefois, dans le cas d'une suture encore immature et sans risque parodontal majeur, pour une question de simplicité et de coût, certains auteurs préféreront un disjoncteur classique scellé aux appuis dentaires, et recouvert par la gouttière transparente adaptée (**Figure 58**).



Figure 58 : Mise en place de la gouttière par-dessus le disjoncteur conventionnel à appui dentaire (Courtoisie du Dr Bouhnik).

3.2.2 Dimension antéro-postérieure

3.2.2.1 Distalisation maxillaire, avec vis maxillaire ou mandibulaire

En présence d'une classe II occlusale chez l'adulte, les traitements par aligneurs offrent plusieurs possibilités thérapeutiques comme la dérotation des molaires maxillaires, la distalisation maxillaire séquentielle, les élastiques intermaxillaires (distalisation en masse ± mésialisation de l'arcade mandibulaire), les extractions... La distalisation séquentielle est indiquée lorsque le décalage est d'origine dentaire, ou en présence d'une classe II squelettique modérée (ANB = 4° ou 5°).

Dans une étude réalisée par Ravera et al. (173), il a été constaté que les aligneurs permettaient une distalisation de la première molaire maxillaire de 2,25 mm à l'aide d'élastiques de classe II (à partir du moment où l'espace rétro-molaire était disponible pour le recul) et sans effet parasite de version mésiodistale de la molaire.

Toutefois, il convient de noter que certaines caractéristiques de la malocclusion peuvent compliquer l'efficacité de la distalisation maxillaire par les aligneurs seuls :

- Premièrement, **certaines situations peuvent nécessiter un recul supérieur à 2,25 mm.** Dans un traitement multi-attaches vestibulaire, des ancrages osseux, tels que des mini-vis vestibulaires (inter-radiculaires ou infra-zygomatiques) ou des mini-plaques, sont fréquemment utilisés pour des distalisations en masse. Yamada et al. (213) rapportent un recul allant jusqu'à 2,8 mm à l'aide de mini-vis interradiculaires. Dans une méta-analyse de 2021, Bayome et al. retrouvent des valeurs de distalisation jusqu'à 4 mm pour des localisations d'ancrages extra-alvéolaires, en position palatine ou infra-zygomatiques (14). Par conséquent, si le système d'ancrage squelettique est adapté aux aligneurs, il serait en théorie possible d'augmenter l'efficacité du mouvement de distalisation et d'élargir son champ d'indication. L'étude de mémoire du Dr Ilharreguy, bien que réalisée sur un faible nombre de cas, révèle une prédictibilité de 66% du recul des molaires maxillaires > à 2 mm par association mini-vis et aligneurs (92) ;
- La réalisation de ce mouvement par aligneurs nécessite un **ancrage antérieur suffisant** (129). Cet ancrage est d'autant plus crucial s'il existe une pro-alvéolie maxillaire ou bien plus rarement, des racines fines/résorbées. A l'inverse, l'ancrage se retrouvera renforcé par une tendance à la palato version des incisives maxillaires. L'étude réalisée par Ilharreguy (92) révèle une très faible perte d'ancrage dans le secteur antérieur lorsqu'un protocole à l'aide de mini-vis est employé (en moyenne d'1,34 mm pour l'incisive centrale) ;
- Classiquement, afin de renforcer l'ancrage, l'utilisation d'une mécanique de classe II est planifiée en amont du traitement et celle-ci doit être maintenue durant toute la distalisation (129). Mais l'utilisation de **cette mécanique est fréquemment associée à des effets parasites** (mésialisation de l'arcade mandibulaire, extrusion et palato-version antérieure maxillaire, rotation horaire du plan d'occlusion...). Certaines situations cliniques ne peuvent supporter la survenue de ces mouvements (défaut de torque antérieur maxillaire, symphyse mandibulaire fine...) ;

- Ceci nous est confirmé par une étude basée sur les éléments finis cherchant à évaluer les différentes méthodes de distalisation par une force de 1,5N (111). En plus de l'importance du type d'attache, évoquée en partie 3.1.1, l'impact de l'orientation de la ligne d'action de la force (de -30° à $+30^\circ$) joue un rôle primordial dans la prédictibilité des déplacements (**Figure 60**) : les conclusions de l'étude rapportent que l'efficacité maximale se situe lorsque la force est parallèle au plan occlusal. Cette orientation, qui suggère l'utilisation d'ancrages osseux pour être réalisée permet également de réduire l'incidence des effets parasites (**Figure 59**).

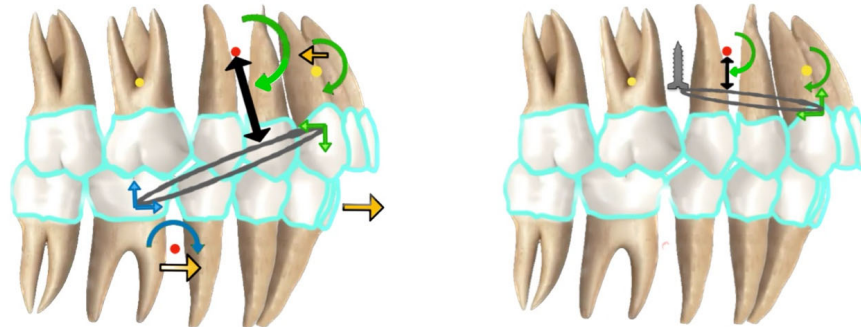


Figure 59 : Implications biomécaniques lors d'une distalisation maxillaire selon l'utilisation de TIA (à gauche) ou de mini-vis en ancrage direct (à droite). Les TIA entraînent plus de rotation horaire du maxillaire et de mésialisation de l'arcade mandibulaire (Courtoisie du Dr Ilharreguy).

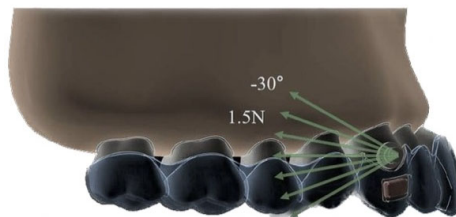


Figure 60 : Différentes possibilités d'orientation de la force distalante (111).

En conclusion, le recours à des ancrages osseux pour une correction de classe II dentaire par distalisation, peut permettre :

- **D'augmenter la limite de distalisation maxillaire** suffisamment prédictible par aligneurs, qui est de maximum 2,5 à 3 mm : au-delà, l'utilisation d'ancrages osseux doit être considérée permettant d'atteindre des reculs jusqu'à 4mm. Pour un décalage au-delà de 4mm, des extractions ou bien une décompensation en vue d'une chirurgie orthognatique doit être envisagée (92) ;
- **De renforcer l'ancrage antérieur**, d'autant plus critique si présence d'une pro-alvéolie incisive ou cas particuliers de résorptions ou de racines fines. Cela pourrait diminuer le nombre de séries de finitions supplémentaires ayant tendance à rallonger la durée de traitement (191) ;
- **De limiter les effets parasites liés à une mécanique de classe II** (92):
 - Solliciter l'ancrage mandibulaire et provoquer une mésialisation d'arcade ;
 - Provoquer un « rabbiting » excessif pouvant conduire à un manque de surplomb nécessaire à la correction de la classe II.

Ensuite, différentes configurations et systèmes de forces peuvent être mis en place afin de réaliser une distalisation maxillaire par aligneurs avec ancrages osseux :

TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	IMPLICATIONS BIOMECANIQUES	IMPLICATIONS CLINIQUES
ANCRAGE DIRECT	MAXILLAIRE	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (5-6) ou (6-7) (1.2/1.5-8mm) +- PALATINES (1.2/1.5-8mm)			<ul style="list-style-type: none"> Reculimité par les interférences racines/vis Possibilité de placer une seconde vis en palatin pour recul en "double câble"
	MANDIBULAIRE	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (6-7) (1.2/1.5-8mm)	<p>Dispositif hybride à rail de multi-attaches : aussi applicable par aligneurs seuls</p>		<ul style="list-style-type: none"> Positif extra-alvéolaire : <ul style="list-style-type: none"> Amplitude de recul plus importante (jusqu'à 3,5mm) Accrot l'effet ingressif sur les incisives Mini-vs plus difficile à mettre en place, taux de survie plus faible
ANCRAGE INDIRECT	MAXILLAIRE	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (5-6) ou (6-7) (1.2/1.5-8mm)			<ul style="list-style-type: none"> Renforcer ancrage antérieur maxillaire <ul style="list-style-type: none"> Avec stimulation de croissance mandibulaire éventuelle Effets parasites de la mécanique de classe II sur le maxillaire <ul style="list-style-type: none"> Effet "bowing" majoré
	MANDIBULAIRE	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (6-7) (1.2/1.5-8mm)			<ul style="list-style-type: none"> Reculimité (7 et 6) par distalisation séquentielle Une vis la classe I molaire obtenue, ancrage inter-radicaire fixé au 6 pour recul du reste de l'arcade <ul style="list-style-type: none"> Éviter perte ancrage postérieure Mécanique de classe II pour renforcer ancrage antérieur en début de traitement <ul style="list-style-type: none"> Effets parasites réactionnels sur l'arcade mandibulaire

Tableau 1 : Distalisation maxillaire par aligneurs et ancrages osseux : implications biomécaniques et cliniques selon les configurations.

3.2.2.2 Distalisation mandibulaire

Lorsqu'un patient adulte présente une malocclusion de classe III pouvant être traitée sans chirurgie, l'objectif de la thérapie est de corriger la relation dentaire, en atteignant une classe I molaire et canine, par la distalisation des molaires inférieures et des prémolaires, et en normalisant le surplomb antérieur. Ce type de mouvement peut également être souhaité lors d'une décompensation de classe II dentaire en vue d'une correction chirurgicale d'avancée mandibulaire.

Néanmoins, nous savons que la distalisation des molaires mandibulaires est plus compliquée que celle des molaires supérieures, notamment en raison de la densité de l'os mandibulaire qui rend le mouvement plus difficile (90) :

- En lien avec ces difficultés de déplacement, le principal effet indésirable de la distalisation des molaires inférieures est **la perte d'ancrage dans la région antérieure**, avec un déplacement mésial réactionnel des incisives mandibulaires qui est défavorable à l'obtention de la correction de l'occlusion inversée antérieure(60). Un article publié fin 2021 par Wu D et al. (211), qui a analysé l'efficacité de la distalisation des molaires mandibulaires en aligneurs par CBCT a mis en évidence des effets parasites sur l'incisive mandibulaire comme un mouvement d'avancée mésiale de 1,02 mm, une ingression de 0,82 mm, une version vestibulaire de 1,51° (**Figure 61**) ;

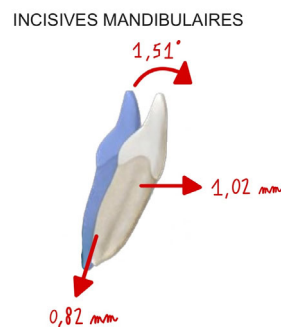


Figure 61 : Mouvements réactionnels sur l'incisive mandibulaire lors d'une distalisation par aligneurs (Image personnelle).

- De plus le contrôle radiculaire postérieur y est plus difficile qu'au maxillaire :
 - o L'étude de Wu D et al. a indiqué qu'il y avait des différences claires entre le déplacement des couronnes par rapport aux racines, avec des prédictibilités de distalisation des 2nde molaires de 74% (couronne) et 49% (racine) et des 1^{ères} molaires de 71% (couronne) et 47% (racine) ;
 - o Rota E et al. (176) ont publié un autre article analysant la distalisation des molaires mandibulaires, et leurs conclusions sont similaires, malgré un protocole qui intégrait une mécanique inter arcade de classe III en soutien d'une distalisation séquentielle progressive de ½ (50% du déplacement de la 2nde molaire était effectué avant de distaler la 1^{ère} molaire, et ainsi de suite). Le recul coronaire qui peut être espéré peut aller jusqu'à 2,47 mm pour la seconde molaire, mais seulement de 1,16 mm pour la première molaire (**Figure 62**).

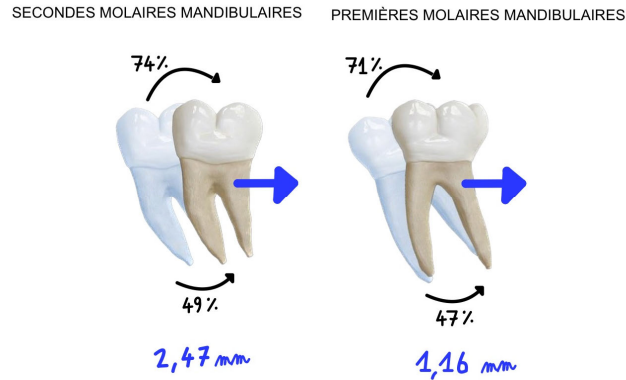


Figure 62 : Prédicibilité des déplacements coronaires et radiculaires (En noir), et déplacement distal coronaire total réalisé (En bleu), lors d'une distalisation des 1^{ère} et 2^{nde} molaires par aligneurs (Image personnelle).

Pourtant, l'utilisation des ancrages osseux afin de réaliser des distalisations mandibulaires par des moyens orthodontiques conventionnels permet d'atteindre des reculs supérieurs (3,5 mm pour la couronne, 1,8 mm pour la racine), et procure un mouvement qui s'apparente plus à une translation, bien qu'une légère version distale soit retrouvée(176,196).

Dans ce contexte, bien que ces hypothèses doivent être confirmées par des études cliniques (à l'heure actuelle, la combinaison aligneurs-ancrages osseux pour distaler à la mandibule a été seulement décrite par une étude de cas (8)), l'intérêt de l'utilisation des ancrages osseux combinée aux aligneurs serait double :

- **Renforcer l'ancrage antérieur** insuffisant pour limiter les effets indésirables dans les cas critiques (occlusion inversée antérieure sans composante fonctionnelle, symphyse mandibulaire fine...);
- **Augmenter la prédictibilité du mouvement de translation** s'il est nécessaire, et donc finalement, l'amplitude de la correction (crucial dans les cas de classe III, moins dans les préparations chirurgicales de classe II où l'arcade mandibulaire présente généralement une version mésiale par compensation dentaire de la situation squelettique)

L'utilisation des ancrages osseux associés aux aligneurs pour réaliser une distalisation mandibulaire pourrait être réalisée par différentes configurations :

TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	IMPLICATIONS BIOMECANIQUES	IMPLICATIONS CLINIQUES
ANCRAGE DIRECT	MANDIBULAIRE	MINI-VIS PLATEAU VESTIBULAIRE OU "BUCCAL SHELF" (2 - 10/12mm)			<ul style="list-style-type: none"> • Effet ingressif antérieure mandibulaire • Position extra-alvéolaire • Effet de rotation anti-horaire du plan d'occlusion, d'autant plus important que l'ancrage est placé haut • Simple à poser si absence ou extractions 3èmes molaires simultanés
	MAXILLAIRE	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (5-6) ou (6-7) (1.2/1.5-8mm)			<ul style="list-style-type: none"> • Renforcer ancrage antérieur mandibulaire <ul style="list-style-type: none"> ◦ Sans solliciter l'arcade maxillaire • Effets parasites de la méca de ci III sur la mandibule
ANCRAGE INDIRECT	MANDIBULAIRE	MINI-VIS PLATEAU VESTIBULAIRE OU "BUCCAL SHELF" (2 - 10/12mm)			<ul style="list-style-type: none"> • Ancrage extra-alvéolaire donc pose possible dès le début du traitement • Ancrage suffisant pour recul antérieur <ul style="list-style-type: none"> ◦ Perte d'ancrage postérieure quasi nulle ◦ Conservation relation molaire • Méca de ci III en soutien

Tableau 2 : Distalisation mandibulaire par aligneurs et ancrages osseux : implications biomécaniques et cliniques selon différentes configurations.

3.2.2.3 Cas particulier des extractions de prémolaires

La réalisation d'extractions de prémolaires reste une pratique orthodontique courante. Lorsqu'elle est réalisée afin de résoudre un décalage dans la dimension antéro-postérieure, elle doit souvent être associée à un maintien strict de l'ancrage maxillaire/mandibulaire afin d'obtenir une distalisation suffisante de l'arcade.

L'efficacité de la distalisation maxillaire par aligneurs a tendance à limiter la nécessité d'extractions pour une simple correction de classe II modérée (2 à 3 mm) (9). Toutefois, si cette dernière est trop importante et qu'elle est réalisée sans le renfort d'ancrages osseux, ou bien que d'autres éléments du diagnostic l'imposent (DDM, dents compromises, absence d'espaces postérieurs due aux 3^{èmes} molaires, absence d'os en distal des 2^{ndes} molaires, sinus procident limitant des mouvements radiculaires molaires ou prémolaires), **le moyen de traitement** (en l'occurrence les aligneurs), **ne doit pas remettre en cause l'indication des extractions** sous peine de compromettre la réussite du traitement (79,207).

Bien que certains auteurs défendent le fait qu'une approche fiable seulement à l'aide d'auxiliaires type power arms puissent offrir des objectifs de traitements satisfaisants (torque, parallélisme des racines, stabilité) (74), la fermeture des espaces d'extractions reste un défi majeur des traitements par aligneurs. En effet, dans ces situations, le contrôle de l'ancrage et des mouvements dans les différents ordres (translation dans les secteurs latéraux, torque antérieur, recouvrement) doit être strict. L'effet parasite majeur pouvant se produire est l'effet « bowing » (68,113,210) (**Figure 63**).



Figure 63 : Effet "bowing" lors du traitement par aligneurs (Image personnelle).

L'effet bowing avec les aligneurs est une perturbation du plan occlusal due à une diminution par ses deux extrémités de la longueur d'arcade, associée à la trop faible rigidité du matériau d'aligneur qui a tendance à se déformer et accentuée par la mécanique de classe II. Il se produit alors :

- Perte du torque antérieur ;
- Augmentation de la supraclusion ;
- Bascule et rotation distale des dents antérieures ;
- Ouverture de l'occlusion dans les régions prémolaires.

La manifestation de cet effet a été étudiée par des études sur des éléments finis pour comprendre quelle configuration pourrait permettre d'assurer le meilleur contrôle des mouvements à réaliser, et particulièrement si les ancrages osseux permettent de le limiter :

- Une étude récente de Zhu GY et al. (218) effectuée à partir de modèles 3D générés par la méthode des éléments finis, visait à analyser l'effet biomécanique des aligneurs transparents dans la fermeture de l'espace d'extraction sous différents contrôles d'ancrage (**Figure 64**). Cette étude comprenait trois groupes principaux de fermeture d'espace :
 - Groupe A ou contrôle, dans lequel aucun autre élément n'est venu renforcer l'ancrage dentaire ;
 - Groupe B, ancrage fort direct, où la fermeture de l'espace s'opère entre la mini-vis et la canine par l'intermédiaire d'un élastique, divisé en 3 sous-groupes selon la force (150, 300 et 500g) ;
 - Groupe C, ancrage fort indirect, fermeture de l'espace d'extraction avec un ancrage fort indirect, dans lequel une ligature métallique a été placée de la mini-vis à un bouton collé sur la deuxième prémolaire. Ce dernier a été testé à différentes positions verticales (gingivale, moyenne et proche du bord libre).

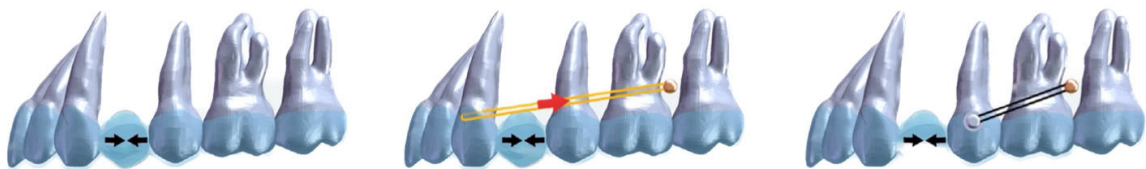


Figure 64 : Groupe A (Contrôle), B (Ancrage fort direct) et C (Ancrage fort indirect) (218).

Les résultats présentés sont les suivants :

- Pour le groupe de contrôle, sans surprise, l'arcade a présenté un effet bowing important. Les incisives ont été palatoversées et egressées. La canine présentait une version distale et une égression, tandis que la deuxième prémolaire était versée mésialement et ingressée. La perte d'ancrage a été de plus de 2 mm, ce qui est en accord avec la littérature (204) ;
- Le groupe d'ancrage direct avait un avantage en ce qui concerne l'intrusion des dents antérieures et la rotation du plan occlusal dans le sens anti horaire, ce qui était bénéfique pour réduire l'effet bowing et la supraclusion. Cependant, l'ancrage direct avait tendance à provoquer une plus forte version palatine du bloc incisivo canin maxillaire. Une sur correction anti-version des dents antérieures peut être nécessaire lors de l'utilisation de l'ancrage direct. Il convient de noter que la force élastique n'a pas pu empêcher complètement la perte d'ancrage des dents postérieures (0,5 mm), même avec une force importante (500 gr) ;
- Enfin, l'ancrage indirect a permis de mieux prévenir la perte d'ancrage des dents postérieures (0,2 mm), mais le contrôle du vertical et de la version mésiale de la prémolaire était délicat. Une position gingivale du bouton serait bénéfique pour diminuer ces effets.

- Une autre étude par Liu et al. (128) s'est intéressée à l'impact des mini-vis antérieures maxillaires pour établir un torque radiculo-palatin sur les incisives supérieures et donc compenser l'effet de « rabbiting » provoqué par la distalisation. Leur objectif était de comparer le système biomécanique de la rétraction antérieure avec des aligneurs avec et sans mini-vis antérieure et élastiques (**Figure 65**).

Les auteurs concluent qu'une mini-vis antérieure avec des élastiques ingressifs a permis d'obtenir une ingression des incisives et une torsion de la racine palatine de manière efficace. Cela pourrait également permettre de limiter l'ingression des deuxièmes prémolaires.

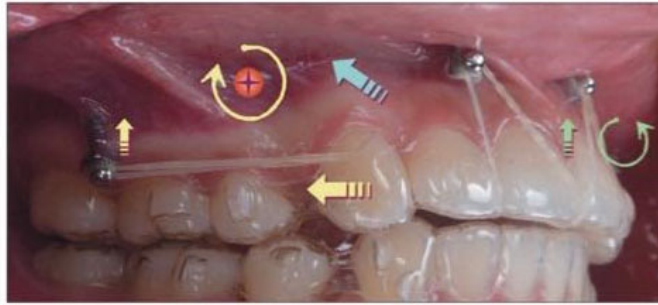


Figure 65 : Système biomécanique mis en place à l'aide de mini-vis infra-zygomatiques et antérieures inter-radicales vestibulaires. Les mini-vis postérieures infra-zygomatiques provoquent une force distalante et ingressive (Flèche jaune), qui se traduit par une rotation horaire au niveau du Cres de l'arcade maxillaire (Croix rouge). Les mini-vis antérieures permettent d'appliquer une force verticale ingressive (Flèche verte) associée à un moment anti-horaire ayant tendance à vestibulo-verse les incisives. La force résultant de ce système est distalante et ingressive (Flèche bleue) (128).

En conclusion, il en ressort de la littérature que l'usage des ancrages osseux pourrait permettre de **limiter certains aspects de l'effet « bowing »** (128,218). Il convient d'identifier au préalable les éléments complexifiant le traitement, tels que le besoin d'un ancrage postérieur strict, un manque de torque antérieur, ou une forte tendance à la supraclusion, pour les indiquer à bon escient.

Ce tableau résume les différentes configurations pouvant être mises en place selon les situations cliniques :

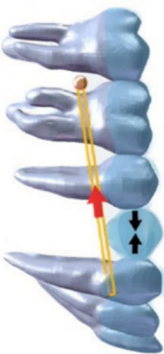
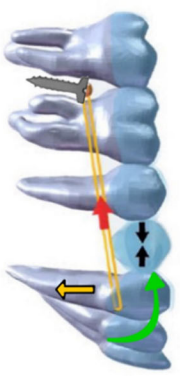

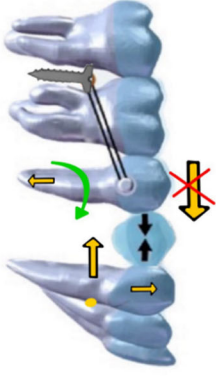
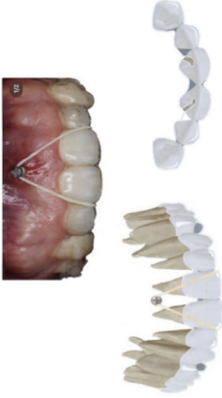
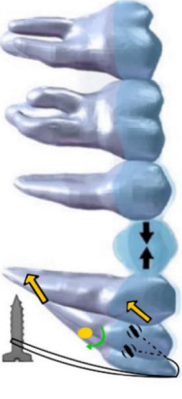
TYPE D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	IMPLICATIONS BIOMÉCANIQUES	IMPLICATIONS CLINIQUES
<p style="text-align: center;">ANCRAGE POSTÉRIEUR DIRECT</p>			<ul style="list-style-type: none"> • Composante ingressive sur les incisives : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Favorable dans les cas de supraclusion ◦ Aplanit le plan d'occlusion • Effet "rabbiting" majoré : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Renforcer les sur corrections compensatrices (torque radiculo-palatin) • Sollicite la coopération du patient
<p style="text-align: center;">ANCRAGE POSTÉRIEUR INDIRECT</p>			<ul style="list-style-type: none"> • Très efficace contre la perte d'ancrage • Moins efficace pour contrer l'impact de l'effet "Bowling" sur le plan d'occlusion <ul style="list-style-type: none"> ◦ Égression incisive et ingression prémolaire : peut être favorable en cas de béance ◦ Version mesiale pré molaire : renforcer par sur correction
<p style="text-align: center;">ANCRAGE ANTÉRIEUR</p>			<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle vertical lors de la rétraction incisive • Rajout de torque radiculo-palatin

Tableau 3 : Utilisation de mini-vis dans des cas d'extractions de prémolaires par aligneurs : implications biomécaniques et cliniques.

3.2.2.4 Mésialisation et redressement molaire

Le taux de réussite de la mésialisation molaire (MM) par aligneurs est faible (148), et ses effets parasites typiques tel que la version mésiale sont fréquents (181) (**Figure 66**). En effet, malgré le taquet, la prise de l'aligneur sur la molaire est faible, et le mouvement radicaire nécessaire pour une translation ou un redressement nécessite un fort couple de forces. De plus, comme évoqué pour la distalisation, l'os mandibulaire étant plus dense que le maxillaire, les mouvements sur les molaires inférieures demanderont une force d'autant plus importante(90).



Figure 66 : Effets parasites lors de la mésialisation de 47 (Courtoisie du Dr Godenèche).

Même dans le cadre d'un traitement multi-attaches vestibulaire, où le contrôle du deuxième ordre apparaît pourtant comme bien plus réalisable, des élastiques, des boutons ou des bras de levier sont généralement utilisés pour faciliter le déplacement mésial des molaires (160,181). Les solutions actuelles en aligneurs sont à peu près similaires, avec par exemple la possibilité d'accompagner le mouvement avec une mécanique de classe III ou classe II (selon une mésialisation maxillaire/mandibulaire) sur un power arm collé en mésial pour passer sous le centre de résistance de la molaire.

Une étude in vitro réalisée par Lyu et Al. (136) a évalué un système sans ancrage osseux pouvant permettre de limiter les effets parasites lors de la mésialisation d'une molaire mandibulaire par aligneurs. L'idée est d'utiliser un bras de levier collé à la molaire sur lequel s'ancrera la traction inter maxillaire de cl II. Le contre moment provoqué pourrait permettre de compenser celui instauré par la force mésialante de l'aligneur (**Figure 67**). L'efficacité et la faisabilité reste à prouver par des études cliniques.

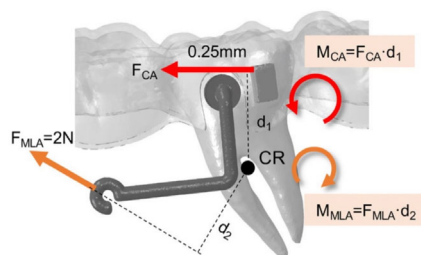


Figure 67 : Système mécanique comportant la force et son moment délivrée par l'aligneur (en rouge) et celle par le bras de levier collé à la dent (En orange) (136).

Bien que la littérature scientifique comporte peu d'études sur ce sujet, **il semble peu prédictible de dépasser 2 à 3mm de mésialisation pour une molaire mandibulaire**. Dans les cas de déplacements supérieurs ou avec fort redressement, le praticien a la possibilité d'utiliser des ancrages osseux de différentes manières :

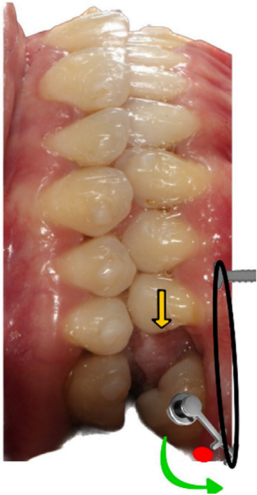
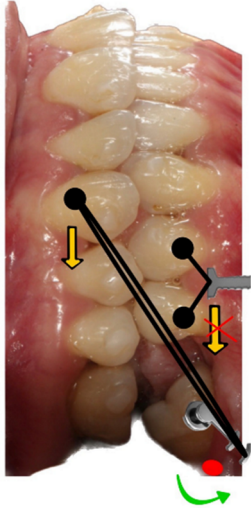
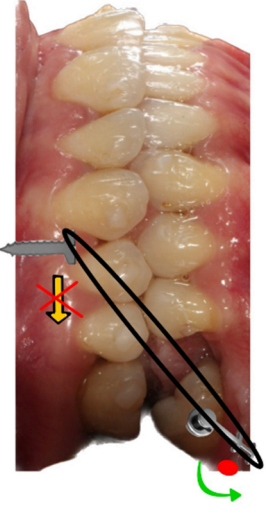
TYPE D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	IMPLICATIONS CLINIQUES
ANCRAGE DIRECT		<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement en translation • Perte d'ancrage légère secteur prémolaire
ANCRAGE INDIRECT		<ul style="list-style-type: none"> • Provoque un recul maxillaire • Composante verticale de l'élastique <ul style="list-style-type: none"> ◦ Accroît l'égression molaire • Perte d'ancrage très limitée
ANCRAGE MAXILLAIRE		<ul style="list-style-type: none"> • Composante verticale majorée • Sans effet sur l'arcade maxillaire

Tableau 4 Redressement et mésialisation molaire par aligneurs avec ancrages osseux : différentes implications cliniques selon la configuration mise en place.

3.2.3 Dimension verticale

3.2.3.1 Ingression antérieure mandibulaire

La malocclusion de classe II s'accompagne fréquemment d'une supraclusion. Dans la majorité des cas de notre pratique clinique, il est nécessaire de donner la priorité au nivellement de la courbe de Spee (COS). Une COS nivelée crée les conditions nécessaires à la rétraction des dents antérieures maxillaires. Dans cette optique, l'ingression des incisives mandibulaires représente une étape clé.

Cependant, lors de l'ingression des incisives mandibulaires, **les aligneurs ne sont pas suffisamment efficaces** : Kravitz et al. (107) ont rapporté que la prédictibilité du mouvement d'ingression des incisives centrales et latérales mandibulaires était de 44 % et 45 %, respectivement. L'étude clinique d'Al-Balaa et al. (2), qui s'est intéressée à la prédictibilité de la réalisation des mouvements d'ingression par aligneurs chez 25 patients, rapporte une efficacité de 44,71 % pour les incisives inférieures (**Figure 68**).

INCISIVES MANDIBULAIRES

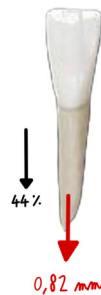
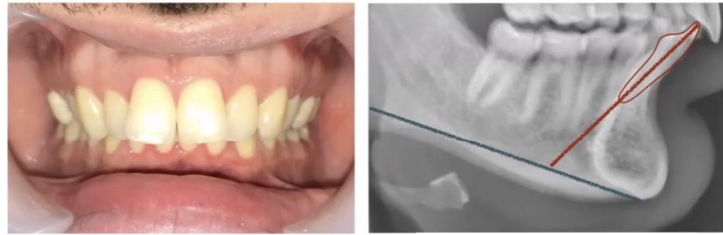


Figure 68 : Prédictibilité de l'ingression des incisives mandibulaires par aligneurs (En noir) et déplacement total réalisé en mm (En rouge) (107).

De plus, certains critères peuvent venir complexifier la réalisation du mouvement :

- **L'IMPA** (Incisor mandibular plane angles) varie en fonction de la classification et de la gravité de la malocclusion de classe II). Biomécaniquement, le redressement aura pour effet parasite de s'accompagner d'une égression relative (effet « pont levis » **Figure 45**) (**Figure 69**). La quantité d'ingression nécessaire en sera d'autant plus importante. De plus, l'effet produit par l'ingression sera lié à l'IMPA initial (123). Un IMPA de 90° produira une force légèrement mésialante (voire distalante pour les incisives latérales) avec un moment anti-horaire (version coronaire linguale) alors qu'un IMPA de 110° engendrera une force mésialante plus importante, ainsi qu'un moment opposé (version coronaire vestibulaire). Toutefois, dans les deux cas, la racine a tendance à être poussée mésialement, avec un risque de complications parodontales (déhiscence osseuses, fenestrations...);



IMPA = 121°

Figure 69 : La version de l'incisive mandibulaire est un facteur complexifiant la correction de la supraclusion : son redressement entrainera une égression relative, et la force ingressive peut provoquer des effets parodontaux indésirables (Courtoisie du Dr Bouhnik).

- La sévérité de la supraclusion et l'impact de la COS sur celle-ci, ou autrement dit la **quantité d'ingression** des incisives mandibulaires **souhaitée**. L'étude d'Al-Balaa expose une ingression totale moyenne de 0,82 mm seulement à l'aide d'auxiliaires simples (zones de pressions, taquets secteurs latéraux...). Au-delà de cette valeur, les auteurs suggèrent (2) :
 - De modifier le « staging », c'est-à-dire la séquence des mouvements à réaliser. Ils préconisent une ingression séquentielle, en ingressant les canines dans un premier temps ;
 - De procéder à des sur-corrections des mouvements, à la hauteur de 50% ;
 - D'utiliser des ancrages osseux associés aux élastiques pour ajouter un vecteur de force vertical au système biomécanique mis en place. Les ancrages osseux associés à des dispositifs orthodontiques fixés, bien que la majorité des études se soient concentrées sur l'arcade maxillaire, peuvent permettre d'augmenter l'ingression produite (70, 162).
- Il serait utopique de penser que la production d'un mouvement d'ingression ne s'accompagne pas **d'effets indésirables réactionnels** :
 - L'égression des secteur latéraux mandibulaires. Phénomène qui sera néanmoins limité par la tendance des aligneurs à ingresser les secteurs postérieurs (effet « bite-block ») ;
 - L'ingression des incisives maxillaires.

Toutefois, on ne sait pas dans quelles proportions les mouvements se réalisent. Ces effets réactionnels peuvent se retrouver accentuer par l'utilisation d'auxiliaires tels que les bite ramps, qui potentialiseront à la fois l'égression postérieure et l'ingression des incisives, maxillaires et mandibulaires. Or la situation clinique peut exiger de ne pas vouloir égresser en postérieur (patients hyperdivergents...), ni ingresser les incisives maxillaires (sourire pauvre, fragilité incisives maxillaires...) (**Figure 70**).



Figure 70 : Résorptions sur les incisives maxillaires contre-indiquant l'application de forces ingresses (Courtoisie du Dr Bouhnik).

En conclusion, il en ressort de la littérature que dans ces contextes de difficultés, l'utilisation des ancrages osseux peut s'avérer cruciale : en plus de **potentialiser l'ingression**, ils peuvent permettre de **diminuer l'incidence des réactions parasites**. Il convient d'identifier au préalable ces éléments (IMPA, quantité d'ingression, type de mouvements souhaités).

Ce tableau résume les différentes configurations pouvant être mises en place selon les situations cliniques :




TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	CRITÈRES CLINIQUES
ANCRAGE DIRECT		MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (1-2 / 2-3 / 3-4) (1,2/1,5-8mm)	<p>HAMAC A PARTIR DE TAQUETS SUR LE BORD OCCLUSAL</p>  <p>HAMAC A PARTIR DE CROCHET(S) INTÉGRÉ(S) A LA GOUTIÈRE</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Placement sagittal des vis : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Une position distale au CR des incisives mandibulaires engendrera un vecteur de force distalant • Épaisseur d'os inter radiculaire : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Dépendant de la proximité radulaire ◦ Peut imposer un placement plus distal • Hauteur de gencive kératinisée : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Positionnement en gencive attachée obligatoirement ◦ Si faible hauteur laisser dépasser quelques mm de la vis, éviter son invagination
	MICRO-VIS SYMPHYSAIRE	 <p>Configuration avec multi-attaches vestibulaires, aussi applicable par aligneurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Position extra-alvéolaire : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Pas de contrainte liée au niveau osseux ou à l'épaisseur gingivale ◦ Possibilité d'orienter librement la position du bras en sagittal/vertical 	

Tableau 5 : Ingression des incisives mandibulaires par aligneurs avec l'aide d'ancrages osseux : moyens d'associations et critères cliniques guidant la mise en place.

3.2.3.2 Ingression antérieure maxillaire

L'ingression des incisives maxillaires peut s'avérer être d'une importance majeure dans la réalisation des objectifs du traitement orthodontique : d'ordre biomécanique, afin de contrer les effets parasites lors de la rétraction incisive (voir 3.2.2.3) ou de corriger une supraclusion, et esthétique, car cela peut être un moyen de traitement efficace du sourire gingival(54).

L'ingression de l'incisive maxillaire est un mouvement relativement peu prédictible en aligneurs bien que supérieur à l'ingression des incisives mandibulaires. L'étude d'Al-Balaa (2) indique que la prédictibilité de ce type de mouvement pour l'incisive latérale est de 58,12%, avec une capacité d'ingression de 1,1 mm (2)(Figure 71).

INCISIVES MAXILLAIRES LATÉRALES

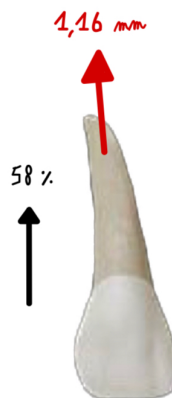


Figure 71 : Prédicibilité de l'ingression des incisives latérales maxillaire par aligneurs (En noir) et déplacement total réalisé (En rouge) (107).

Toutefois, certains critères identifiables dès le diagnostic peuvent demander une plus grande exigence dans l'efficacité de réalisation du mouvement :

- **Le sourire gingival** correspond à une exposition d'au moins 3mm lors du sourire (164). Il peut être attribué à diverses étiologies, parfois associées, telles qu'une lèvre supérieure courte ou hypotonique, une hyperplasie gingivale, un excès vertical antérieur maxillaire, ou une égression des incisives maxillaires (54). Dans les cas légers à modérés, une ingression de 2 à 4 mm peut être souhaitée afin d'atténuer l'ampleur de ce dernier. L'intérêt des mini-vis associées aux appareils fixes afin d'accentuer l'ingression et de corriger le sourire gingival a été démontré par des méta-analyses (5,11). Ces études rapportent que les ancrages osseux représentent le moyen le plus efficace pour réaliser ce mouvement, et cela en ne provoquant quasiment pas d'effets parasites. L'association avec les aligneurs (Figure 72) est plus rare dans la littérature, mais a été rapportée dans une étude de cas, permettant de remplir avec succès les objectifs du traitement (126) ;



Figure 72 : Les élastiques sont attachés des mini-vis antérieures vestibulaires aux découpes de l'aligneur (Sur les surfaces palatines de 11 et 21) (126).

- Lors d'un traitement ayant nécessité des extractions, **le contrôle de l'effet bowing** est un objectif crucial. L'ingression des incisives maxillaires, accompagnée d'un torque radiculo-palatin, permet de limiter la perte de torque antérieur ainsi que l'égression qui accompagne la rétraction incisive souvent assistée par mécanique de classe II (**Figure 65**). Pour limiter ces effets parasites dans les traitements par aligneurs, l'apport des mini-vis afin d'accentuer la prédictibilité de l'ingression a été évalué positivement (128) ;
- A l'instar de ce que nous avons présenté pour les incisives mandibulaires, lorsque l'on programme de l'ingression des incisives maxillaires, il est difficile de prédire ce qui se passe réellement : il s'agit en réalité d'une combinaison d'ingression des incisives (maxillaires et mandibulaires), associée à une égression des secteurs postérieurs. Dans certains cas ces **mouvements réactionnels** peuvent ne pas être indiqués, des ancrages osseux placés de manière stratégique pourrait permettre de les **limiter**.

En conclusion, l'effet des ancrages osseux afin de potentialiser l'ingression des incisives maxillaires par aligneurs est triple :

- Augmenter la quantité d'ingression souhaitée : situation recherchée dans le **cas du sourire gingival** ;
- Contrer certains effets parasites fréquents lors de la **fermeture d'espace d'extractions** de prémolaires ;
- **Limiter** les **mouvements réactionnels** tels que l'ingression des incisives mandibulaires ou l'égression des secteurs postérieurs.

Ce tableau résume les différentes configurations pouvant être mises en place selon les situations cliniques :


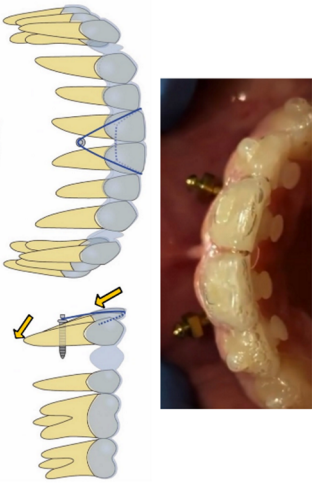
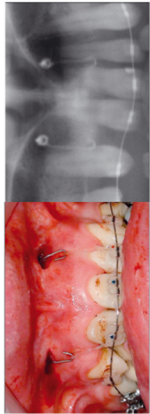
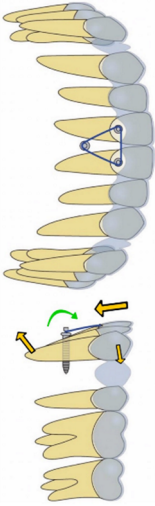
TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	INFLUENCE DU MOYEN D'ATTACHE	CRITÈRES CLINIQUES
ANCRAGE MAXILLAIRE DIRECT	MINI-VIS INTER-RADICULAIRE (1-2/1,5-8mm) (1-2 / 2-3 / 3-4)	2 MINI-VIS (ENTRE 1-2 OU 2-3) 	BOUTONS COLLÉS/DÉCOUPÉS EN PALATIN 	<ul style="list-style-type: none"> • Placement sagittal des vis : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Une position distale au CR des incisives maxillaires engendrera un vecteur de force distalant • Épaisseur d'os inter radiculaire : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Dépendant de la proximité radiculaire ◦ Peut imposer un placement plus distal • Hauteur de gencive kératinisée : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Positionnement vis en gencive attachée obligatoirement ◦ Si faible hauteur disponible, laisser dépasser quelques mm de la vis, afin d'éviter son invagination • Hauteur du frein labial supérieur : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Frein court : 2 élastiques croisés obligatoires ◦ Frein plus long : 1 seul élastique possible 	
	MICRO-VIS ORIFICE PIRIFORME	 <p><small>Configuration avec multi-attaches vestibulaires, aussi applicable par alligneurs</small></p>	BOUTONS COLLÉS EN VESTIBULAIRE 	<ul style="list-style-type: none"> • Position extra-alvéolaire : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Pas de contrainte liée au niveau osseux ou à l'épaisseur gingivale ◦ Possibilité d'orienter librement la position du bras en sagittal/vertical 	

Tableau 6 : Ingression des incisives maxillaires par aligneurs : différentes configurations, moyens d'attaches et critères cliniques.

3.2.3.3 Ingression postérieure

La béance antérieure demeure l'une des situations les plus complexes en orthodontie, principalement en raison des mouvements nécessaires pour traiter cette affection et de son taux élevé de récurrence (75, 80, 153). Celle-ci peut découler soit d'une anomalie dentoalvéolaire, soit d'un problème squelettique. Les atteintes squelettiques présentent souvent un pronostic moins favorable par rapport à une origine exclusivement dentoalvéolaire, ce qui justifie souvent le recours à une intervention chirurgicale combinée au traitement orthodontique dans de tels cas (80). L'étiologie peut être multifactorielle, mais elle est souvent liée à une dysfonction linguale, parfois associée à une prédisposition génétique ou familiale (153).

Bien que l'égression des secteurs antérieurs puisse être nécessaire, il convient de souligner l'importance de l'ingression molaire (67, 152). Néanmoins, réaliser une véritable ingression molaire sans recourir à des dispositifs d'ancrage squelettique demeure une tâche complexe. En effet, les dispositifs orthodontiques fixes ont tendance à favoriser l'égression. Les mini-vis, en raison de leur manipulation aisée et de leur confort, semblent représenter l'ancrage osseux idéal pour atteindre cet objectif (6,8). Par ailleurs, le traitement par aligneurs constitue la meilleure approche pour éviter l'égression postérieure en raison du matériau interposé entre les surfaces occlusales, responsable de l'effet « bite-block ». L'étude rétrospective de Laura Talens-Cogollos et al. rapporte l'occurrence d'une ingression molaire de différentes intensités dans 74,2% des cas traités, même lorsque celle-ci n'est pas souhaitée (198). La variabilité des valeurs d'ingression retrouvées confirme que l'effet « bite-block » est dépendant de facteurs inter-individuels tels que la force du stimulus de contraction musculaire. L'auteur suggère que des études plus précises sur cette association soient réalisées, car cela permettrait de prédire les patients qui seront plus facilement sujet à cette ingression. Dans tous les cas où ce mouvement vertical est particulièrement crucial, la combinaison aligneurs-ancrages osseux autoriserait une efficacité maximale de l'ingression molaire :

- Lors d'une fermeture de béance par des moyens orthodontiques, il est difficile d'anticiper le mécanisme précis de correction. Comme le suggère Harris (84), cela serait une combinaison de différents effets : le « pont-levis » par la version incisives (60%), l'ingression postérieure permettant une autorotation mandibulaire (30%) et l'égression incisive pure (10%). Dans certains cas ni l'inclinaison des incisives (qui peuvent être déjà plutôt rétro-inclinées), ni leur position verticale (sourire à tendance gingival), ne doivent être modifiées. Le diagnostic exigera une correction de la béance principalement par de l'ingression molaire. Les ancres osseux seront alors primordiaux pour **incliner la balance des facteurs en faveur de l'ingression postérieure** et de la rotation mandibulaire, favorisant ainsi ce mécanisme précis de fermeture de la béance ;
- Comme nous l'avons évoqué dans la partie 2.3.2, la réalisation de l'ingression molaire pourrait également permettre **une légère autorotation mandibulaire**, réduisant ainsi la hauteur faciale et améliorant la projection du Pogonion (173) (**Figure 46**). Cet impact peut s'avérer déterminant lors de légers décalages squelettiques comme une hyperdivergence ou/et une classe II, associés à des facteurs fonctionnels tel qu'une difficulté à l'occlusion labiale. Dans une étude de cas publiée par Pinho et al., la patiente qui présente une béance squelettique importante (hyperdivergence

mandibulaire et rétrogénie) et ayant refusé la chirurgie, a bénéficié d'un traitement de correction de sa bécance par la combinaison d'aligneurs et d'ancrage osseux (**Figure 73**). A partir de la comparaison des céphalométries réalisées en début et fin de traitement, les auteurs affirment que la patiente présente une réduction significative du FMA de 6° et de l'inclinaison du plan occlusal de 1,5°. De plus, ils ajoutent que la diminution de la hauteur faciale antérieure a facilité l'acquisition d'une compétence labiale (169). Un autre cas, traité par la même technique, présenté par Sabouni rapporte une diminution de l'ANB de 3°, la rotation anti-horaire s'accompagnant d'un mouvement d'avancée mandibulaire (180).

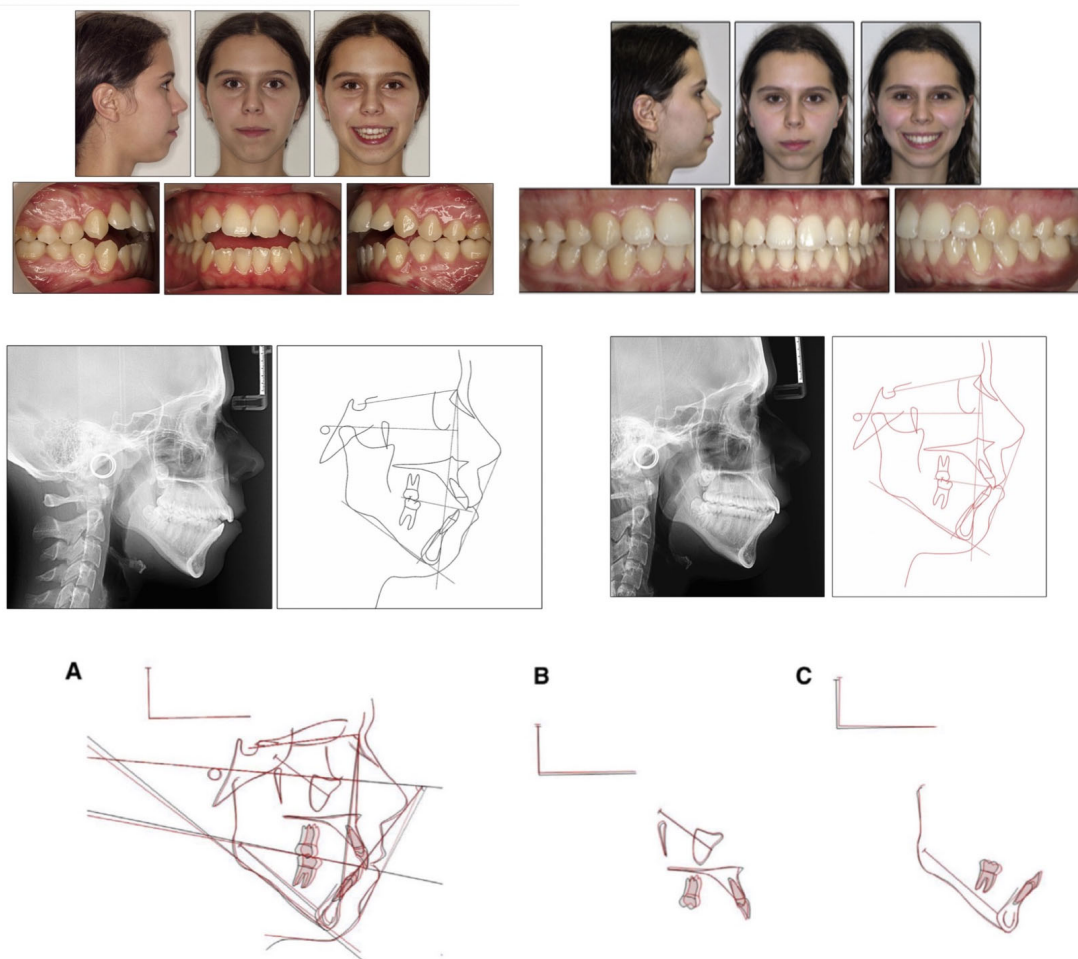


Figure 73 : Traitement de correction d'une bécance d'origine squelettique (Hyperdivergence mixte par excès vertical antérieur et insuffisance postérieure) associé à une rétrogénie mandibulaire par combinaison d'aligneurs et d'ancrages osseux. L'auteur présente les documents de début (à gauche) et de fin (à droite) de traitement, associés aux superpositions générales (A) locales maxillaires (B) et mandibulaires (C) (169).

Cependant, même si la littérature décrit des traitements efficaces de bécances « d'apparences chirurgicales » en combinant aligneurs et ancrages osseux, il est complexe de déterminer précisément la limite entre ce qui peut être compensé orthodontiquement par « camouflé », et ce qui ne peut pas l'être (84). Il convient d'établir **des valeurs de l'amplitude des mouvements pouvant être obtenus** afin d'atteindre nos objectifs, et de s'assurer **de la stabilité à moyen/long terme** de ce type de traitement :

- Le niveau de preuve scientifique sur ce sujet récent est encore pauvre et ne nous permet pas d'établir des valeurs « références ». Les études actuelles ayant évalué le traitement des béances par **des aligneurs seuls** rapportent des valeurs d'ingression molaire pure d'environ 0.36 ± 0.58 mm, participant à des réductions de béances de 2 à 3 mm. Concernant les valeurs squelettiques, les études de cas rapportent des diminutions minimales du FMA de 2 à 3° (84). Dans les cas cliniques ayant **utilisé les ancrages osseux** en association aux aligneurs, il est décrit des ingressions postérieures allant jusqu'à 1 à 1,5 mm, participant à une réduction de béances d'au maximum 4,5 mm. Niveau squelettique, il est rapporté des diminutions du FMA jusqu'à 6° (169,180). Des études plus poussées devront être réalisées afin que l'orthodontiste puisse orienter plus sereinement son choix thérapeutique ;
- **La stabilité du traitement** à moyen/long terme est un indice souvent évoqué lorsqu'il s'agit de critiquer la réalisation d'un traitement de « compromis » thérapeutique. Actuellement, les études ayant travaillé sur la stabilité des résolutions des béances rapportent une haute stabilité (de 85 à 90%) sur le maintien du recouvrement après 2 à 3 ans de fin de traitement (75,78). Toutefois, ces études se concentrent sur tous les dispositifs orthodontiques (fixes ou amovibles) et concernent bien souvent des béances de relativement faibles amplitudes (allant jusqu'à 2,5 mm), avec des étiologies dentoalvéolaires. Il serait intéressant d'évaluer cette stabilité sur les traitements par aligneurs et ancrages osseux pour des béances d'origine squelettiques, qui nécessitent le plus d'ingression molaire. En effet, certains auteurs suggèrent que l'effet « bite-block » provoqué par les aligneurs serait éphémère, et qu'une fois l'épaisseur de plastique intercalée déposée, la position verticale des molaires reviendraient à l'état antérieur (198).

La possibilité d'augmenter l'amplitude de nos mouvements dentoalvéolaires, pouvant occasionner de légères modifications tant au niveau squelettique (autorotation mandibulaire, légère diminution de la divergence faciale) qu'au niveau fonctionnel (faciliter la coaptation labiale au repos), ne devrait pas nous détourner du diagnostic initial d'ordre squelettique et de ses implications en termes d'objectifs de traitement. En effet, le traitement ortho-chirurgical constitue le seul moyen permettant de répondre pleinement à ces objectifs. Les traitements de compromis, tel que celui présenté (169), comportent des incertitudes quant à la stabilité des résultats obtenus. Des études à plus long terme auront pour rôle de confirmer ou d'infirmier ces hypothèses.

Techniquement, différents systèmes d'association entre les ancrages osseux et les aligneurs peuvent être mis en place. Les possibilités et leurs indications selon les situations cliniques sont résumées dans le tableau suivant :



TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS	CRITÈRES CLINIQUES
ANCRAGE DIRECT	MAXILLAIRE	MINI-VIS INFRA-ZYGOMATIQUES (2 -10/12mm) OU INTER -RADCULAIRE (1.2/1.5-8mm) ET PALATINES (1.2/1.5-8mm)	CONFIGURATION "CLASSIQUE" EN HAMAC (INFR-ZYGOMATIQUE VIS PALATINE ENTRE 5-6) 	<ul style="list-style-type: none"> • Position vis palatine : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Si plus en mésial provoquera ingression prémolaire ◦ Plus simple, moins risquée, et stable ➔ A privilégier pour la majorité des cas
	MANDIBULAIRE	MINI-VIS PLATEAU VESTIBULAIRE OU "BUCCAL SHELF" (2 -10/12mm)		<ul style="list-style-type: none"> • Intérêts position vis mandibulaire : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Atténue rotation horaire du plan occlusal ◦ Ne modifie pas ou très peu l'exposition des incisives supérieures au sourire ◦ Provoque une augmentation du surplomb en rétractant légèrement l'arcade inférieure

Tableau 6 : Ingression postérieure par aligneurs et mini-vis : variantes selon les situations cliniques.

3.2.3.4 Égression postérieure (nivellement de la courbe de Spee)

L'égression postérieure peut être recherchée afin de réaliser la correction d'une supraclusion chez un patient hypodivergent. C'est ce mouvement qui sera souhaité pour le niveler la courbe de Spee. Or nous avons vu que le mouvement d'égression est très peu prédictible en aligneurs, l'effet « bite-block » potentialisant la tendance à l'ingression molaire.

Il est complexe d'établir dans quelles proportions les mouvements se réalisent lors d'un nivellement de la courbe de Spee par aligneurs. Si l'égression postérieure souhaite être maximisée, l'ajout d'ancrages osseux sera fondamental. Dans ce cas de préparation chirurgicale de classe II, les incisives mandibulaires sont ingressées par des ancres inter radiculaires entre la canine et la 1^{ère} prémolaire, disposés symétriquement. Dans le même temps, le mouvement synergique à celui d'ingression antérieure (égression postérieure) est potentialisé à partir d'un élastique vertical, à tendance classe III, qui vient s'ancrer sur une vis entre la 1^{ère} et 2^{nde} molaire (**Figure 74**).



Figure 74 : Système de forces permettant de maximiser l'égression postérieure mandibulaire lors d'un nivellement de la courbe de Spee. (Courtoisie Dr Bouhnik)

3.2.4 Canines incluses

Une dent est définie comme incluse dès lors qu'elle est retenue dans les maxillaires après sa date physiologique d'éruption et que son sac péri-coronaire n'est pas en contact avec le milieu péribuccal. Parmi elles, la canine maxillaire est la dent incluse la plus courante (1-3%). Dans le passé, le traitement le plus courant des canines incluses était l'extraction, mais la perte d'une canine peut avoir un impact important sur l'esthétique, l'occlusion et l'articulation temporo-mandibulaire du patient. Avec les progrès de l'orthodontie, la mise en place sur l'arcade par traction orthodontique s'est généralisée (28).

Cependant, le traitement des canines incluses avec des aligneurs représente un défi et nécessite impérativement l'utilisation d'auxiliaires pour assurer un ancrage stable et sécurisé, ainsi que pour positionner la canine sur l'arcade de manière adéquate. Solliciter l'ancrage dentaire est risqué : une ankylose pourrait provoquer des effets parasites majeurs sur le plan d'occlusion. De plus, une étude comparant l'utilisation d'aligneurs à celle de moyens fixes pour désinclure une canine indique que les dents d'ancrages subissaient des effets parasites plus importants dans le premier cas (bien que ceux-ci se produisent également en techniques fixes)(212)(**Figure 75**). Enfin, une fois en place sur l'arcade, les ajustements de sa position, en particulier les redressements radiculaires, peuvent nécessiter de nombreuses séries de finitions.

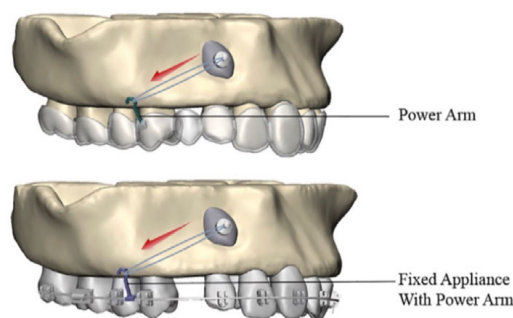


Figure 75 : Modèles à partir d'éléments finis visant à étudier la désincluse d'une canine par traction sur l'aligneur (En haut) ou un dispositif multi-attaches (En bas) (212).

Dans ce contexte, les auteurs ont exploré diverses solutions à partir d'auxiliaires visant à faciliter la réalisation de cet objectif :

- L'utilisation de **sectionnels** apparaît comme une option intéressante en créant une unité d'ancrage de meilleure qualité pour effectuer la traction. Cependant, elle présente plusieurs limites, telles que le souhait des patients (adultes majoritairement) de limiter la visibilité de leur traitement, la faiblesse de l'ancrage reposant uniquement sur quelques éléments dentaires, et parfois le risque de prendre en charge les dents adjacentes sous peine d'augmenter le risque de résorption radiculaire ;

- L'application d'une **combinaison d'élastiques et de boutons** associés aux aligneurs (140) a été décrite dans la littérature. Toutefois, cette méthode présente certains défauts :
 - Premièrement, elle exige un niveau de coopération plus élevé de la part du patient ;
 - Ensuite, elle ne pourra créer qu'un vecteur d'éruption exclusivement vertical, alors que dans certains cas, une force de direction distale et horizontale peut s'avérer indispensable, notamment afin d'éviter les interférences radiculaires entre les incisives centrales et latérales.

- Pour surmonter ces limitations et appliquer une approche biomécanique optimale, **les ancrages osseux** peuvent être combinés avec les aligneurs (72) :
 - Ils offrent un ancrage quasi absolu, limitant les effets parasites sur les dents porteuses des forces ;
 - De plus, une insertion palatine permettra d'établir un vecteur horizontal et distal avant que la force d'égression ne soit appliquée.

La séquence idéale pour la mise en place d'une canine ectopique par l'association d'ancrages osseux et d'aligneurs nécessite différentes étapes :

- Si nécessaire, **création d'un espace** sur l'arcade pour les canines permanentes avec une phase préliminaire d'alignement ;
- **Intervention chirurgicale** comprenant l'exposition de la canine, le collage du bouton et l'insertion de l'ancrage osseux ;
- **La traction** pour la désinclure, réalisée à l'aide d'un système biomécanique optimal reposant si nécessaire sur la combinaison d'ancrages osseux (mini-vis ou micro-vis) pour un vecteur de force horizontal et distal, ainsi que des tractions élastiques pour la composante verticale égressive ;
- **Finitions** avec les aligneurs ou des sectionnels fixés dans les cas les plus complexes de redressement radiculaire.

Les différents moyens pouvant être mis en place selon la position de la canine ont été résumés dans le tableau suivant :

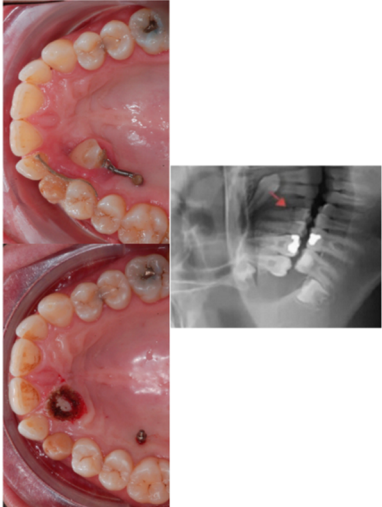
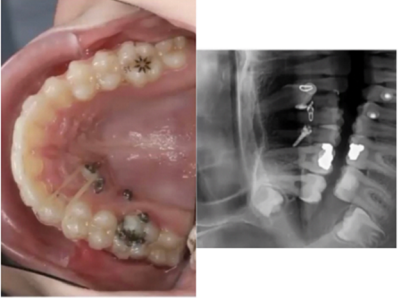

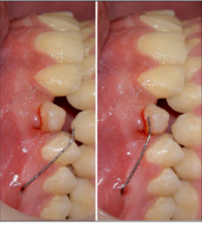
TYPE	ARCADE	MOYEN D'ANCRAGE	ILLUSTRATIONS		RÔLES
ANCRAGE MAXILLAIRE DIRECT		MINI-VIS PALATINE (1,2/1,5-8mm)	<p data-bbox="440 1227 464 1400">Vecteur distal</p> 	<p data-bbox="440 734 464 929">Vecteur égressif</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Moyen utilisé selon la direction souhaitée : <ul style="list-style-type: none"> ◦ Traction distale par la couronne à l'aide de la mini-vis : mise en place d'un axe favorable ; ◦ Traction verticale à partir d'un élastique fixé en vestibulaire à des découpes dans la gouttière.
					<ul style="list-style-type: none"> • Traction distale et/ou verticale à l'aide du même dispositif

Tableau 8 : Utilisation des mini-vis afin de faciliter la désinclusion d'une canine lors d'un traitement par aligneurs : illustrations et rôles.

CONCLUSION

Les ancrages osseux sont venus révolutionner les problématiques d'ancrage en orthodontie. Depuis cette émergence, les moyens utilisables se sont diversifiés (mini-plaques, micro-vis, dispositif abalakov...). Leur mise en place permet également de dépasser les limites du traitement orthodontique conventionnel. Leur combinaison avec les dispositifs orthodontiques conventionnels (bagues vestibulaires ou linguales) est désormais bien décrite dans la littérature. Toutefois, leur utilisation avec les aligneurs, qui représentent désormais l'un des moyens de traitement essentiel de l'orthodontie, est peu répertoriée. Dans cette revue de littérature, nous avons mis en exergue les limites biomécaniques des aligneurs. Celles-ci sont intimement liées au choix du matériau pour leur fabrication. Les avancées dans la chimie des matériaux offrent un potentiel important. Sans cela, les contraintes biomécaniques limiteront son efficacité, en particulier face aux appareils orthodontiques fixés. Des innovations telles que les polymères à mémoire de forme et les aligneurs transparents imprimés en 3D seront cruciales.

En attendant ces évolutions, l'utilisation des auxiliaires à disposition doit être judicieuse afin de maximiser la prédictibilité de nos traitements. Les ancrages osseux font partis de l'arsenal thérapeutique du praticien pour élaborer son plan de traitement. Ils représentent des atouts importants dans un certain nombres d'indications :

- Dans la dimension transversale, les disjoncteurs à appuis osseux s'associent parfaitement aux aligneurs et peuvent s'utiliser conjointement ;
- Dans la dimension antéro-postérieure, ils offrent un ancrage stable et permettent principalement de dépasser les limites d'amplitude d'une simple distalisation par aligneurs ;
- Dans la dimension verticale, ils permettent de potentialiser l'ingression des incisives supérieures (sourires gingivaux), inférieures (courbe de Spee importante), ou des molaires en intensifiant l'effet « bite-block » des aligneurs (provoquant une légère autorotation mandibulaire) ;
- Enfin, dans certains cas particuliers telles que les canines incluses, ils simplifient la réalisation des plans de traitements.

Cependant, de plus amples recherches sont indispensables pour affiner les protocoles liés à ces associations. Il est impératif d'établir des valeurs références claires à l'attention des orthodontistes afin de les indiquer à bon escient. Cette considération est d'autant plus importante pour nos jeunes patients, pour qui ces ancrages sont plus difficiles à faire accepter. À plus long terme, l'espoir réside dans les progrès à venir des biomatériaux des aligneurs et de leurs méthodes de fabrication. Ces avancées permettront de restreindre les indications à des cas exceptionnellement complexes, offrant ainsi une orthodontie à la fois plus efficace, moins invasive, plus esthétique et confortable pour nos patients.

TABLE DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX

Figure 1 : 3 ^{ème} loi de Newton (47).....	2
Figure 2 : Ancrage et moyens d'ancrage (93).....	3
Figure 3 : Préparation d'ancrage à la mandibule (47).....	3
Figure 4 : Positionnement des centres de résistances (CR) des dents antérieures et postérieures (En orange), et des arcades (En rouge) (58).	6
Figure 5 : Traction directe exercée entre la mini-vis et la canine (Courtoisie du Dr Bouhnik)..	7
Figure 6 : Distalisation d'arcade sur mini-vis à l'aide de power arms collés (Courtoisie du Dr Bouhnik).	8
Figure 7 : Renfort d'ancrage des premières molaires maxillaires par un arc transpalatin directement relié à une mini-vis palatine. Visualisation numérique pré-impression d'un appareil individualisé (Courtoisie du Dr Bouhnik).	8
Figure 8 : Les différentes parties d'une mini-vis orthodontique (58).	10
Figure 9 : Différents sites d'insertion des mini-vis : inter-radicaux (Bleu), infra-zygomatique (Rouge), ligne oblique externe (Violet), zone palatine (Vert) (145).	11
Figure 10 : Reconstruction 3D de la quantité osseuse de la zone infra-zygomatique. A. Sujet hyperdivergent, B. Sujet normodivergent, C. Sujet hypodivergent (89).	12
Figure 11 : Taux d'échec des mini-vis corrélé au site d'insertion (149).	13
Figure 12 : Spécificités de l'émergence des mini-plaques orthodontiques (170).	15
Figure 13 : Deux types de mini-plaques, en T et en I (170).	15
Figure 14 : Dessin d'une micro-vis (39).	17
Figure 15 : La micro-vis est enfouie, la connectique émerge au fond du vestibule (39).....	17
Figure 16 : Différents sites d'implantation des micro-vis (39).	17
Figure 17 : Situation finale de l'ancrage glacier, vue de face (46).	18
Figure 18 : Vitali Abalakov (1906 -1986) (46).....	18
Figure 19 : Illustration d'un dispositif Abalakov (46).	19
Figure 20 : Rotation anti-horaire du plan d'occlusion due à une position trop haute du dispositif Abalakov (Courtoisie du Dr Barthelemi).	19
Figure 21 : Flux de travail de fabrication d'aligneurs transparents par la procédure du thermoformage (21).....	22
Figure 22 : Procédure de fabrication des aligneurs par impression 3D directe (21).	23
Figure 23 : Courbe charge/flexion. CM : charge maximale ; FM : force maximale (Courtoisie du Dr Vieillard).....	26
Figure 24 : Module d'élasticité des différents matériaux utilisés pour les arcs orthodontiques en comparaison à ceux des aligneurs. SS = Stainless Steel. B-Ti = Beta Titanium. M-NiTi= Martensitic Nickel Titane. A-Niti= Austenitic Nickel Titane. Gpa =Gigapascal (206).	27
Figure 25 : Faible niveau de résilience des aligneurs en comparaison aux arcs orthodontiques. SS = Stainless Steel. Beta-Ti = Beta Titanium. NiTi= Martensitic Nickel Titane (206).	28
Figure 26 : Phénomène de relaxation des contraintes des aligneurs, en comparaison à un arc NiTi. Plus de 90% de la force est perdue dans les premières heures (206).....	28
Figure 27 : Calcul de la contrainte exercée selon la surface d'application de la force (Surface de la dent ou taquet) (206).	34
Figure 28 : Les taquets disposent d'un rôle de rétention essentiel, notamment en cas de port d'une mécanique inter-arcades favorisant la désinsertion de la gouttière (Courtoisie du Dr Vieillard).	35

Figure 29 : Modèle virtuel conçu selon la méthode des éléments finis (MEF) (144).	36
Figure 30 : L'importance du taquet dans le contrôle des rotations : limiter l'effet de glissement et ajouter un vecteur de force à distance du Cres (Courtoisie du Dr Vieillard).	36
Figure 31 : Effet parasite d'ingression sur 45 due à une inadaptation de l'aligneur (Courtoisie du Dr Godenèche).	37
Figure 32 : 3 configurations de déplacements dentaires : pire scénario : (a) sans taquet et 1,2°/aligneur meilleurs scénarios : (b) taquet 45 et 1,2°/aligneur et (c) taquets sur 4-5-6 et 1,2°/aligneur (44).	37
Figure 33 : Prise optimale de la couronne de 14 par liberté de sa face mésiale, facilitant le mouvement de dérotation (Courtoisie du Dr Godenèche).	38
Figure 34 : Les taquets permettent de créer un couple de forces à l'origine d'un moment indispensable au contrôle radiculaire (206).	39
Figure 35 : Le redressement radiculaire d'une molaire est un mouvement complexe nécessitant un couple de forces (Courtoisie du Dr Vieillard).	39
Figure 36 : L'utilisation de « power arms » peut permettre de rapprocher les lignes d'actions des forces du centre de résistance des dents à déplacer afin de favoriser une translation (74).	39
Figure 37 : Le « power ridge » vise à créer un moment de couple contrebalançant le moment horaire provoqué par la force distalante passant à distance du Cres (206).	40
Figure 38 : La distance entre les points d'application étant plus importante dans les techniques par aligneurs, la force nécessaire pour l'obtention d'un même moment sera inférieure (Courtoisie du Dr Vieillard).	40
Figure 39 : Un angle de distorsion entre la surface de l'aligneur et de la dent est généré par le power ridge (35).	41
Figure 40 : Adaptation du séquençage des mouvements pour augmenter la prédictibilité des aligneurs (Courtoisie du Dr Peydro).	42
Figure 41 : Le placement d'un taquet vestibulaire permettra de limiter l'effet de désinsertion de la gouttière lors du mouvement d'expansion (Courtoisie du Dr Vieillard).	42
Figure 42 : La mise en place d'un torque radiculo-vestibulaire compensatoire durant l'expansion permettrait de limiter la version corono-vestibulaire (214).	43
Figure 43 : l'effet ingressif créé par les aligneurs peut être rééquilibré par des zones de pression visant à rediriger le vecteur de force par le Cres des dents cibles (206).	43
Figure 44 : Les rampes d'occlusion permettent de potentialiser l'égression postérieure et l'ingression antérieure (206).	44
Figure 45 : L'effet « pont levis » est la méthode la plus prédictible de correction d'une supraclusion (206).	44
Figure 46 : L'ingression des dents postérieures peut causer une légère rotation anti-horaire de la mandibule favorisant la fermeture des béances (206).	45
Figure 47 : La convergence des faces palatine et vestibulaire oblige à la présence d'un taquet pour la réalisation du mouvement d'égression (77).	46
Figure 48 : Le delta entre la longueur d'arcade et celle de l'arc droit peut conduire à des réactions parasites de disto-version postérieure ou de vestibulo-version antérieure (22).	46
Figure 49 : Prédictibilité des mouvements dentaires par aligneurs selon une revue de la littérature (206).	47
Figure 50 : Orthodontiste éco-responsable proposant une solution de recyclage (Via SmilersCARES) des aligneurs à ses patients (Image personnelle).	52

Figure 51 : La loi d'équilibre se retrouve lors des mouvements orthodontiques dans les 3 dimensions : antéro-postérieure, transversale et verticale (Image personnelle).	54
Figure 52 : Différents designs d'aligneurs selon l'épaisseur, la forme et la hauteur de la marge (137).	54
Figure 53 : Configurations avec bouton collé (En haut) et avec crochet (En bas) (111).	56
Figure 54 : Différents types d'attaches possibles (Courtoisie du Dr Bouhnik).	56
Figure 55 : Différents moyens de traction utilisables (Courtoisie du Dr Bouhnik).	57
Figure 56 : MARPE (Mini-screw Assisted Rapid Palatal Expansion) (120).	58
Figure 57 : Positionnement virtuel des mini-vis par CBCT pour pose d'un disjoncteur à appuis uniquement osseux (132).	59
Figure 58 : Mise en place de la gouttière par-dessus le disjoncteur conventionnel à appui dentaire (Courtoisie du Dr Bouhnik).	59
Figure 60 : Différentes possibilités d'orientation de la force distalante (111).	61
Figure 59 : Implications biomécaniques lors d'une distalisation maxillaire selon l'utilisation de TIA (à gauche) ou de mini-vis en ancrage direct (à droite). Les TIA entraînent plus de rotation horaire du maxillaire et de mésialisation de l'arcade mandibulaire (Courtoisie du Dr Ilharreguy).	61
Figure 61 : Mouvements réactionnels sur l'incisive mandibulaire lors d'une distalisation par aligneurs (Image personnelle).	63
Figure 62 : Prédicibilité des déplacements coronaires et radiculaires (En noir), et déplacement distal coronaire total réalisé (En bleu), lors d'une distalisation des 1 ^{ère} et 2 ^{nde} molaires par aligneurs (Image personnelle).	64
Figure 63 : Effet "bowing" lors du traitement par aligneurs (Image personnelle).	66
Figure 64 : Groupe A (Contrôle), B (Ancrage fort direct) et C (Ancrage fort indirect) (218). .	67
Figure 65 : Système biomécanique mis en place à l'aide de mini-vis infra-zygomatiques et antérieures inter-radiculaires vestibulaires. Les mini-vis postérieures infra-zygomatiques provoquent une force distalante et ingressive (Flèche jaune), qui se traduit par une rotation horaire au niveau du Cres de l'arcade maxillaire (Croix rouge). Les mini-vis antérieures permettent d'appliquer une force verticale ingressive (Flèche verte) associée à un moment anti-horaire ayant tendance à vestibulo-verser les incisives. La force résultant de ce système est distalante et ingressive (Flèche bleue) (128).	68
Figure 66 : Effets parasites lors de la mésialisation de 47 (Courtoisie du Dr Godenèche).	70
Figure 67 : Système mécanique comportant la force et son moment délivrée par l'aligneur (en rouge) et celle par le bras de levier collé à la dent (En orange) (136).	70
Figure 68 : Efficacité de l'ingression des incisives mandibulaires par aligneurs (107).	72
Figure 69 : La version de l'incisive mandibulaire est un facteur complexifiant la correction de la supraclusion : son redressement entrainera une égression relative, et la force ingressive peut provoquer des effets parodontaux indésirables (Courtoisie du Dr Bouhnik).	73
Figure 70 : Résorptions sur les incisives maxillaires contre-indiquant l'application de forces ingressives (Courtoisie du Dr Bouhnik).	73
Figure 71 : Efficacité de l'ingression des incisives latérales maxillaire par aligneurs (107).	76
Figure 72 : Les élastiques sont attachés des mini-vis antérieures vestibulaires aux découpes de l'aligneur (Sur les surfaces palatines de 11 et 21) (126).	77
Figure 73 : Traitement de correction d'une béance d'origine squelettique (Hyperdivergence mixte par excès vertical antérieur et insuffisance postérieure) associé à une rétrogénie mandibulaire par combinaison d'aligneurs et d'ancrages osseux. L'auteur présente les	

documents de début (à gauche) et de fin (à droite) de traitement, associés aux surperpositions générales (A) locales maxillaires (B) et mandibulaires (C) (169).....	80
Figure 74 : Système de forces permettant de maximiser l'égression postérieure mandibulaire lors d'un nivellement de la courbe de Spee. (Courtoisie Dr Bouhnik).....	83
Figure 75 : Modèles à partir d'éléments finis visant à étudier la désinclusion d'une canine par traction sur l'aligneur (En haut) ou un dispositif multi-attaches (En bas) (212).....	84

Tableau 1 : Distalisation maxillaire par aligneurs et ancrages osseux : implications biomécaniques et cliniques selon les configurations.....	65
Tableau 2 : Distalisation mandibulaire par aligneurs et ancrages osseux : implications biomécaniques et cliniques selon différentes configurations	65
Tableau 3 : Utilisation de mini-vis dans des cas d'extractions de prémolaires par aligneurs : implications biomécaniques et cliniques	69
Tableau 4 Redressement et mésialisation molaire par aligneurs avec ancrages osseux : différentes implications cliniques selon la configuration mise en place	71
Tableau 5 : Ingression des incisives mandibulaires par aligneurs avec l'aide d'ancrages osseux : moyens d'associations et critères cliniques guidant la mise en place.....	75
Tableau 6 : Ingression des incisives maxillaires par aligneurs : différentes configurations, moyens d'attaches et critères cliniques.....	78
Tableau 7 : Ingression postérieure par aligneurs et mini-vis : variantes selon les situations cliniques.....	82
Tableau 8 : Utilisation des mini-vis afin de faciliter la désinclusion d'une canine lors d'un traitement par aligneurs.	86

BIBLIOGRAPHIE

1. Abdallah MN, Lou T, Retrouvey JM, Suri S. Biomaterials used in orthodontics: brackets, archwires, and clear aligners. In: *Advanced Dental Biomaterials* [Internet]. Elsevier; 2019 [cité 19 août 2023]. p. 541-79. Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081024768000207>
2. Al-Balaa M, Li H, Ma Mohamed A, Xia L, Liu W, Chen Y, et al. Predicted and actual outcome of anterior intrusion with Invisalign® assessed with cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. mars 2021;159(3):e275-80.
3. Alkadhimi A, Al-Awadhi EA. Miniscrews for orthodontic anchorage: a review of available systems. *J Orthod*. 3 avr 2018;45(2):102-14.
4. Allareddy V, Nalliah R, Lee MK, Rampa S, Allareddy V. Adverse clinical events reported during Invisalign® treatment: Analysis of the MAUDE database. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. nov 2017;152(5):706-10.
5. Alshammery D, Alqhtani N, Alajmi A, Dagriri L, Alrukban N, Alshahrani R, et al. Non-surgical correction of gummy smile using temporary skeletal mini-screw anchorage devices: A systematic review. *J Clin Exp Dent*. 2021;e717-23.
6. Antoszewska J, Raftowicz-Wójcik K, Kawala B, Matthews-Brzozowska T. Biological factors involved in implant-anchored orthodontics and in prosthetic-implant therapy: a literature review. *Arch Immunol Ther Exp (Warsz)*. oct 2010;58(5):379-83.
7. Armbruster PC, Block MS. Onplant-supported orthodontic anchorage. *Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am*. mars 2001;9(1):53-74.
8. Auladell A, De La Iglesia F, Quevedo O, Walter A, Puigdollers A. The efficiency of molar distalization using clear aligners and mini-implants: Two clinical cases. *Int Orthod*. mars 2022;20(1):100604.
9. Bahammam M, El-Bialy T. Comparison of alveolar bone thickness and height after slow expansion using quad-helix or clear aligners. *Saudi Dent J*. mars 2023;35(3):255-62.
10. Baldwin DK, King G, Ramsay DS, Huang G, Bollen AM. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 3: premolar extraction patients. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. juin 2008;133(6):837-45.
11. Bardideh E, Tamizi G, Shafae H, Rangrazi A, Ghorbani M, Kerayechian N. The Effects of Intrusion of Anterior Teeth by Skeletal Anchorage in Deep Bite Patients; A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biomim Basel Switz*. 2 mars 2023;8(1):101.

12. Barone S, Paoli A, Razionale AV, Savignano R. Computational design and engineering of polymeric orthodontic aligners. *Int J Numer Methods Biomed Eng.* août 2017;33(8):e2839.
13. Basavaraj SP. *History of Orthodontics.* Jp Medical LTD. 2013. 213 p.
14. Bayome M, Park JH, Bay C, Kook YA. Distalization of maxillary molars using temporary skeletal anchorage devices: A systematic review and meta-analysis. *Orthod Craniofac Res.* mars 2021;24 Suppl 1:103-12.
15. Berger J, Waram T. Force levels of nickel titanium initial archwires. *J Clin Orthod JCO.* mai 2007;41(5):286-92.
16. Bi WG, Li K. Effectiveness of miniscrew-assisted rapid maxillary expansion: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig.* juin 2022;26(6):4509-23.
17. Bichu YM, Alwafi A, Liu X, Andrews J, Ludwig B, Bichu AY, et al. Advances in orthodontic clear aligner materials. *Bioact Mater.* avr 2023;22:384-403.
18. Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 1: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* nov 2003;124(5):496-501.
19. Boyd R, Ross J M. The Invisalign® System in Adult Orthodontics: Mild Crowding and Space Closure Cases. *J Clin Orthod.* 2000;
20. Bucci R, Rongo R, Levatè C, Michelotti A, Barone S, Razionale AV, et al. Thickness of orthodontic clear aligners after thermoforming and after 10 days of intraoral exposure: a prospective clinical study. *Prog Orthod.* 9 sept 2019;20(1):36.
21. Burcu B, Hera KB, Anthony P. Embracing novel technologies in dentistry and orthodontics. Vol. *Craniofacial Growth Series.* Department of Orthodontics and Pediatric Dentistry School of Dentistry The University of Michigan;
22. Burstone CJ. Physics and clinical orthodontics: 100 years ago and today. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* mars 2015;147(3):293-4.
23. Buschang PH, Shaw SG, Ross M, Crosby D, Campbell PM. Comparative time efficiency of aligner therapy and conventional edgewise braces. *Angle Orthod.* 18 nov 2013;
24. Cantarella D, Savio G, Grigolato L, Zanata P, Berveglieri C, Lo Giudice A, et al. A New Methodology for the Digital Planning of Micro-Implant-Supported Maxillary Skeletal Expansion. *Med Devices Evid Res.* mars 2020;Volume 13:93-106.
25. Caruso S, Darvizeh A, Zema S, Gatto R, Nota A. Management of a Facilitated Aesthetic Orthodontic Treatment with Clear Aligners and Minimally Invasive Corticotomy. *Dent J.* 15 févr 2020;8(1):19.

26. Caruso S, Nota A, Ehsani S, Maddalone E, Ojima K, Tecco S. Impact of molar teeth distalization with clear aligners on occlusal vertical dimension: a retrospective study. *BMC Oral Health*. 13 août 2019;19(1):182.
27. Cattaneo PM, Dalstra M, Melsen B. Moment-to-force ratio, center of rotation, and force level: a finite element study predicting their interdependency for simulated orthodontic loading regimens. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. mai 2008;133(5):681-9.
28. Cavuoti S, Matarese G, Isola G, Abdolreza J, Femiano F, Perillo L. Combined orthodontic-surgical management of a transmigrated mandibular canine. *Angle Orthod*. juill 2016;86(4):681-91.
29. Cervinara F, Cianci C, De Cillis F, Pappalettera G, Pappalettere C, Siciliani G, et al. Experimental Study of the Pressures and Points of Application of the Forces Exerted between Aligner and Tooth. *Nanomater Basel Switz*. 12 juill 2019;9(7):1010.
30. Chang JY, McNamara JA, Herberger TA. A longitudinal study of skeletal side effects induced by rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. sept 1997;112(3):330-7.
31. Charalampakis O, Iliadi A, Ueno H, Oliver DR, Kim KB. Accuracy of clear aligners: A retrospective study of patients who needed refinement. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. juill 2018;154(1):47-54.
32. Chen YJ, Chang HH, Huang CY, Hung HC, Lai EHH, Yao CCJ. A retrospective analysis of the failure rate of three different orthodontic skeletal anchorage systems. *Clin Oral Implants Res*. déc 2007;18(6):768-75.
33. Chen YJ, Chang HH, Huang CY, Hung HC, Lai EHH, Yao CCJ. A retrospective analysis of the failure rate of three different orthodontic skeletal anchorage systems. *Clin Oral Implants Res*. déc 2007;18(6):768-75.
34. Chen YJ, Chang HH, Lin HY, Lai EHH, Hung HC, Yao CCJ. Stability of miniplates and miniscrews used for orthodontic anchorage: experience with 492 temporary anchorage devices. *Clin Oral Implants Res*. nov 2008;19(11):1188-96.
35. Cheng Y, Gao J, Fang S, Wang W, Ma Y, Jin Z. Torque movement of the upper anterior teeth using a clear aligner in cases of extraction: a finite element study. *Prog Orthod*. déc 2022;23(1):26.
36. Cheng Y, Liu X, Chen X, Li X, Fang S, Wang W, et al. The three-dimensional displacement tendency of teeth depending on incisor torque compensation with clear aligners of different thicknesses in cases of extraction: a finite element study. *BMC Oral Health*. 16 nov 2022;22(1):499.
37. Chillès D. L'Orthodontie autrement : du torque sans torque. *Orthod Fr*. sept 2013;84(3):271-6.

38. Chillès D, Chillès JG, Riemenschneider-Chillès S, Doustkam AA. [Embedded micro-screws, the universal bone anchorage]. *Orthod Francaise*. déc 2016;87(4):443-55.
39. Chillès JG, Riemenschneider-Chillès S. Utilisation des mini-vis corticales courtes en orthodontie. *Orthod Fr*. sept 2011;82(3):253-68.
40. Chisari JR, McGorray SP, Nair M, Wheeler TT. Variables affecting orthodontic tooth movement with clear aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. avr 2014;145(4 Suppl):S82-91.
41. Chung KR, Kim YS, Linton JL, Lee YJ. The miniplate with tube for skeletal anchorage. *J Clin Orthod JCO*. juill 2002;36(7):407-12.
42. Condò R, Mampieri G, Giancotti A, Cerroni L, Pasquantonio G, Divizia A, et al. SEM characterization and ageing analysis on two generation of invisible aligners. *BMC Oral Health*. 23 juin 2021;21(1):316.
43. Cornelis MA, Scheffler NR, Nyssen-Behets C, De Clerck HJ, Tulloch JFC. Patients' and orthodontists' perceptions of miniplates used for temporary skeletal anchorage: a prospective study. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. janv 2008;133(1):18-24.
44. Cortona A, Rossini G, Parrini S, Deregibus A, Castroflorio T. Clear aligner orthodontic therapy of rotated mandibular round-shaped teeth: A finite element study. *Angle Orthod*. mars 2020;90(2):247-54.
45. Creekmore TD, Eklund MK. The possibility of skeletal anchorage. *J Clin Orthod JCO*. avr 1983;17(4):266-9.
46. Cresseaux P, Bernard-Granger C, Filippi R. Quand l'alpinisme vient révolutionner l'ancrage orthodontique. *L'orthodontiste*. 2017;
47. Dahan S, Salvadori A. Biomécanique en O.D.F : applications pratiques [Thèse]. Aix Marseille; 2007.
48. Dalaie K, Fatemi SM, Ghaffari S. Dynamic mechanical and thermal properties of clear aligners after thermoforming and aging. *Prog Orthod*. 28 juin 2021;22(1):15.
49. D'Antò V, Valletta R, Di Mauro L, Riccitiello F, Kirlis R, Rongo R. The Predictability of Transverse Changes in Patients Treated with Clear Aligners. *Materials*. 25 févr 2023;16(5):1910.
50. De Clerck EEB, Swennen GRJ. Success rate of miniplate anchorage for bone anchored maxillary protraction. *Angle Orthod*. nov 2011;81(6):1010-3.
51. De Clerck HJ, Cornelis MA, Cevidanes LH, Heymann GC, Tulloch CJF. Orthopedic traction of the maxilla with miniplates: a new perspective for treatment of midface deficiency. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg*. oct 2009;67(10):2123-9.

52. Doustkam A. Les micro-vis sous-muqueuses comme ancrage osseux temporaire en pratique orthodontique : étude longitudinale sur 16 ans. [Thèse de Doctorat en Médecine]. Faculté de Médecine de Strasbourg; 2016.
53. Dupaix RB, Boyce MC. Finite strain behavior of poly(ethylene terephthalate) (PET) and poly(ethylene terephthalate)-glycol (PETG). *Polymer*. juin 2005;46(13):4827-38.
54. Dym H, Pierre R. Diagnosis and Treatment Approaches to a « Gummy Smile ». *Dent Clin North Am*. avr 2020;64(2):341-9.
55. Edelmann A, English JD, Chen SJ, Kasper FK. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. nov 2020;158(5):e91-8.
56. Edelmann A, English JD, Chen SJ, Kasper FK. Analysis of the thickness of 3-dimensional-printed orthodontic aligners. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. nov 2020;158(5):e91-8.
57. Elkholy F, Panchaphongsaphak T, Kilic F, Schmidt F, Lapatki BG. Forces and moments delivered by PET-G aligners to an upper central incisor for labial and palatal translation. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopadie OrganOfficial J Dtsch Ges Kieferorthopadie*. nov 2015;76(6):460-75.
58. Ellouze S, Darqué F. Mini-Implants : the orthodontics of the future. *Quintessence international*.
59. Elshazly TM, Keilig L, Alkabani Y, Ghoneima A, Abuzayda M, Talaat S, et al. Primary Evaluation of Shape Recovery of Orthodontic Aligners Fabricated from Shape Memory Polymer (A Typodont Study). *Dent J*. 10 mars 2021;9(3):31.
60. Fontana M, Cozzani M, Caprioglio A. Non-compliance maxillary molar distalizing appliances: an overview of the last decade. *Prog Orthod*. sept 2012;13(2):173-84.
61. Frick A, Rochman A. Characterization of TPU-elastomers by thermal analysis (DSC). *Polym Test*. juin 2004;23(4):413-7.
62. Ganta GK, Cheruvu K, Ravi RK, Reddy RP. Clear aligners, the aesthetic solution: a review. *Int J Dent Mater*. 2021;03(03):90-5.
63. Ganzer N, Feldmann I, Bondemark L. Anchorage reinforcement with miniscrews and molar blocks in adolescents: A randomized controlled trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. déc 2018;154(6):758-67.
64. Garino F, Castroflorio T, Daher S, Ravera S, Rossini G, Cugliari G, et al. Effectiveness of Composite Attachments in Controlling Upper-Molar Movement with Aligners. *J Clin Orthod JCO*. juin 2016;50(6):341-7.
65. Garnett BS, Mahood K, Nguyen M, Al-Khateeb A, Liu S, Boyd R, et al. Cephalometric comparison of adult anterior open bite treatment using clear aligners and fixed appliances. *Angle Orthod*. janv 2019;89(1):3-9.

66. Giancotti A, Garino F, Mampieri G. Use of clear aligners in open bite cases: an unexpected treatment option. *J Orthod.* juin 2017;44(2):114-25.
67. Giancotti A, Germano F, Muzzi F, Greco M. A miniscrew-supported intrusion auxiliary for open-bite treatment with Invisalign®. *J Clin Orthod JCO.* juin 2014;48(6):348-58.
68. Giancotti A, Greco M, Mampieri G. Extraction treatment using Invisalign® Technique. *Prog Orthod.* 2006;7(1):32-43.
69. Gold BP, Siva S, Duraisamy S, Idaayath A, Kannan R. Properties of Orthodontic Clear Aligner Materials - A Review. *J Evol Med Dent Sci.* 13 sept 2021;10(37):3288-94.
70. González Del Castillo McGrath M, Araujo-Monsalvo VM, Murayama N, Martínez-Cruz M, Justus-Doczi R, Domínguez-Hernández VM, et al. Mandibular anterior intrusion using miniscrews for skeletal anchorage: A 3-dimensional finite element analysis. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* oct 2018;154(4):469-76.
71. Gracco A, Mazzoli A, Favoni O, Conti C, Ferraris P, Tosi G, et al. Short-term chemical and physical changes in Invisalign® appliances. *Aust Orthod J.* mai 2009;25(1):34-40.
72. Greco M, Machoy M. Impacted Canine Management Using Aligners Supported by Orthodontic Temporary Anchorage Devices. *Int J Environ Res Public Health.* 22 déc 2022;20(1):131.
73. Greco M, Rombolà A. Precision bite ramps and aligners: An elective choice for deep bite treatment. *J Orthod.* juin 2022;49(2):213-20.
74. Greco M, Rombolà A. Traitement de la classe II avec extraction par aligneurs : une approche fiable: *L'Orthodontie Fr.* 1 juin 2022;93(2):187-204.
75. Greenlee GM, Huang GJ, Chen SSH, Chen J, Koepsell T, Hujoel P. Stability of treatment for anterior open-bite malocclusion: a meta-analysis. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* févr 2011;139(2):154-69.
76. Griffith M, Fields HW, Ni A, Guo X, Lee DJ, Deguchi T. Comparison of 2 Invisalign® tray generations using the Peer Assessment Rating index. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* nov 2021;160(5):718-24.
77. Groody JT, Lindauer SJ, Kravitz ND, Carrico CK, Madurantakam P, Shroff B, et al. Effect of clear aligner attachment design on extrusion of maxillary lateral incisors: A multicenter, single-blind randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* août 2023;S0889540623004225.
78. Gu D, Leroux B, Finkleman S, Todoki L, Greenlee G, Allareddy V, et al. Anterior openbite malocclusion in adults: *Angle Orthod.* 1 janv 2022;92(1):27-35.
79. Guan X, Chang DT, Yan Y, Zhang YW, Zhou YH, Song Y. [Clinical efficacy of clear aligners in treating bimaxillary protrusion]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi Zhonghua Kouqiang Yixue Zazhi Chin J Stomatol.* 9 sept 2017;52(9):549-53.

80. Guarneri MP, Oliverio T, Silvestre I, Lombardo L, Siciliani G. Open bite treatment using clear aligners. *Angle Orthod.* sept 2013;83(5):913-9.
81. Hahn W, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Zapf A, Kubein-Meesenburg D, et al. Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* juill 2009;136(1):12.e1-7; discussion 12-13.
82. Hahn W, Zapf A, Dathe H, Fialka-Fricke J, Fricke-Zech S, Gruber R, et al. Torquing an upper central incisor with aligners--acting forces and biomechanical principles. *Eur J Orthod.* déc 2010;32(6):607-13.
83. Haouili N, Kravitz ND, Vaid NR, Ferguson DJ, Makki L. Has Invisalign® improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign®. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* sept 2020;158(3):420-5.
84. Harris K, Ojima K, Dan C, Upadhyay M, Alshehri A, Kuo CL, et al. Evaluation of open bite closure using clear aligners: a retrospective study. *Prog Orthod.* déc 2020;21(1):23.
85. Hartshorne J, Wertheimer MB. Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature. *AJO- Clin Companion.* août 2022;2(4):311-24.
86. Hartshorne J, Wertheimer MB. Emerging insights and new developments in clear aligner therapy: A review of the literature. *AJO- Clin Companion.* août 2022;2(4):311-24.
87. Hassan MH, Omar AM, Daskalakis E, Hou Y, Huang B, Strashnov I, et al. The Potential of Polyethylene Terephthalate Glycol as Biomaterial for Bone Tissue Engineering. *Polymers.* 18 déc 2020;12(12):3045.
88. Hemingway R, Williams RL, Hunt JA, Rudge SJ. The influence of bracket type on the force delivery of Ni-Ti archwires. *Eur J Orthod.* juin 2001;23(3):233-41.
89. Hussein B, Younes R, Baumgaertel S, El Wak T, El Osta N, Bassil-Nassif N, et al. Assessment of infrazygomatic crest dimensions in different vertical facial growth types for miniscrew insertion: A cone-beam computed tomography study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* déc 2022;162(6):917-26.
90. Iglesias-Linares A, Morford LA, Hartsfield JK. Bone Density and Dental External Apical Root Resorption. *Curr Osteoporos Rep.* déc 2016;14(6):292-309.
91. Iijima M, Kohda N, Kawaguchi K, Muguruma T, Ohta M, Naganishi A, et al. Effects of temperature changes and stress loading on the mechanical and shape memory properties of thermoplastic materials with different glass transition behaviours and crystal structures. *Eur J Orthod.* déc 2015;37(6):665-70.

92. Ilharreguy E. Évaluation de la prédictibilité d'un protocole de distalisation maxillaire supérieure à 2 mm avec aligneurs à l'aide d'ancrages osseux. Université de Bordeaux; 2022.
93. Izard, G. L'orthodontie. Masson, Paris. 1930. (La pratique stomatologique).
94. Jenner JD, Fitzpatrick BN. Skeletal anchorage utilising bone plates. Aust Orthod J. oct 1985;9(2):231-3.
95. Jiang T, Jiang YN, Chu FT, Lu PJ, Tang GH. A cone-beam computed tomographic study evaluating the efficacy of incisor movement with clear aligners: Assessment of incisor pure tipping, controlled tipping, translation, and torque. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. mai 2021;159(5):635-43.
96. Jindal P, Juneja M, Siena FL, Bajaj D, Breedon P. Mechanical and geometric properties of thermoformed and 3D printed clear dental aligners. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. nov 2019;156(5):694-701.
97. Kadioglu O, Büyükyilmaz T, Zachrisson BU, Maino BG. Contact damage to root surfaces of premolars touching miniscrews during orthodontic treatment. Am J Orthod Dentofacial Orthop. sept 2008;134(3):353-60.
98. Kalra S, Tripathi T, Rai P, Kanase A. Evaluation of orthodontic mini-implant placement: a CBCT study. Prog Orthod. 18 nov 2014;15(1):61.
99. Kapetanović A, Theodorou CI, Bergé SJ, Schols JGJH, Xi T. Efficacy of Miniscrew-Assisted Rapid Palatal Expansion (MARPE) in late adolescents and adults: a systematic review and meta-analysis. Eur J Orthod. 8 juin 2021;43(3):313-23.
100. Karaman AI, Basciftci FA, Polat O. Unilateral distal molar movement with an implant-supported distal jet appliance. Angle Orthod. avr 2002;72(2):167-74.
101. Karras T, Singh M, Karkazis E, Liu D, Nimeri G, Ahuja B. Efficacy of Invisalign® attachments: A retrospective study. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. août 2021;160(2):250-8.
102. Keles A, Erverdi N, Sezen S. Bodily distalization of molars with absolute anchorage. Angle Orthod. août 2003;73(4):471-82.
103. Kesling HD. The philosophy of the tooth positioning appliance. Am J Orthod Oral Surg. juin 1945;31(6):297-304.
104. 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. 1 mars 2021;122:26-49.
105. Kohda N, Iijima M, Muguruma T, Brantley WA, Ahluwalia KS, Mizoguchi I. Effects of mechanical properties of thermoplastic materials on the initial force of thermoplastic appliances. Angle Orthod. mai 2013;83(3):476-83.

106. Kravitz ND, Kusnoto B, Agran B, Viana G. Influence of attachments and interproximal reduction on the accuracy of canine rotation with Invisalign®. A prospective clinical study. *Angle Orthod.* juill 2008;78(4):682-7.
107. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign® work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign®. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* janv 2009;135(1):27-35.
108. Kundal S. Aligners: The Science of Clear Orthodontics. *Int J Dent Med Spec [Internet].* 18 juin 2020 [cité 18 août 2023];7(1). Disponible sur: <https://renupublishers.com/images/article/IJDMSv7n1i.pdf>
109. Kuroda S, Sugawara Y, Deguchi T, Kyung HM, Takano-Yamamoto T. Clinical use of miniscrew implants as orthodontic anchorage: success rates and postoperative discomfort. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* janv 2007;131(1):9-15.
110. Kusy RP. Orthodontic biomaterials: from the past to the present. *Angle Orthod.* déc 2002;72(6):501-12.
111. Kwak KH, Oh S, Choi YK, Kim SH, Kim SS, Park SB, et al. Effects of different distalization directions and methods on maxillary total distalization with clear aligners: a finite element study. *Angle Orthod.* 31 janv 2023;93(3):348-56.
112. Kwon JS, Lee YK, Lim BS, Lim YK. Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* févr 2008;133(2):228-34; quiz 328.e1.
113. Lai WL. [Extraction cases using clear aligners]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi Zhonghua Kouqiang Yixue Zazhi Chin J Stomatol.* 9 sept 2017;52(9):534-7.
114. Laohachaiaroon P, Samruajbenjakun B, Chaichanasiri E. Initial Displacement and Stress Distribution of Upper Central Incisor Extrusion with Clear Aligners and Various Shapes of Composite Attachments Using the Finite Element Method. *Dent J.* 20 juin 2022;10(6):114.
115. Latko-Durałek P, Dydek K, Boczkowska A. Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends. *J Polym Environ.* nov 2019;27(11):2600-6.
116. Lazaroo B, Tilotta F, Enroult J. Les minivis : ancrage osseux en omnipratique et orthodontie. CdP. Paris; 2010.
117. Le Gall M. L'ancrage : les minivis in : Canal P, Salavdori A. In: *L'orthodontie de l'adulte.* Issy-les-Moulineaux: elsevier Masson; p. 73-104.
118. LECOQ G. Traitement par aligneurs in office. *Angle Orthod.* janv 2021;91(1).
119. Lee BW. The force requirements for tooth movement, Part I: Tipping and bodily movement. *Aust Orthod J.* mars 1995;13(4):238-48.

120. Lee KJ, Park YC, Park JY, Hwang WS. Miniscrew-assisted nonsurgical palatal expansion before orthognathic surgery for a patient with severe mandibular prognathism. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* juin 2010;137(6):830-9.
121. Lee SY, Kim H, Kim HJ, Chung CJ, Choi YJ, Kim SJ, et al. Thermo-mechanical properties of 3D printed photocurable shape memory resin for clear aligners. *Sci Rep.* 15 avr 2022;12(1):6246.
122. Li R, She W, Luo Y, Wang J, Peng Y, Ye Q. The optimal activation of plastic aligner for canine distal movement: a three-dimensional finite element analysis. *Odontology.* avr 2022;110(2):305-12.
123. Li Y, Xiao S, Jin Y, Zhu C, Li R, Zheng Y, et al. Stress and movement trend of lower incisors with different IMPA intruded by clear aligner: a three-dimensional finite element analysis. *Prog Orthod.* 13 févr 2023;24(1):5.
124. Lim ZW, Meade MJ, Weir T. The predictability of maxillary curve of Spee leveling with the Invisalign® appliance. *Angle Orthod [Internet].* 6 juin 2023 [cité 25 août 2023]; Disponible sur: <https://meridian.allenpress.com/angle-orthodontist/article/doi/10.2319/022423-128.1/493516/The-predictability-of-maxillary-curve-of-Spee>
125. Lin E, Julien K, Kesterke M, Buschang PH. Differences in finished case quality between Invisalign® and traditional fixed appliances. *Angle Orthod.* 1 mars 2022;92(2):173-9.
126. Lin LY, Chang CH, Roberts WE. Bimaxillary protrusion and gummy smile treated with clear aligners: Closing premolar extraction spaces with bone screw anchorage. *APOS Trends Orthod.* 30 juin 2020;10:120-31.
127. Liu CL, Sun WT, Liao W, Lu WX, Li QW, Jeong Y, et al. Colour stabilities of three types of orthodontic clear aligners exposed to staining agents. *Int J Oral Sci.* 16 déc 2016;8(4):246-53.
128. Liu L, Zhan Q, Zhou J, Kuang Q, Yan X, Zhang X, et al. Effectiveness of an anterior mini-screw in achieving incisor intrusion and palatal root torque for anterior retraction with clear aligners: *Angle Orthod.* 1 nov 2021;91(6):794-803.
129. Loberto S, Paoloni V, Pavoni C, Cozza P, Lione R. Anchorage Loss Evaluation during Maxillary Molars Distalization Performed by Clear Aligners: A Retrospective Study on 3D Digital Casts. *Appl Sci.* 13 mars 2023;13(6):3646.
130. Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G. Optical properties of orthodontic aligners--spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog Orthod.* 2015;16:41.
131. Lombardo L, Arreghini A, Maccarrone R, Bianchi A, Scalia S, Siciliani G. Optical properties of orthodontic aligners--spectrophotometry analysis of three types before and after aging. *Prog Orthod.* 2015;16:41.

132. Lombardo L, Carlucci A, Maino BG, Colonna A, Paoletto E, Siciliani G. Class III malocclusion and bilateral cross-bite in an adult patient treated with miniscrew-assisted rapid palatal expander and aligners. *Angle Orthod.* 1 sept 2018;88(5):649-64.
133. Lombardo L, Martines E, Mazzanti V, Arreghini A, Mollica F, Siciliani G. Stress relaxation properties of four orthodontic aligner materials: A 24-hour in vitro study. *Angle Orthod.* janv 2017;87(1):11-8.
134. Lombardo L, Palone M, Longo M, Arveda N, Nacucchi M, De Pascalis F, et al. MicroCT X-ray comparison of aligner gap and thickness of six brands of aligners: an in-vitro study. *Prog Orthod.* 11 mai 2020;21(1):12.
135. Lombardo L, Palone M, Maino G, Paoletto E, Carlucci A, Siciliani G. Class II subdivision with skeletal transverse maxillary deficit treated by single-sitting bone-borne appliance: *Angle Orthod.* 1 janv 2021;91(1):129-37.
136. Lyu X, Cao X, Chen L, Liu Y, Li H, Hu C, et al. Accumulated biomechanical effects of mandibular molar mesialization using clear aligners with auxiliary devices: an iterative finite element analysis. *Prog Orthod.* 10 avr 2023;24(1):13.
137. Lyu X, Cao X, Yan J, Zeng R, Tan J. Biomechanical effects of clear aligners with different thicknesses and gingival-margin morphology for appliance design optimization. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* août 2023;164(2):239-52.
138. Macrì M, Murmura G, Varvara G, Traini T, Festa F. Clinical Performances and Biological Features of Clear Aligners Materials in Orthodontics. *Front Mater.* 11 févr 2022;9:819121.
139. Maino BG, Paoletto E, Lombardo L, Siciliani G. A Three-Dimensional Digital Insertion Guide for Palatal Miniscrew Placement. *J Clin Orthod JCO.* janv 2016;50(1):12-22.
140. Mampieri G, Castroflorio T, Conigliaro A, Giancotti A. Treatment of impacted canines with aligners: An alternative and viable option. *Clin Case Rep.* sept 2021;9(9):e04856.
141. Mantovani E, Castroflorio E, Rossini G, Garino F, Cugliari G, Deregibus A, et al. Scanning electron microscopy analysis of aligner fitting on anchorage attachments. *J Orofac Orthop Fortschritte Kieferorthopadie OrganOfficial J Dtsch Ges Kieferorthopadie.* mars 2019;80(2):79-87.
142. Maspero C, Tartaglia GM. 3D Printing of Clear Orthodontic Aligners: Where We Are and Where We Are Going. *Materials.* 18 nov 2020;13(22):5204.
143. Massif L, Frapier L. L'utilisation cliniques des mini vis en orthodontie. In: *Encycl Med Chir.* Elsevier. Paris; 2006. (Odontologie/Orthopédie dento-faciale).
144. Máyra Andressa R. V. Piccioni, Edson Alves Campos, José Roberto Cury Saad, Marcelo Ferrarezi De Andrade, Marília Regalado Galvão, Andrea Abi Rached. Application of the finite element method in Dentistry. *RSBO.* 15 déc 2014;10(4):369-77.

145. Melsen B. Indications d'ancrage squelettique en orthodontie. Rev Orthopédie Dento-Faciale. mars 2006;40(1):41-61.
146. Melsen B, Costa A. Immediate loading of implants used for orthodontic anchorage. Clin Orthod Res. févr 2000;3(1):23-8.
147. Melsen B, Verna C. Miniscrew implants: The Aarhus anchorage system. Semin Orthod. mars 2005;11(1):24-31.
148. Miller KB, McGorray SP, Womack R, Quintero JC, Perelmuter M, Gibson J, et al. A comparison of treatment impacts between Invisalign® aligner and fixed appliance therapy during the first week of treatment. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. mars 2007;131(3):302.e1-9.
149. Mohammed H, Wafaie K, Rizk MZ, Almuzian M, Sosly R, Bearn DR. Role of anatomical sites and correlated risk factors on the survival of orthodontic miniscrew implants: a systematic review and meta-analysis. Prog Orthod. 24 sept 2018;19(1):36.
150. Montasser MA, Keilig L, El-Bialy T, Reimann S, Jäger A, Bourauel C. Effect of archwire cross-section changes on force levels during complex tooth alignment with conventional and self-ligating brackets. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. avr 2015;147(4 Suppl):S101-108.
151. Moon CH, Lee DG, Lee HS, Im JS, Baek SH. Factors associated with the success rate of orthodontic miniscrews placed in the upper and lower posterior buccal region. Angle Orthod. janv 2008;78(1):101-6.
152. Morton J, Derakhshan M, Kaza S, Li C. Design of the Invisalign® system performance. Semin Orthod. mars 2017;23(1):3-11.
153. Moshiri S, Araújo EA, McCray JF, Thiesen G, Kim KB. Cephalometric evaluation of adult anterior open bite non-extraction treatment with Invisalign®. Dent Press J Orthod. 2017;22(5):30-8.
154. Nabbout F, Faure J, Baron P. Centers of resistance of tooth segments and orthodontic mechanics : Determining the centers of resistance. Int Orthod. 2007;
155. Nakano H, Kato R, Kakami C, Okamoto H, Mamada K, Maki K. Development of Biocompatible Resins for 3D Printing of Direct Aligners. J Photopolym Sci Technol. 24 juin 2019;32(2):209-16.
156. Nakasima A, Hu JR, Ichinose M, Shimada H. Potential application of shape memory plastic as elastic material in clinical orthodontics. Eur J Orthod. 1 juin 1991;13(3):179-86.
157. Nasef AA, El-Beialy AR, Mostafa YA. Virtual techniques for designing and fabricating a retainer. Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod. sept 2014;146(3):394-8.

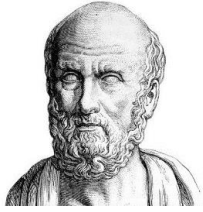
158. Nguyen M. Apport de la tomographie numérisée en mini-implantologie. Mémoire du diplôme Universitaire d'Orthodontie. Université Bordeaux Segalen; 2006.
159. Paik CH, Woo YJ, Boyd RL. Treatment of an adult patient with vertical maxillary excess using miniscrew fixation. *J Clin Orthod JCO*. août 2003;37(8):423-8.
160. Palone M, Casella S, De Sbrocchi A, Siciliani G, Lombardo L. Space closure by miniscrew-assisted mesialization of an upper third molar and partial vestibular fixed appliance: A case report. *Int Orthod*. mars 2022;20(1):100602.
161. Papadimitriou A, Mousoulea S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Prog Orthod*. 28 sept 2018;19(1):37.
162. Park HK, Sung EH, Cho YS, Mo SS, Chun YS, Lee KJ. 3-D FEA on the intrusion of mandibular anterior segment using orthodontic miniscrews. *Korean J Orthod*. 2011;41(6):384.
163. Park HS, Bae SM, Kyung HM, Sung JH. Micro-implant anchorage for treatment of skeletal Class I bialveolar protrusion. *J Clin Orthod JCO*. juill 2001;35(7):417-22.
164. Pavone AF, Ghassemian M, Verardi S. Gummy Smile and Short Tooth Syndrome--Part 1: Etiopathogenesis, Classification, and Diagnostic Guidelines. *Compend Contin Educ Dent Jamesburg NJ* 1995. févr 2016;37(2):102-7; quiz 108-10.
165. Peeters B, Kiratli N, Semeijn J. A barrier analysis for distributed recycling of 3D printing waste: Taking the maker movement perspective. *J Clean Prod*. déc 2019;241:118313.
166. Peter E, J M, Ani George S. Are clear aligners environment friendly? *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. mai 2022;161(5):619-20.
167. Peuch-Lestrade GR, Le Marie M, Guillaumot G, Decker A. Les minivis en orthodontie. *Int Orthod*. juin 2009;7(2):157-69.
168. Philippe J. *Orthodontie. Des principes et une technique*. J.Prélat. Paris; 1972.
169. Pinho T, Santos M. Skeletal open bite treated with clear aligners and miniscrews. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. févr 2021;159(2):224-33.
170. Prabhu J, Cousley RRJ. Current products and practice: bone anchorage devices in orthodontics. *J Orthod*. déc 2006;33(4):288-307.
171. Prasad S, Kader NA, Sujatha G, Raj T, Patil S. 3D printing in dentistry. *J 3D Print Med*. juill 2018;2(3):89-91.
172. Prosterman B, Prosterman L, Fisher R, Gornitsky M. The use of implants for orthodontic correction of an open bite. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod*. mars 1995;107(3):245-50.

173. Ravera S, Castroflorio T, Garino F, Daher S, Cugliari G, Deregibus A. Maxillary molar distalization with aligners in adult patients: a multicenter retrospective study. *Prog Orthod.* 2016;17:12.
174. Robertson L, Kaur H, Fagundes NCF, Romanyk D, Major P, Flores Mir C. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: A systematic review. *Orthod Craniofac Res.* mai 2020;23(2):133-42.
175. Rossini G, Parrini S, Castroflorio T, Deregibus A, Debernardi CL. Efficacy of clear aligners in controlling orthodontic tooth movement: a systematic review. *Angle Orthod.* sept 2015;85(5):881-9.
176. Rota E, Parrini S, Malekian K, Cugliari G, Mampieri G, Deregibus A, et al. Lower Molar Distalization Using Clear Aligners: Bodily Movement or Uprighting? A Preliminary Study. *Appl Sci.* 14 juill 2022;12(14):7123.
177. Rozzi M, Tiberti G, Mucedero M, Cozza P. Leveling the curve of Spee: Comparison between continuous archwire treatment and Invisalign® system: A retrospective study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* nov 2022;162(5):645-55.
178. Ryokawa H, Miyazaki Y, Fujishima A, Miyazaki T, Maki K. The mechanical properties of dental thermoplastic materials in a simulated intraoral environment. *Orthod Waves.* 1 juin 2006;65(2):64-72.
179. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM. Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners. *Korean J Orthod.* sept 2018;48(5):316-25.
180. Sabouni W, Venugopal A, Adel SM, Vaid N. Correction of anterior open bite of varying severity using clear aligner therapy—A case series. *Clin Case Rep [Internet].* août 2022 [cité 18 juin 2023];10(8). Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ccr3.6277>
181. Sabri R. Multidisciplinary management of permanent first molar extractions. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* mai 2021;159(5):682-92.
182. Samrit V, Kharbanda OP, Duggal R, Seith A, Malhotra V. Bone density and miniscrew stability in orthodontic patients. *Aust Orthod J.* nov 2012;28(2):204-12.
183. Schuster S, Eliades G, Zinelis S, Eliades T, Bradley TG. Structural conformation and leaching from in vitro aged and retrieved Invisalign® appliances. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* déc 2004;126(6):725-8.
184. Seeger P, Ratfisch R, Moneke M, Burkhart T. Addition of thermo-plastic polyurethane (TPU) to poly(methyl methacrylate) (PMMA) to improve its impact strength and to change its scratch behavior. *Wear.* juill 2018;406-407:68-74.

185. Serra G, Morais LS, Elias CN, Meyers MA, Andrade L, Muller C, et al. Sequential bone healing of immediately loaded mini-implants. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* juill 2008;134(1):44-52.
186. Shahabuddin N, Kang J, Jeon HH. Predictability of the deep overbite correction using clear aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* juin 2023;163(6):793-801.
187. Sheridan JJ, LeDoux W, McMinn R. Essix retainers: fabrication and supervision for permanent retention. *J Clin Orthod JCO.* janv 1993;27(1):37-45.
188. Simon M, Keilig L, Schwarze J, Jung BA, Bourauel C. Forces and moments generated by removable thermoplastic aligners: incisor torque, premolar derotation, and molar distalization. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* juin 2014;145(6):728-36.
189. Smith RJ, Burstone CJ. Mechanics of tooth movement. *Am J Orthod.* avr 1984;85(4):294-307.
190. Société Française d'orthopédie dento-faciale. Dictionnaire d'orthognathodontie [Internet]. Paris; Disponible sur: www.sfodf.org
191. Soheilifar S, Mohebi S, Ameli N. Maxillary molar distalization using conventional versus skeletal anchorage devices: A systematic review and meta-analysis. *Int Orthod.* sept 2019;17(3):415-24.
192. Solano-Mendoza B, Sonnemberg B, Solano-Reina E, Iglesias-Linares A. How effective is the Invisalign® system in expansion movement with Ex30' aligners? *Clin Oral Investig.* juin 2017;21(5):1475-84.
193. Steve M, Racy E, Kerbrat JB. Choisir et mettre en place les mini-vis d'ancrages orthodontiques : notions importantes. *Orthod Fr.* déc 2015;86(4):295-302.
194. Sugawara J. Temporary skeletal anchorage devices: the case for miniplates. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* mai 2014;145(5):559-65.
195. Sugawara J, Baik UB, Umemori M, Takahashi I, Nagasaka H, Kawamura H, et al. Treatment and posttreatment dentoalveolar changes following intrusion of mandibular molars with application of a skeletal anchorage system (SAS) for open bite correction. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg.* 2002;17(4):243-53.
196. Sugawara J, Daimaruya T, Umemori M, Nagasaka H, Takahashi I, Kawamura H, et al. Distal movement of mandibular molars in adult patients with the skeletal anchorage system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* févr 2004;125(2):130-8.
197. Takaki T, Tamura N, Yamamoto M, Takano N, Shibahara T, Yasumura T, et al. Clinical study of temporary anchorage devices for orthodontic treatment--stability of micro/mini-screws and mini-plates: experience with 455 cases. *Bull Tokyo Dent Coll.* 2010;51(3):151-63.

198. Talens-Cogollos L, Vela-Hernández A, Peiró-Guijarro MA, García-Sanz V, Montiel-Company JM, Gandía-Franco JL, et al. Unplanned molar intrusion after Invisalign® treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* oct 2022;162(4):451-8.
199. Talic NF, Almudhi AA. The effect of dietary pigmentation on the esthetic appearance of clear orthodontic elastomeric modules. *J Orthod Sci.* 2016;5(2):70-3.
200. Tamer İ, Öztaş E, Marşan G. Orthodontic Treatment with Clear Aligners and The Scientific Reality Behind Their Marketing: A Literature Review. *Turk J Orthod.* déc 2019;32(4):241-6.
201. Tanne K, Koenig HA, Burstone CJ. Moment to force ratios and the center of rotation. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* nov 1988;94(5):426-31.
202. Thébault B, Bédhet N, Béhaghel M, Elamrani K. The benefits of using anchorage miniplates: are they compatible with everyday orthodontic practice? *Int Orthod.* déc 2011;9(4):353-87.
203. Tsui WK, Chua HDP, Cheung LK. Bone anchor systems for orthodontic application: a systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* nov 2012;41(11):1427-38.
204. Turrel B, Valran V, Gebeile-Chauty S. Biomechanics of mini-implants : analysis of the adverse effects of four clinical situations and proposed resolutions. *Orthod Fr.* juin 2021;92(2):195-214.
205. Umemori M, Sugawara J, Mitani H, Nagasaka H, Kawamura H. Skeletal anchorage system for open-bite correction. *Am J Orthod Dentofac Orthop Off Publ Am Assoc Orthod Its Const Soc Am Board Orthod.* févr 1999;115(2):166-74.
206. Upadhyay M, Arqub SA. Biomechanics of clear aligners: hidden truths & first principles. *J World Fed Orthod.* févr 2022;11(1):12-21.
207. Wang Q, Dai D, Wang J, Chen Y, Zhang C. Biomechanical analysis of effective mandibular en-masse retraction using Class II elastics with a clear aligner: a finite element study. *Prog Orthod.* déc 2022;23(1):23.
208. Weir T. Clear aligners in orthodontic treatment. *Aust Dent J.* mars 2017;62 Suppl 1:58-62.
209. Wheeler TT. Orthodontic clear aligner treatment. *Semin Orthod.* mars 2017;23(1):83-9.
210. Womack WR. Four-premolar extraction treatment with Invisalign®. *J Clin Orthod JCO.* août 2006;40(8):493-500.
211. Wu D, Zhao Y, Ma M, Zhang Q, Lei H, Wang Y, et al. Efficacy of mandibular molar distalization by clear aligner treatment. *Zhong Nan Da Xue Xue Bao Yi Xue Ban.* 28 oct 2021;46(10):1114-21.

212. Xia Q, He Y, Jia L, Wang C, Wang W, Wang C, et al. Assessment of labially impacted canines traction mode with clear aligners vs. fixed appliance: A comparative study based on 3D finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:1004223.
213. Yamada K, Kuroda S, Deguchi T, Takano-Yamamoto T, Yamashiro T. Distal movement of maxillary molars using miniscrew anchorage in the buccal interradicular region. *Angle Orthod.* janv 2009;79(1):78-84.
214. Yao S, Jiang W, Wang C, He Y, Wang C, Huang L. Improvements of tooth movement efficiency and torque control in expanding the arch with clear aligners: a finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol.* 1 juin 2023;11:1120535.
215. Zafeiriadis AA, Karamouzos A, Athanasiou AE, Eliades T, Palaghias G. In vitro spectrophotometric evaluation of Vivera clear thermoplastic retainer discolouration. *Aust Orthod J.* nov 2014;30(2):192-200.
216. Zhang N, Bai Y, Ding X, Zhang Y. Preparation and characterization of thermoplastic materials for invisible orthodontics. *Dent Mater J.* 2011;30(6):954-9.
217. Zhang XJ, He L, Guo HM, Tian J, Bai YX, Li S. Integrated three-dimensional digital assessment of accuracy of anterior tooth movement using clear aligners. *Korean J Orthod.* nov 2015;45(6):275-81.
218. Zhu G yin, Zhang B, Yao K, Lu W xin, Peng J jia, Shen Y, et al. Finite element analysis of the biomechanical effect of clear aligners in extraction space closure under different anchorage controls. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* mai 2023;163(5):628-644.e11.



SERMENT MEDICAL

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'HIPPOCRATE.

Je promets et je jure, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine Dentaire.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

J'informerai mes patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des connaissances pour forcer les consciences.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission.

Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leur père.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois déshonoré et méprisé de mes confrères si j'y manque.

BONNAUD PRIOLLAUD Marin – Intérêt des ancrages osseux dans les traitements par aligneurs.

Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix-Marseille Université : 2023

Rubrique de classement : Orthopédie Dento-Faciale

Résumé: L'orthodontie moderne a connu deux bouleversements récents: les ancrages osseux, qui ont révolutionné les techniques d'ancrage, ainsi que l'avènement de l'orthodontie digitale via l'utilisation de plus en plus fréquente d'aligneurs transparents. Bien que la technique de traitement orthodontique par aligneurs soit relativement récente, certains de ses mécanismes demeurent encore mal compris. Afin d'optimiser l'efficacité du traitement, il est envisageable d'intégrer un ensemble d'auxiliaires lors de la planification du cas, parmi lesquels figurent les ancrages osseux. L'objectif de cette thèse est de mettre en lumière, selon la littérature et en fonction des indications, leur contribution aux thérapies par aligneurs, tout en recensant les moyens d'optimiser leur association.

Mots-clés: ancrages osseux, orthodontie digitale, aligneurs transparents, prédictibilité du traitement.

BONNAUD PRIOLLAUD Marin – Advantages of TADs in clear aligners treatments.

Abstract: Modern orthodontics has undergone two recent revolutions: bone anchorage, which has revolutionized anchorage techniques, and the advent of digital orthodontics through the increasingly frequent use of transparent aligners. Although the technique of orthodontic treatment with aligners is relatively recent, some of its mechanisms are still poorly understood. To optimize treatment efficacy, it is possible to integrate a range of aids into case planning, including bone anchors. The aim of this thesis is to highlight, according to the literature and depending on the indications, their contribution to aligner therapy, while identifying ways of optimizing their combination.

Keywords: Temporary Anchorage Devices (TADs), digital orthodontics, clear aligners, treatment predictability.