UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2021 N° 26

**THESE**

Présentée pour le Diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire

Le 19 / 04 / 2021

Par

ABOAF Yohan

Né le 09 / 09 / 1995 à Strasbourg

# Protocoles chirurgicaux d'accélération du déplacement orthodontique : innovations ou illusions ? Revue de la littérature.

Président : Professeur HUCK Olivier

Assesseurs : Docteur BAHI-GROSS Sophie

Docteur WAGNER Delphine

Docteur PEREZ Cyril

# FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE DE STRASBOURG

**Doyen : Professeur Corinne TADDEI-GROSS**

**Doyens honoraires : Professeur Robert FRANK**
**Professeur Maurice LEIZE**
**Professeur Youssef HAIKEL**

**Professeurs émérites : Professeur Henri TENENBAUM**

**Responsable des Services Administratifs : Mme Françoise DITZ-MOUGEL**

## Professeurs des Universités

| | |
|---|---|
| **Vincent BALL** | Ingénieurie Chimique, Energétique - Génie des Procédés |
| **Agnès BLOCH-ZUPAN** | Sciences Biologiques |
| **François CLAUSS** | Odontologie Pédiatrique |
| **Jean-Luc DAVIDEAU** | Parodontologie |
| **Youssef HAÏKEL** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Olivier HUCK** | Parodontologie |
| **Marie-Cécile MANIERE** | Odontologie Pédiatrique |
| **Florent MEYER** | Sciences Biologiques |
| **Maryline MINOUX** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Anne-Marie MUSSET** | Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale |
| **Corinne TADDEI-GROSS** | Prothèses |
| **Béatrice WALTER** | Prothèses |
| **Matthieu SCHMITTBUHL** *Délégation (Juin 2024)* | Sciences Anatomiques et Physiologiques,Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie |

## Maîtres de Conférences

| | |
|---|---|
| **Youri ARNTZ** | Biophysique moléculaire |
| **Sophie BAHI-GROSS** | Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation |
| **Yves BOLENDER** | Orthopédie Dento-Faciale |
| **Fabien BORNERT** | Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation |
| **Abdessamad BOUKARI** | Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation |
| **Claire EHLINGER** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Olivier ETIENNE** | Prothèses |
| **Florence FIORETTI** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Catherine-Isabelle GROS** | Sciences Anatomiques et Physiologiques - Biophysique - Radiologie |
| **Sophie JUNG** | Sciences Biologiques |
| **Nadia LADHARI** *Disponibilité (Nov. 2020)* | Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique |
| **Davide MANCINO** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Damien OFFNER** | Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale |
| **Catherine PETIT** | Parodontologie |
| **François REITZER** | Odontologie Conservatrice - Endodontie |
| **Martine SOELL** | Parodontologie |
| **Marion STRUB** | Odontologie Pédiatrique |
| **Xavier VAN BELLINGHEN** | Prothèses |
| **Delphine WAGNER** *Délégation (Août 2021)* | Orthopédie Dento-Faciale |
| **Etienne WALTMANN** | Prothèses |

## Equipes de Recherche

| | |
|---|---|
| **Nadia JESSEL** | INSERM / Directeur de Recherche/Directrice d'UMR |
| **Philippe LAVALLE** | INSERM / Directeur de Recherche |
| **Pierre SCHAAF** | UNISTRA / Professeur des Universités / Directeur d'UMR |
| **Bernard SENGER** | INSERM / Directeur de Recherche |

**Au Président de cette thèse,**

**Monsieur le Professeur Olivier Huck,**

Vous m'avez fait l'honneur de présider mon jury et je vous en remercie.

Que ce travail soit un moyen de vous exprimer ma gratitude pour les enseignements que vous m'avez transmis. Merci aussi pour cette bonne humeur qui vous caractérise tant ainsi que pour votre disponibilité et votre réactivité.

**A la Directrice de cette thèse,**

**Madame le Docteur Delphine Wagner,**

Je souhaite vivement vous remercier d'avoir dirigé ce travail en restant toujours disponible, à l'écoute et pour votre sincère bienveillance. Les pistes d'études que vous m'avez indiquées m'ont été indispensables pour l'écriture de cette thèse.

Je vous suis également infiniment reconnaissant pour la rigueur que vous m'avez transmise au cours de mon cursus et qui me paraît essentielle dans le cadre de ma profession. Merci également d'avoir toujours été si accessible, et pour tous les bons moments passés à vos côtés à la clinique ou en conférence, moments que j'espère avoir l'occasion de renouveler à l'avenir.

**A Madame le Docteur Sophie Bahi-Gross,**

Vous m'avez honoré en acceptant de participer à mon jury de thèse. C'est vous qui avez impulsé l'idée de ce sujet.

Je ne saurais jamais assez vous remercier pour la qualité de l'enseignement que vous m'avez dispensé au cours de ces années d'études. Si je n'ai pas eu la chance de vous avoir comme encadrante en clinique, je me souviendrai toujours de vos cours magistraux emprunts de dynamisme, d'interactions et si riches en connaissances. Si la description des lésions en pathologie orale n'a plus aucun secret pour moi, c'est bien grâce à vous…

**A Monsieur le Docteur Cyril Perez,**

Ta participation à mon jury de thèse est si gratifiante pour moi. Je souhaitais te remercier pour ta présence et ta disponibilité, à la Faculté comme en dehors. Merci aussi pour cette amitié que nous avons bâtie au fil des années et qui, j'en suis sûr, perdurera.

**A mes Parents,**

A qui je dois tout. Merci de m'avoir permis d'accomplir ce parcours, je vous en suis infiniment reconnaissant. Vous avez toujours tout mis en œuvre pour conditionner ma réussite, ma sérénité et mon bonheur. J'espère du fond du cœur avoir réussi quelque part à vous rendre fiers. De belles années ensemble nous attendent. Je vous aime.

**A mon frère Dan,**

Mon frérot. Depuis des années, je te cours après, je t'ai suivi en PACES et me voilà à présent à Paris à quelques pas de chez toi.

Merci pour l'exemple que tu m'as donné en entamant un parcours dans le domaine de la santé. Je n'en serais pas là sans toi. Merci de m'avoir tant diverti pendant ces années d'études, de m'avoir permis de me défouler quand j'en avais besoin.

Merci pour ta compagnie au quotidien, pour tous ces instants, ces voyages, ces aventures et ces émotions partagées et qui resteront gravées dans ma mémoire à jamais.

Merci pour ton soutien inconditionnel, pour tes conseils bienveillants.

Tu es un exemple pour moi.

**A mon frère Yaniv,**

Merci pour l'ambition que tu as toujours su m'inculquer. Ce sont tes mots qui résonnaient dans ma tête dans les moments les plus durs de mon cursus, et qui continuent de m'inspirer au quotidien. L'envie d'aller toujours plus loin, de tout donner et de toujours viser le meilleur, c'est de toi que je la tiens. Merci de toujours t'être occupé et préoccupé de nous, merci pour tes (…) Ok je retourne bosser c'est bon.

**A ma sœur Anaëlle,**

Merci d'avoir toujours été la meilleure sœur-juive de l'histoire, merci pour ta bienveillance et d'avoir toujours témoigné d'un puissant attachement fraternel (au point d'emménager récemment à quelques mètres de moi !). Merci pour toutes ces ambiances et célébrations que tu sais si bien organiser.

Je garde espoir qu'un jour tu saches écrire mon prénom correctement.

**A mes neveux et nièces,**
Merci de me combler de bonheur…

**A mes tontons, tatas et cousins,**
Qui ont toujours su m'entourer si chaleureusement, me conseiller si justement, et me réconforter avec tant de bienveillance : je vous en suis infiniment reconnaissant. J'ai hâte de vous retrouver au plus vite.

**A Julie,**
De la Faculté à la vie parisienne tu as toujours été mon repère, ma partenaire et mon modèle. Merci du fond du cœur de m'avoir toujours accompagné si fidèlement, de m'avoir diverti, rassuré, encouragé, écouté et aimé.

**A Maxime,**
C'est grâce à toi si j'en suis là aujourd'hui à exercer un métier que j'aime tant et pour lequel j'accorde tant d'intérêt. C'est toi qui jusqu'à la veille de mes partiels en P1, me coachais, croyais en moi et me motivais. C'est en t'écoutant et en te voyant t'épanouir dans les études que j'ai choisi la voie de l'odontologie. Quand je me demande si tout était à refaire, j'en viens à la conclusion que je referais les mêmes choix, et pour cela je ne te remercierai jamais assez.
Tu m'inspires énormément, professionnellement et plus généralement dans tous tes accomplissements qui ne cessent de se multiplier. A présent je n'ai qu'une hâte, celle de faire partie de tes projets et bâtir de belles choses avec toi.

**A Thomas,**
Je ne saurais assez te remercier pour ta pédagogie si formidable. Ta manière d'enseigner et d'accompagner les étudiants est unique à mes yeux. Merci pour la confiance que tu m'as accordée en clinique. D'un encadrant au départ, tu es devenu un ami. A très bientôt pour un petit footing.

**A Noam, mon binôme,**

Notre entraide en P1, les trajets en musique, et tous les bons moments depuis sont des souvenirs que je garderai toujours. Nous voilà maintenant réunis quelques années plus tard pour une formation complémentaire et pour, je l'espère, bien d'autres encore.

**A Mimon,**

En P1 et à chaque examen depuis, tu as toujours su me faire rire… Cette sérénité et cette zénitude dont tu as fait preuve pendant les partiels m'ont toujours impressionné. Merci d'être si attach(i)ant.

**A Lucada et Ruben,**

Merci pour ces innombrables fous rires à la fac et pour ces sessions à la colloc et au stud. J'ai hâte de vous retrouver.

**A Léo,**

Mon ami depuis toujours, mon chasseur cueilleur préféré, que j'ai retrouvé à la fac après des années d'éloignement. Merci d'être si inspirant pour moi.

**A Sébastien,**

Merci à toi d'avoir été mon partenaire de bars le plus assidu, de belles choses nous attendent à l'avenir j'espère.

**A Arnaud,**

Merci pour ta présence à mes côtés depuis plus de 20 ans, tu as forgé ma manière de penser au fil des années.

**A Bengin, Alice, Hugo, Florie, Benaud, Louis, Yaouss, Bazad, Charlotte, Colette, Olivier, Jérome, Mim, JB, et au Ihoud**

Mes amis les plus proches, ma deuxième famille. J'ai une énorme pensée pour vous qui m'avez entouré pendant ces années d'études. Je vous en remercie.

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2021 N° 26

**THESE**

Présentée pour le Diplôme d'État de Docteur en Chirurgie Dentaire

Le 19 / 04 / 2021

Par

ABOAF Yohan

Né le 09 / 09 / 1995 à Strasbourg

# Protocoles chirurgicaux d'accélération du déplacement orthodontique : innovations ou illusions ? Revue de la littérature.

Président : Professeur HUCK Olivier

Assesseurs : Docteur BAHI-GROSS Sophie

Docteur WAGNER Delphine

Docteur PEREZ Cyril

# TABLE DES MATIERES

**INTRODUCTION.....14**

**1. BASES BIOLOGIQUES DU DEPLACEMENT DENTAIRE PROVOQUE .....17**
1.1. D'un stimulus mécanique à une réponse biologique.....18
1.2. Effets biologiques immédiats - phase initiale : .....21
1.3. Effets biologiques à moyen terme .....22
1.3.1. Phase de latence/sidération .....22
1.3.2. Phase de remodelage, le déplacement véritable .....23
1.4. Effets biologiques à long terme .....27
1.5. Particularités du parodonte adulte et influence sur le mouvement provoqué.....30

**2. ACCELERATION CHIRURGICALE DU DEPLACEMENT DENTAIRE PROVOQUE..... 32**
2.1. Historique des corticotomies alvéolaires.....33
2.1.1. Prémices..... 33
2.1.2. La technique des blocs osseux de Köle.....34
2.2. Bases biologiques du déplacement dentaire accéléré par corticotomies..... 37
2.2.1. Le PAR, « Phénomène d'accélération régionale » (Frost, 1981).....37
2.2.2. La théorie biologique du mouvement orthodontique accéléré : changement de paradigme.....38
2.3. Protocoles actuels - Corticotomies alvéolaires modernes..... 45
2.3.1. La technique de référence : PAOO (Wilcko et al., 2000) .....45
2.3.1.1. Protocole.....46
2.3.1.2. Intérêts .....50
2.3.1.2.1. Une réduction de la durée totale du traitement.....50
2.3.1.2.2. Une réduction du caractère invasif.....51
2.3.1.2.3. Stabilité et renforcement du volume osseux alvéolaire.....51
2.3.1.2.4. Une technique sûre .....56
2.3.1.2.5. Durabilité des résultats en fin de traitement .....57
2.3.1.3. Inconvénients.....58
2.3.1.4. Indications.....59
2.3.1.5. Contre-indications .....61
2.3.2. Corticotomies modifiées.....63
2.3.2.1. Technique piézo-chirurgicale (Sebaoun et al., 2008).....63
2.3.2.2. Technique MTDLD - Monocortical Tooth Dislocation and Ligament Distraction (Vercellotti et al., 2007).....64
2.3.2.3. Technique mono-corticale (Germeç et al., 2006).....66
2.3.2.3.1. Avantages..... 66
2.3.2.3.2. Inconvénients..... 67
2.3.2.3.3. Indications .....67
2.3.2.3.4. Contre-indications.....68
2.3.2.4. Technique avec lambeau de préservation gingivale (Abbas et al., 2016).....68
2.3.2.4.1. Protocole.....68
2.3.2.4.2. Avantages.....69
2.3.2.4.3. Inconvénients.....69

2.3.2.4.4. Indications ………………………………………………..69
2.3.2.5. Technique du dumpling (Ma et al., 2016) ………………………......69
2.3.2.5.1. Protocole........................................................…………………70
2.3.2.5.2. Avantages....……………………………………………………..…73
2.3.2.5.3. Inconvénients........……………………………………………………73
2.3.2.6. Technique du lambeau périosté avec affaiblissement mentonnier (Saint-Surin et al., 2020).........…………………………………………………73
2.3.2.6.1. Protocole……………………………………………………………74
2.3.2.6.2. Avantages …………………………………………………...…75
2.3.2.6.3. Inconvénients ……………………………………………..…76

**3. CORTICOTOMIES MINIMALEMENT INVASIVES…………………………………………77**
3.1. Micro-ostéoperforation (Alikhani et al., 2013)....……………………………...………80
3.1.1. Protocole ………………………………………………………………….80
3.1.2. Avantages. ……………………………………………………………....83
3.1.3. Inconvénients ……………………………………………………………86
3.1.4. Indications ……………………………………………………………...88
3.1.5. Contre-indications………………………………………………………….88
3.1.6. Discussion……………………………………………………………………89
3.1.7. Conclusion ……………………………………………………………………90
3.2. Corticision (Kim et al., 2016) ……………………………………………………………91
3.2.1. Protocole …………………………………………………………..……..91
3.2.2. Discussion....………………………………………………..………………..92
3.2.3. Avantages ………………………………………………………..…..…..94
3.2.4. Inconvénients ...……………………………………………………......…94
3.2.5. Indications …………………………………………………………...………..95
3.2.6. Contre-indications.......…....…………………………………………………..95
3.3. Techniques mini-invasives piézo-chirurgicales……………………………………95
3.3.1. Technique de Piézocision® (Dibart et al., 2009) …………………………….96
3.3.1.1. Protocole……………………………………………………..…………..97
3.3.1.2. Avantages.......................…………………………………………….....104
3.3.1.3. Inconvénients ……………………………………………………….....112
3.3.1.4. Indications............…………………………………………………..…117
3.3.1.5. Contre-indications. ………………………………………..……...…118
3.3.1.6. Discussion. …………………………………………………………..…118
3.3.2. Technique TURC – Tunnel Regenerative Corticotomy (Brugnami et al., 2020) .....…………………………………………………………………………......121
3.3.2.1. Protocole ……………………………………………………………......122
3.3.2.2. Avantages.........................……………………………………………..…123
3.3.2.3. Inconvénients ..……………………………………………………………..123
3.3.3. Technique de piézopuncture (Kim et al., 2013)...………………………......123
3.3.3.1. Protocole ……………………………………………………………......124
3.3.3.2. Avantages.......………………………………………………………..…125
3.3.3.3. Inconvénients ……………………………………………………..…..125
3.3.3.4. Discussion....…………………………………………………………..…126
3.3.4. Technique de discision (Buyuk et al., 2018).....……………….……………....126

3.3.4.1. Protocole .....126
3.3.4.2. Avantages ……127
3.3.4.3. Inconvénients.....128
3.3.4.4. Indications et contre-indications……...128
3.4. Techniques alternatives non chirurgicales……128
3.5. Tableaux récapitulatifs des procédures chirurgicales d'accélération du déplacement dentaire ……. ……129

**CONCLUSIONS..……...133**
**REFERENCES ……...……...137**

# LISTE DES FIGURES

| Numéro de figure | Légende | Page |
|---|---|---|
| Figure 1 | Organigramme résumant les phénomènes complexes de mécanotransduction et de réponse inflammatoire, tant au niveau des tissus minéralisés que non-minéralisés. | 20 |
| Figure 2 | Schéma d'une coupe sagittale d'un élément dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique en rotation. | 21 |
| Figure 3 | Schéma illustrant la hyalinisation et résorptions alvéolaires après déplacement initial orthodontique. | 25 |
| Figure4 | Coupe sagittale d'un organe dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique, vue au microscope optique. | 26 |
| Figure5 | Schéma montrant la correspondance entre la courbe de déplacement et les différents stades morphologiques de la réaction osseuse. | 27 |
| Figure 6 | Coupe sagittale d'un élément dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique élevée en rotation, vue au microscope optique. | 28 |
| Figure 7 | Croquis d'une ostéotomie palatine par Cohn-Stock, 1921. | 33 |
| Figure 8 | Schéma représentant la technique des « blocs osseux ». | 34 |
| Figure 9 | Coupes sagittales de maxillaires de rats étudiés par microscopie à fluorescence. | 43 |
| Figure 10 | Photographies illustrant la technique chirurgicale de PAOO. | 48 |
| Figure 11 | Photographie en vue antérieure après élévation d'un lambeau vestibulaire d'épaisseur totale. | 52 |
| Figure 12 | Schéma exposant les limites des mouvements orthodontiques réalisables chez l'adulte en millimètres. | 55 |
| Figure 13 | Arbre décisionnel pour l'augmentation tissulaire associée à une corticotomie alvéolaire. | 56 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure 14 | Photographie illustrant les incisions de décortications réalisées avec un instrument piézo-chirurgical. | 64 |
| Figure 15 | Schémas décrivant la technique MTDLD - *Monocortical Tooth Dislocation and Ligament Distraction* par Vercellotti. | 65 |
| Figure 16 | Photographies de lambeaux sub-marginaux – de préservation parodontale. | 68 |
| Figure 17 | Photographies illustrant la technique du dumpling. | 72 |
| Figure 18 | Schémas et photographie illustrant la technique du lambeau périosté combiné à un affaiblissement mentonnier. | 75 |
| Figure 19 | Kit chirurgical pour la micro-ostéoperforation. | 81 |
| Figure 20 | Photographies montrant la réalisation de trois micro-ostéoperforations vestibulaires sur un site de rétraction canine. | 81 |
| Figure 21 | Schéma proposant des distances à respecter entre les points d'impact des micro-ostéoperforations et les structures anatomiques. | 82 |
| Figure 22 | Kit chirurgical pour la corticision : maillet chirurgical, porte-lame. Incisions de corticisions. | 92 |
| Figure 23 | Schéma décrivant le fonctionnement d'un insert de piézo-chirurgie. | 95 |
| Figure 24 | Photographie illustrant la réalisation des incisions gingivo-muqueuses à l'aide d'une lame 15, dans le cadre de la piézocision. | 98 |
| Figure 25 | Photographie montrant l'utilisation de guides métalliques verticaux pour faciliter le tracé d'incision et contrôle radiographique 2D dans le cadre de la piézocision.. | 98 |
| Figure 26 | Photographie montrant l'écartement des incisions gingivo-muqueuses de piézocision. | 99 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure 27 | Inserts pour la piézocision. | 100 |
| Figure 28 | Cliché montrant la réalisation des incisions de décortication alvéolaire sous irrigation abondante, dans le cadre d'une chirurgie de piézocision. | 100 |
| Figure 29 | Photographie montrant le résultat d'une corticotomie réalisée au piézotome : mise en évidence d'un saignement attestant de la pénétration de l'os médullaire. | 100 |
| Figure 30 | Photographies en vues antérieures des différentes étapes opératoires dans le cadre de la piézocision. | 102 |
| Figure 31 | Photographies en vues antérieures peropératoires et postopératoires dans le cadre de la piézocision. | 103 |
| Figure 32 | Kit chirurgical pour Piézocision. | 104 |
| Figure 33 | Coupes transversales issues de CBCT avant et après traitement orthodontique chez un patient ayant subi une chirurgie de piézocision avec augmentation alvéolaire par tunnelisation. | 108 |
| Figure 34 | Capture d'écran montrant la conception du guide assistée par ordinateur à l'aide d'un logiciel superposant les données du CBCT à celles obtenues par empreinte optique des arcades. | 109 |
| Figure 35 | Photographies après impression du guide : positionnement et validation en bouche, incisions gingivo-muqueuses au travers des rainures et décortications alvéolaires | 110 |
| Figure 36 | Clichés intra-oraux avant et à l'issue du traitement orthodontique assisté par piézocision, mettant en évidence les brides cicatricielles. | 113 |
| Figure 37 | Images obtenues par *micro-CT* attestant de la présence de cratères radiculaires suite à la piézocision. | 114 |

| | | |
|---|---|---|
| Figure 38 | Lésion radiculaire et cicatrisation corticale incomplète observées par CBCT à l'issue d'un traitement orthodontique assisté par piézocision. | 114 |
| Figure 39 | Coupes transversales issues de CBCT montrant une encapsulation du matériau de greffe après piézocision et augmentation alvéolaire. | 116 |
| Figure 40 | Kit pour piézopuncture. | 124 |
| Figure 41 | Photographies illustrant les décortications de discision à l'aide d'un disque rotatif sur contre-angle sous irrigation abondante. | 127 |

# LISTE DES ABREVIATIONS

| Abréviation | Signification |
|---|---|
| ABO-OGS | *American Board of Orthodontics Objective Grading System* – Indice de stabilité des traitements orthodontiques. |
| AINS | Anti-inflammatoire non stéroïdien |
| ARN | Acide ribonucléique |
| BSP | *Bone Sialo-Protein* – Sialoprotéine osseuse |
| CDC | *Center for Disease Control and Prevention* – Centre pour le contrôle et la prévention des maladies. |
| CGRP | *Calcitonin Gene-Related Peptide* – Peptide relié au gène calcitonine. |
| CSF | *Colony Stimulating Factor* – Facteur de croissance hématopoïétique. |
| Ctr | *Copper Transporter* – Transporteur de cuivre |
| CTSK | *Cathepsin K* – Cathepsine K |
| DDP | Déplacement dentaire provoqué |
| EMR | Expansion maxillaire rapide |
| IVP | Insuffisance vélo-palatine |
| LAD | Ligament alvéolo-dentaire. |
| LCN | *Lacuno-Canalicular Network* – Réseau lacuno-canaliculaire |
| LIPUS | *Low-Intensity Pulsed Ultrasound* – Échographie pulsée de faible intensité. |
| LLLT | *Low-Level Laser Therapy* – Thérapie laser à faible intensité, aussi appelée photobiomodulation. |
| LMG | Ligne de jonction muco-gingivale. |
| M-CSF | *Macrophage Colony-Stimulating Factor* – Facteur stimulant la prolifération des macrophages |
| MEC | Matrice extra-cellulaire. |
| Micro-CT | *Micro-Computed Tomography* – Microtomographie aux rayons X. |
| MMP | *Matrix-Metalloproteinase* – Métalloprotéase matricielle |
| MOP | Micro-ostéoperforation. |
| MTDLD | *Monocortical Tooth Dislocation and Ligament Distraction* – Distraction ligamentaire et dislocation dentaire monocorticale. |

| | |
|---|---|
| OAT | *Overall Alignment Time* – Durée totale d'alignement orthodontique. |
| OCN | *Osteocalcin* - Ostéocalcine |
| OPG | Ostéoprotégérine |
| OPN | *Osteopontin* - Ostéopontine |
| PAOO | *Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics* – Mouvement orthodontique accéléré par stimulation ostéogénique du parodonte. |
| PAR | Phénomène d'accélération régionale, traduit de l'anglais RAP : *Regional Acceletory Phenomenon.* |
| PROMs | *Patient reported outcomes measures* – retours-patients, ressenti perçu et impact du traitement subi sur la qualité de vie |
| qPCR | *Quantitative Polymerase Chain Reaction* – Réaction en chaîne par polymérase quantitative, en temps réel. |
| RANK(-L) | *Receptor Activator of Nuclear Factor κB (-Ligand)* – Récepteur activant le facteur nucléaire κB (et son ligand) |
| RT-PCR | *Reverse Transcriptase Polymerase Chain Reaction* – Réaction en chaîne par polymérase à partir d'un échantillon d'ARN. |
| Sp | Substance P. |
| TAD | *Temporary Anchorage Device* – Dispositif d'ancrage temporaire. |
| TRACP-5b | *Tartrate-Resistant Acid Phosphatase 5b* – Phosphatase acide tartrate résistante 5b |
| TURC | *Tunnel Regenerative Corticotomie* – corticotomie régénérative par tunnelisation. |
| USPTO | *United States Patent and Trademark Office* – Bureau américain des brevets et marques déposées. |
| VEGF | *Vascular Endothelial Growth Factor* – Facteur de croissance endothélial. |

# INTRODUCTION

La durée moyenne des traitements actifs en Orthopédie Dento-Faciale est d'environ 2 ans (1). Elle représente une composante essentielle dans l'acceptation de telles thérapeutiques en particulier pour les patients adultes, souvent demandeurs de traitements courts (2,3).
Cette demande mène parfois les patients à s'orienter vers des alternatives thérapeutiques plus rapides mais beaucoup moins conservatrices.

De plus, il semblerait que plus la durée d'un traitement orthodontique est importante, plus la probabilité que des complications dentaires (résorptions radiculaires, leucomes précarieux – *white spot lesions*) (4–6) et parodontales (7–10) interviennent est importante, et plus la compliance des patients tend à diminuer. Ainsi, l'assiduité aux rendez-vous orthodontiques diminue d'en moyenne 23% quand la durée du traitement augmente de 6 mois, selon une étude de Bukhari *et al*. parue en 2016 (11).

Réduire la durée de ces traitements apparaît alors comme un défi majeur pour la recherche orthodontique, et un des moyens proposés et exposés dans la littérature est l'accélération chirurgicale du déplacement dentaire provoqué.

Il est essentiel de rappeler que le déplacement dentaire provoqué est permis par l'application de forces mécaniques sur les éléments dentaires à l'aide d'un dispositif orthodontique, induisant des réponses biologiques locales. Ce sont ces modifications biologiques qui permettent de promouvoir le déplacement des éléments dentaires à travers l'os (12).

Les techniques chirurgicales d'accélération orthodontique, par la réalisation de corticotomies, sont connues depuis le XIX$^{ème}$ siècle mais jusqu'à peu de temps, elles sont restées relativement invasives, souvent inconfortables pour le patient en termes de suites post-opératoires, et leur mise en œuvre était chronophage et onéreuse.
Elles étaient donc réservées à de rares cas, pratiquées par des chirurgiens oraux spécialisés et se heurtaient à une acceptation relativement limitée auprès des patients mais aussi à une certaine réticence des praticiens eux-mêmes (3).

Des techniques innovantes et moins invasives ont vu le jour, impliquant un allègement per-opératoire et post-opératoire, une réduction du coût, et une efficacité proche voire équivalente aux corticotomies classiques. La corticision, la micro-ostéoperforation (MOP) ou encore la piézocision en sont des exemples.

En 2020, ¼ des répondants orthodontistes américains ont eu recours à une procédure d'accélération du déplacement dentaire et pour ces praticiens, 5 patients par an en moyenne sont concernés par une telle procédure (13).

Notre objectif est de répondre à la question suivante : quel protocole le chirurgien oral peut-il proposer à ses confrères spécialistes orthodontistes et à leurs patients pour promouvoir le déplacement dentaire provoqué avec un rapport bénéfices / risques positif pour le patient ?

Dans une première partie, nous rappellerons les bases biologiques du déplacement dentaire provoqué, puis nous développerons la notion d'accélération chirurgicale du déplacement dentaire provoqué ainsi que les protocoles conventionnels de corticotomie. Enfin, nous nous intéresserons tout particulièrement aux protocoles récents de corticotomies minimalement invasives. Pour chacune des techniques étudiées, nous analyserons les avantages – inconvénients, les indications – contre-indications et le rapport bénéfices – risques retrouvés dans la littérature pour chacun d'eux, dans le but de répondre à notre problématique et voir si un protocole ou plusieurs semble(nt) supplanter les autres.

# CHAPITRE 1 :

# BASES BIOLOGIQUES DU DEPLACEMENT DENTAIRE PROVOQUE

`

Pour comprendre comment accélérer le déplacement des éléments dentaires il est indispensable de décrire les phénomènes biologiques à l'origine du déplacement dentaire provoqué.

Lors du déplacement orthodontique, des forces mécaniques continues sont appliquées sur un ou plusieurs éléments dentaires. De ces forces découle une réponse biologique au sein des tissus dentaires et parodontaux, se manifestant par des mécanismes moléculaires impliquant de nombreux éléments cellulaires et matriciels.

Cette réponse biologique aboutit à un remodelage parodontal, qui permet alors de diminuer les contraintes subies par le complexe dento-parodontal et de retrouver un équilibre momentanément perturbé par l'application d'une force.

## 1.1. D'UN STIMULUS MECANIQUE À UNE REPONSE BIOLOGIQUE

D'abord, voyons comment intervient la traduction d'un signal physique (force) en une réponse biologique.

Plusieurs théories ont été évoquées parmi lesquelles :

- La déformation de la matrice générée par la force appliquée, qui serait à l'origine de phénomènes piézoélectriques et de courants ioniques (14). Ceux-ci conduiraient à la stimulation de canaux ioniques induisant des modifications cellulaires. Toutefois cette hypothèse n'a pas été démontrée.
- La mécanosensibilité de certaines cellules : l'application d'une contrainte est responsable de variations structurelles et fonctionnelles de la matrice extra-cellulaire (MEC), du cytosquelette et des membranes cellulaires (15). Ceci se produit tant au niveau des tissus minéralisés qu'au niveau des tissus mous, grâce à des cellules contenant des structures mécanosensibles et capables de répondre à une modification de la MEC.

Par exemple, des sites de fixation focale membranaires sont exposés sur certaines cellules, sur lesquels se lient des protéines transmembranaires (intégrines $\alpha_3\beta_5$), assurant ainsi la liaison entre la MEC déformée et les protéines du cytosquelette. Cette fixation permet alors une déformation des cellules et l'activation de voies de signalisations intra-cellulaires complexes.

Les ostéocytes semblent jouer un rôle majeur dans la transduction du signal mécanique au sein de l'os alvéolaire, tandis que la mécanosensibilité au sein du LAD est assurée par les fibroblastes (16).

- La déformation des éléments vasculo-nerveux du LAD, dont découle une réponse inflammatoire (15,16) (Figure 1). C'est le mécanisme prégnant qui permet de décrire la traduction du stimulus mécanique en réponse biologique.

  L'écrasement des filets nerveux provoque une augmentation de la sécrétion de CGRP (*Calcitonin Gene-Related Protein* – peptide relié au gène calcitonine) et de substance P. Ces molécules régulent la sécrétion de facteurs de croissance, de cytokines et du CSF (*Colony Stimulating Factor* – facteur de croissance hématopoïétique), qui sont des signaux à l'origine d'une réponse inflammatoire.

  Par ailleurs, au niveau des capillaires a lieu une altération de surface des cellules endothéliales liée à la déformation de la MEC. On observe une vasodilatation associée à une angiogenèse, une extravasation de plasma, une invasion cellulaire (lymphocytes, monocytes, macrophages) ainsi qu'une production de molécules de l'inflammation. Ces molécules interagissent avec de nombreux types cellulaires selon un mode autocrine ou paracrine, permettant le déclenchement d'une réponse cellulaire (mobilité, différenciation, prolifération, sécrétion…).

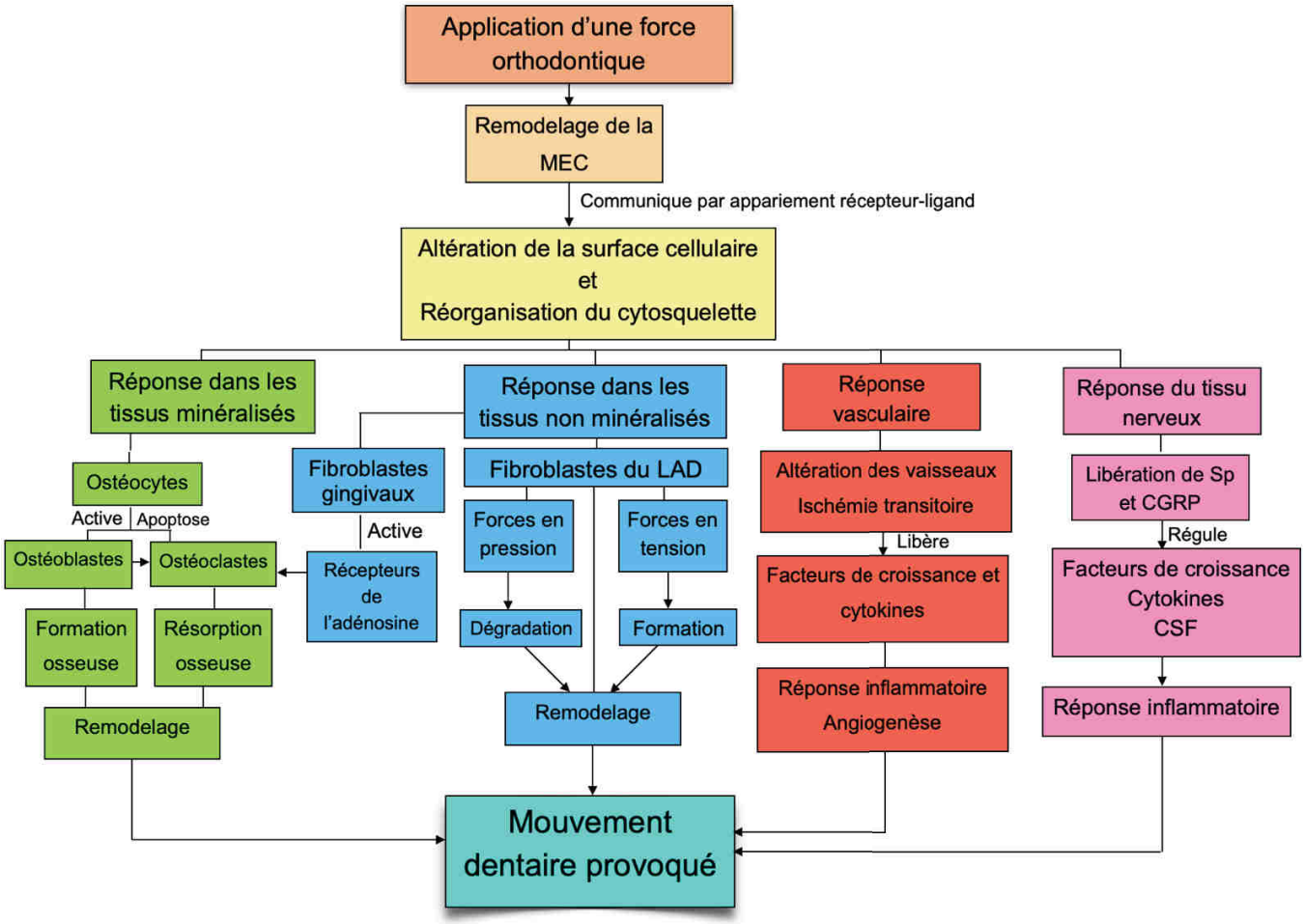



Figure 1 : Cet organigramme résume les phénomènes complexes de mécanotransduction et de réponse inflammatoire intervenant suite à l'application d'une force orthodontique, tant au niveau des tissus minéralisés que non-minéralisés. MEC : matrice extra-cellulaire – LAD : ligament alvéolo-dentaire – CGRP : peptide relié au gène calcitonine – Sp : substance P – CSF : facteur de croissance hématopoïétique. Production personnelle inspirée de Krishnan et Davidovitch, 2015 (16).

Intéressons-nous ensuite à la chronologie de cette réponse biologique. Elle peut se décomposer en des effets immédiats, à moyen-terme, et sur le plus long-terme.

## 1.2. EFFETS BIOLOGIQUES IMMEDIATS - PHASE INITIALE

L'application d'une force mécanique entraîne dans un premier temps des effets biologiques immédiats qui permettent l'initiation du déplacement.
Si plusieurs théories ont été évoquées au XX$^{ème}$ siècle pour expliquer l'initiation du déplacement orthodontique (Bien 1966, Baumrind 1969), une théorie prédomine à l'heure actuelle pour expliquer ces phénomènes biologiques immédiats.

• Théorie de la pression / tension par Schwarz (1932) (17) :

Selon cette théorie, lorsqu'une force est appliquée sur un élément dentaire, on différencie deux types de zones au niveau parodontal (Figure 2) :

- Les zones en pression : cela concerne les zones où le parodonte est comprimé, dans lesquelles a lieu une désorganisation du LAD, une diminution de la production de fibres, ainsi qu'une diminution de la réplication cellulaire en lien avec une constriction vasculaire (ischémie).

- Les zones en tension : le ligament est élargi et ses fibres sont étirées ce qui stimule la réplication cellulaire.

MD : site marginal en pression.
MZ : site marginal en tension.
O : centre de rotation.
AZ : site apical en tension.
AD : site apical en pression.

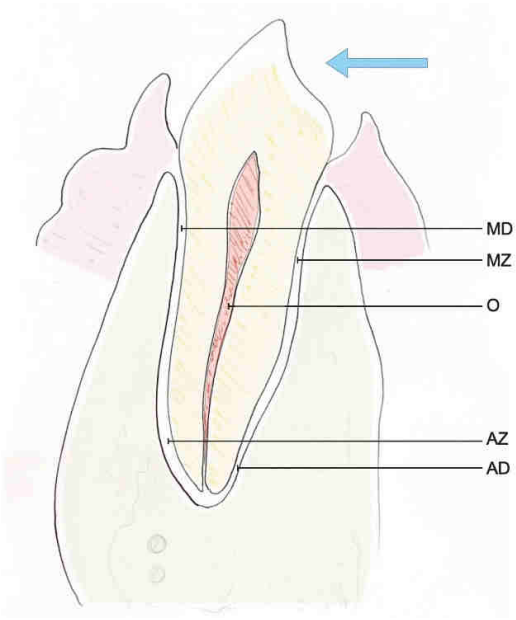



Figure 2. Schéma représentant une coupe sagittale d'un élément dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique en rotation (flèche).

Production personnelle inspirée d'une vue au microscope optique par Schwarz, 1932.

Les effets biologiques immédiats de cette mise sous pression / tension des sites parodontaux correspondent principalement à des phénomènes hydrodynamiques et élastiques. En effet, on observe un léger déplacement de la dent dans l'espace desmodontal au sein de l'alvéole, entraînant un échappement des fluides desmodontaux des côtés en pression vers les côtés en tension. En outre, on observe une légère déformation élastique de l'os alvéolaire (en adéquation avec la théorie de Baumrind de 1969).

Cette phase initiale du mouvement orthodontique intervient immédiatement, durant les premières heures suivant l'application de la force. Si cette dernière est interrompue, on assiste à un retour rapide aux conditions physiologiques.

## 1.3. EFFETS BIOLOGIQUES A MOYEN TERME

Quelques jours après le début de l'application de la force, des effets biologiques visant à recréer une homéostasie tissulaire momentanément perturbée interviennent (18).
Ces effets à moyen terme peuvent être décrits en deux phases successives : une phase de latence correspondant macroscopiquement à une absence de mouvement, puis une phase de post-latence durant laquelle le mouvement reprend.

### 1.3.1 Phase de latence / sidération

24 à 48 heures après le début de la phase initiale a lieu un arrêt du mouvement : c'est la période de latence.

Au niveau des sites en pression, on observe :

- Une constriction vasculaire provoquant une mort des éléments cellulaires privés de leurs apports en nutriments et en oxygène.

- Une modification de l'agencement des fibres desmodontales qui se tassent et se verticalisent. Elles prennent alors un aspect vitreux au microscope : on parle de zones hyalines - Reitan (1951) (19).

L'apparition des zones hyalines acellulaires et avasculaires entraîne une immobilisation de l'organe dentaire. En effet, en l'absence de vaisseaux et de cellules, aucun remodelage ne peut se faire. Les zones hyalines apparaissent environ 30 heures après l'application de la force orthodontique et disparaissent entre 10 et 40 jours plus tard. Ce délai varie en fonction de l'âge et du métabolisme du patient, ainsi que de l'étendue de ces zones hyalines qui est d'autant plus grande que la force appliquée est importante (20).

Schwarz affirme par ailleurs que l'apparition et l'étendue de ces zones hyalines dépendent du rapport entre la force appliquée et la pression sanguine des capillaires sanguins (17). En effet lorsque la force est supérieure à la pression intra-capillaire, on observe l'éclatement vasculaire à l'origine de la hyalinisation.

Il détermine ainsi que la force la plus favorable, dite « force idéale », doit avoir une valeur en-deçà de la pression sanguine intra-capillaire (15 - 20 mm Hg), les valeurs optimales étant ainsi comprises entre 20 et 26g par $cm^2$ de surface radiculaire. Ces valeurs autorisent un déplacement dentaire optimal tout en évitant la période de latence liée à la hyalinisation et permettant une résorption directe de toute la face en pression de l'os alvéolaire. Le remodelage osseux et par conséquent le déplacement dentaire débutent donc plus rapidement.

### 1.3.2 Phase de remodelage, le déplacement véritable

Cette troisième phase, aussi appelée phase de post-latence, correspond à la disparition des zones hyalines et à l'initiation de la résorption alvéolaire qui permettent la reprise du mouvement. C'est durant cette phase qu'a lieu le déplacement dentaire le plus important quantitativement ; celui-ci augmente graduellement ou subitement selon l'intensité de la force appliquée (16).

En effet, la résorption qui démarre en périphérie des zones hyalines va permettre de « décompresser » la zone en pression et ainsi autoriser une recolonisation vasculaire et cellulaire indispensable au remodelage. Elle est permise grâce à la synthèse de cytokines par les fibroblastes qui entraînent, par l'intermédiaire de la voie RANK-$RANK_L$, l'activation d'ostéoclastes fonctionnels à l'origine de la résorption (15).

On distingue deux types de résorption de l'os alvéolaire lors de cette étape :

- La résorption directe – latérale et frontale (Figure 3) : elle a lieu latéralement, sur le rempart osseux en pression au niveau de la lame criblée de l'os alvéolaire, au contact de la zone hyaline. On retrouve donc des ostéoclastes entourant la zone hyaline. Une fois la zone hyaline résorbée, on observe une résorption frontale directe de l'os.

- La résorption indirecte : elle a lieu en parallèle de la résorption directe, à distance du LAD dans des espaces médullaires et de la zone périostée voisins. Ces zones de résorption indirecte vont rejoindre le front de résorption osseuse directe ce qui aboutit à un élargissement de l'espace desmodontal permettant le déplacement.

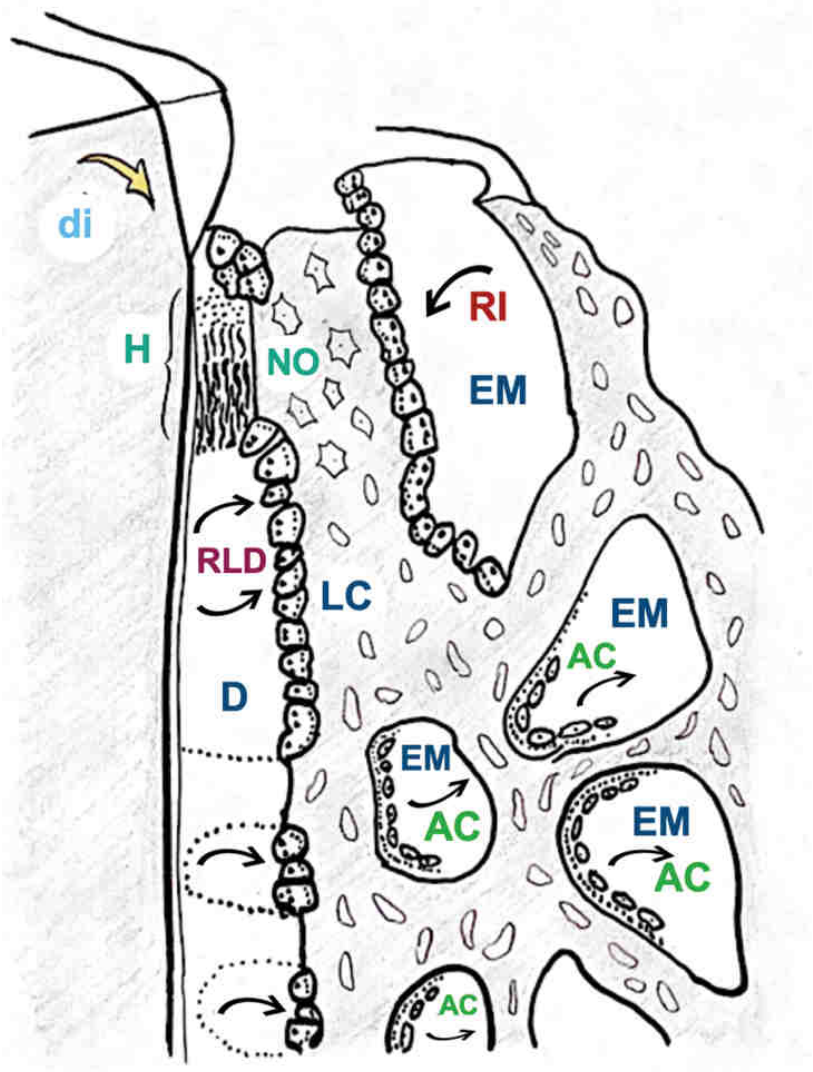
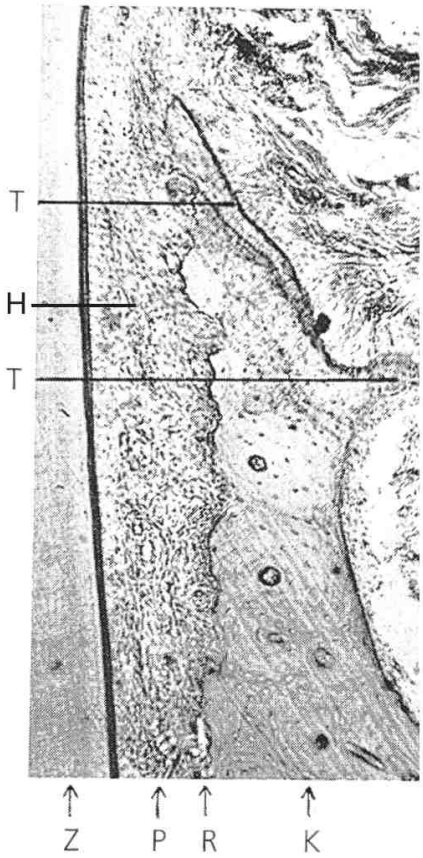



Figure 3. Le déplacement initial est une version (dans le sens de la flèche « di ») et entraîne l'apparition d'une zone hyaline (H) dans le desmodonte (D). A la périphérie de la zone hyaline a lieu une résorption latérale directe (RLD) de la lame cribriforme (LC) ; Dans les espaces médullaires (EM) apparaît une résorption ostéoclastique indirecte (RI) induite par une nécrose ostéocytaire (NO) et qui rejoindra le front de résorption directe. A distance, les espaces médullaires réagissent à la résorption directe par une apposition de compensation (AC). Reproduction personnelle d'un schéma issu de Boileau, 2011 (14).




T : os alvéolaire néoformé.
H : Zone hyaline.
Z : dent.
P : parodonte.
R : ligne de résorption latérale directe.
K : os alvéolaire ancien.

Figure 4. Coupe sagittale d'un organe dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique. Vue au microscope optique. Issue de Schwarz, 1932 (17)

Au niveau de la face en tension, on observe un élargissement de l'espace desmodontal égal en valeur absolue à la compression du côté opposé. Les fibres collagéniques sont étirées. Les fibroblastes mis en tension sécrètent un facteur de croissance endothélial (VEGF – *Vascular Endothelial Growth Factor*) aboutissant à l'angiogenèse. Cette prolifération vasculaire est facilitée par une dégradation de la MEC par l'intermédiaire de cytokines ($Il_1$-$Il_6$) synthétisées elles-aussi par les fibroblastes. Suite à cela a lieu une prolifération fibroblastique et la synthèse d'une matrice collagénique qui forme les nouvelles fibres du ligament.
Puis les ostéoblastes quiescents présents sur la surface osseuse, ainsi que les péricytes (cellules semblables aux fibroblastes) qui se développent autour des capillaires desmodontaux, se différencient en ostéoblastes actifs. Ces derniers migrent sur la surface

osseuse et débutent l'apposition d'un tissu ostéoïde très dur, le long des fibres de Sharpey.

La minéralisation de ce tissu par les ostéocytes débute quelques jours après son apposition (10 à 15 jours) et ne prend fin qu'au bout de 3 à 4 semaines : on obtient un os lamellaire néoformé dans lequel sont incluses les fibres desmodontales.

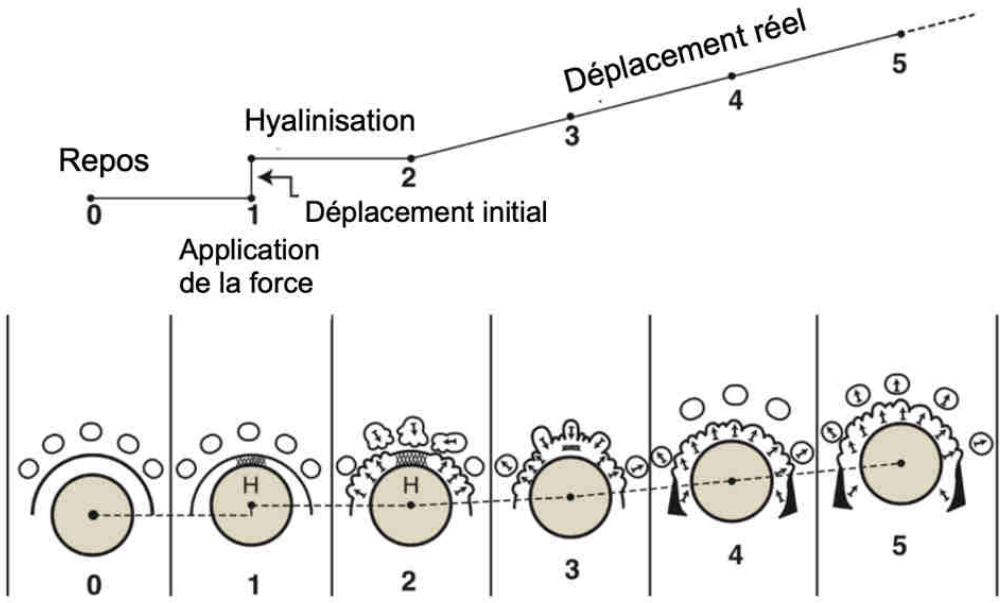



Figure 5. Correspondance entre la courbe de déplacement et les différents stades morphologiques de la réaction osseuse. Schéma issu de Boileau, 2011 (14).

### 1.4. EFFETS BIOLOGIQUES A LONG TERME

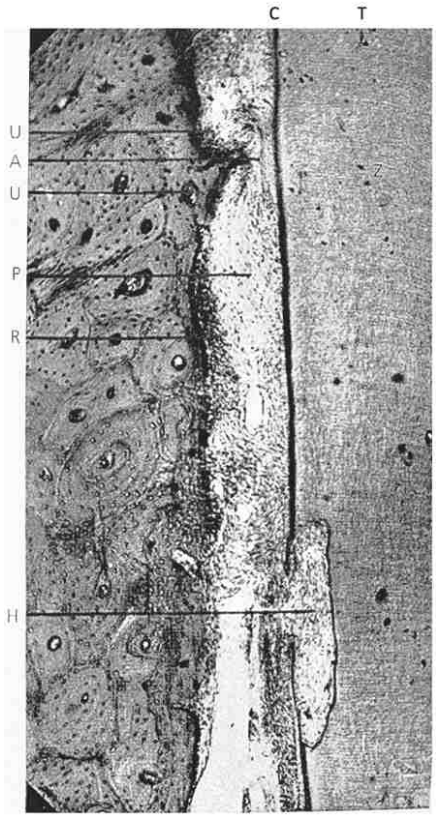
Pour résumer, le remodelage induit par la force orthodontique s'illustre biologiquement par :

- Une résorption osseuse supérieure à l'apposition au niveau des sites en pression du LAD, ouvrant ainsi la voie à la racine en déplacement.
- Le phénomène inverse se produit au niveau des sites en tension : une apposition quantitativement supérieure à la résorption a lieu. Cela permet de combler les « vides » laissés par le déplacement de la racine dentaire et de restaurer l'intégrité de l'attache parodontale.

N.B. : l'apposition est cependant beaucoup plus lente que la résorption : en effet, un site osseux résorbé en 2 à 3 semaines peut prendre plus de 3 mois pour être remplacé *in extenso* (16).

Le remodelage parodontal décrit ci-dessus permet une diminution progressive des contraintes subies par le complexe dento-parodontal. On retrouve peu à peu l'équilibre initial qui, une fois atteint, entraîne l'arrêt du remodelage orienté et une reprise du remaniement osseux physiologique.

Toutefois, si la force appliquée est trop importante, Schwarz décrit un probable impact irréversible sur les structures dentaires et parodontales impliquant notamment un risque élevé de résorption radiculaire (Figure 6). Dans certains cas extrêmes, une ankylose de la dent à l'os alvéolaire peut avoir lieu.




T : dent.
C : cément.
P : parodonte.
R : ligne de résorption alvéolaire avec grande densité ostéoblastique (étape d'apposition).
H : cavité de résorption ayant atteint la dentine radiculaire.

Figure 6. Coupe sagittale d'un site marginal en pression d'un élément dentaire et de son complexe parodontal ayant subi une force orthodontique élevée en rotation. Vue au microscope optique. Issue de Schwarz, 1932 (17).

Rygh et Brudvik démontrent une association entre l'élimination des zones hyalines et l'incidence de résorptions radiculaires iatrogènes (21).

En théorie, la force idéale serait donc une force permettant d'éviter l'apparition de zones hyalines ainsi que les phénomènes indésirables comme les résorptions radiculaires tout en étant suffisante pour maintenir une activité cellulaire et donc un remodelage.
S'il est difficile en pratique d'éviter la hyalinisation initiale, il est en revanche possible d'éviter sa récidive lors des nouvelles activations.

Le déplacement dentaire provoqué est un phénomène complexe qui découle de multiples évènements biologiques impliquant de très nombreux composants cellulaires et matriciels.

Plusieurs molécules ont été décrites comme participant à cette réponse biologique. Mais un modèle complet permettant de comprendre l'intégralité de cette réponse biologique reste à élucider.

Toutefois, nous savons que cette réponse tissulaire est principalement inflammatoire. Si nous connaissons à l'heure actuelle les grandes lignes de ce phénomène, il est aussi important de préciser que la réponse biologique peut varier selon plusieurs facteurs :

- Des facteurs thérapeutiques (type de mouvement, durée d'application des forces, type de traitement)
- Des facteurs locaux (type d'os, forme des racines…)
- Des facteurs généraux : âge du sujet, santé générale (pathologies, médication) (20,22).

Verna *et al*. (2000) démontrent un lien étroit entre l'effet produit par les forces mécaniques orthodontiques et le métabolisme osseux du sujet qui les reçoit (23). Le déplacement orthodontique est en effet réduit et plus lent chez le rat sur lequel on induit expérimentalement un faible remodelage osseux (hypothyroïdie provoquée par

l'administration d'un régime sans iode). À l'inverse, un *turnover* expérimentalement élevé (administration de levothyroxine 4 provoquant une hyperthyroïdie) est à l'origine d'un déplacement plus rapide.
Les auteurs de cette étude suggèrent donc qu'il est utile de prendre en compte le contexte physiopathologique du patient (maladies métaboliques notamment) ainsi que ses traitements médicamenteux, car ces données peuvent interférer avec le métabolisme osseux et par conséquent avec le déplacement des éléments dentaires. Cela démontre par ailleurs que la vitesse du déplacement orthodontique dépend grandement de phénomènes biologiques locaux et généraux.

L'accélération chirurgicale des traitements orthodontiques étant une thérapeutique principalement proposée chez le sujet adulte, il est intéressant de décrire les particularités physiologiques du parodonte adulte.

## 1.5. PARTICULARITÉS DU PARODONTE ADULTE ET INFLUENCE SUR LE MOUVEMENT PROVOQUÉ

Hunter au XVIII$^{ème}$ siècle est le premier à décrire un mouvement orthodontique plus lent chez l'adulte que chez l'enfant (16).
Reitan, en 1957, démontre que le LAD d'un sujet adulte contient une population cellulaire moins dense que celui d'un sujet jeune (24).

Plus généralement, le renouvellement cellulaire étant moins important chez l'adulte, cela se manifeste par des vitesses réduites d'apposition et de résorption osseuses. Le temps de latence décrit plus haut est ainsi plus long.

En effet, le recrutement des ostéoclastes permettant la résorption de ces zones hyalines et de l'os alvéolaire, est plus lent chez l'adulte et une population plus importante d'ostéoclastes est nécessaire pour obtenir un même déplacement (25).

Les mêmes auteurs montrent en revanche que, si le mouvement dentaire initial s'enclenche plus rapidement chez le sujet jeune (modèle murin), une fois que la phase

de mouvement linéaire est atteinte, le déplacement est équivalent chez les sujets jeunes et adultes (26).

La faculté de remodelage osseux persiste donc à l'âge adulte et elle est suffisante pour permettre le déplacement des dents même après l'arrêt de la croissance du squelette facial (27).

Par ailleurs, si une différence dans la durée des traitements orthodontiques est remarquée entre sujet jeune et sujet adulte, il n'est pas démontré de variations au-delà de 20-25ans, en dehors de toute pathologie systémique ou locale.

Les intervalles de contrôle et d'activation, ainsi que le niveau de force doivent être adaptés à l'âge du patient de sorte à éviter des phénomènes de hyalinisation répétés. Le remodelage osseux étant globalement plus lent, des activations moins fréquentes de l'appareil orthodontique peuvent ainsi être planifiées.

En lien avec une diminution de l'activité cellulaire et vasculaire du LAD (et de l'os), Brezniak et Wasserstein stipulent que chez l'adulte, le risque de résorption radiculaire lors de traitements orthodontiques est accru (28).

A l'âge adulte, nous avons donc la possibilité de déplacer des organes dentaires à l'aide de forces orthodontiques avec un résultat comparable au sujet jeune, cependant le parodonte réagit plus lentement.

Certaines solutions comme les corticotomies alvéolaires, permettent d'accélérer le déplacement provoqué chez le sujet adulte notamment. Voyons quels phénomènes biologiques régissent le mouvement orthodontique accéléré par corticotomie.

# CHAPITRE 2 :

# ACCELERATION CHIRURGICALE DU DEPLACEMENT DENTAIRE PROVOQUE

## 2.1. HISTORIQUE DES CORTICOTOMIES ALVEOLAIRES

### 2.1.1. Prémices

Il semblerait que le pionnier Hullihen, un des pères de la chirurgie orale, soit le premier à léser l'os alvéolaire dans le but de provoquer des mouvements dentaires rapides en 1849 (29–31).

Bryan en 1892 met lui aussi en application la corticotomie afin de corriger une malocclusion. Il rapporte plusieurs de ses cas à l'*American Dental Society*, suivi par son confrère Cunningham en 1893. Ce dernier évoque la possibilité d'une correction « immédiate » des malpositions dentaires grâce à ces interventions chirurgicales (32,33).

A la même période, des interventions similaires sont pratiquées de manière sporadique et ce jusqu'au début du 20ème siècle. En 1921, le chirurgien Cohn-Stock pratique lui aussi des corticotomies qui s'apparentent davantage à des ostéotomies palatines permettant une rétraction immédiate des dents antérieures (Figure 7) (34).

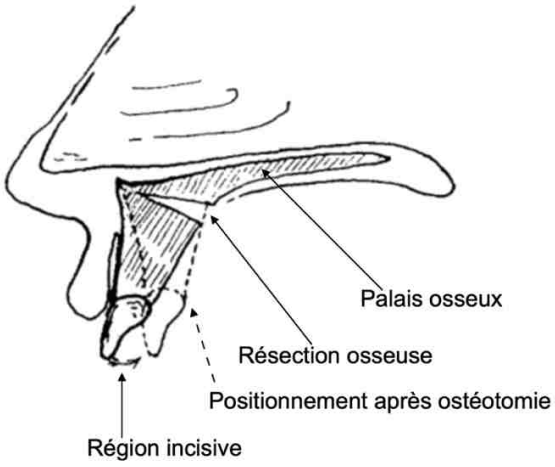



Figure 7. Croquis d'une ostéotomie palatine par Cohn-Stock,1921 (34).

Cependant ces techniques ne font pas consensus pour de multiples raisons, notamment la perte osseuse occasionnée localement par ces interventions, leur caractère invasif, ainsi que l'incidence importante des infections en cette « ère pré-antibiotique » (29).

### 2.1.2. La technique des blocs osseux (Köle, 1959)

En 1959, Köle, docteur au département de chirurgie maxillo-faciale de l'université de Graz en Autriche, réintroduit la corticotomie alvéolaire toujours dans l'idée de résoudre des malocclusions chez ses patients. Il décrit alors les bases chirurgicales des corticotomies modernes.

La technique proposée par Köle est la suivante : après élévation d'un lambeau d'épaisseur totale, le chirurgien réalise des corticotomies verticales inter-proximales (intéressant uniquement l'épaisseur de la corticale osseuse et laissant l'os médullaire intact) en vestibulaire et en lingual/palatin, reliées par une ostéotomie horizontale ultra-apicale (au-delà de l'apex). Celle-ci intéresse l'os cortical mais aussi toute l'épaisseur osseuse médullaire et implique donc une section de part-en-part de l'os alvéolaire (29,33,35,36).

Afin de préserver le paquet vasculo-nerveux apical, l'ostéotomie est réalisée 10 mm au-delà de l'apex (31) (Figure 8).

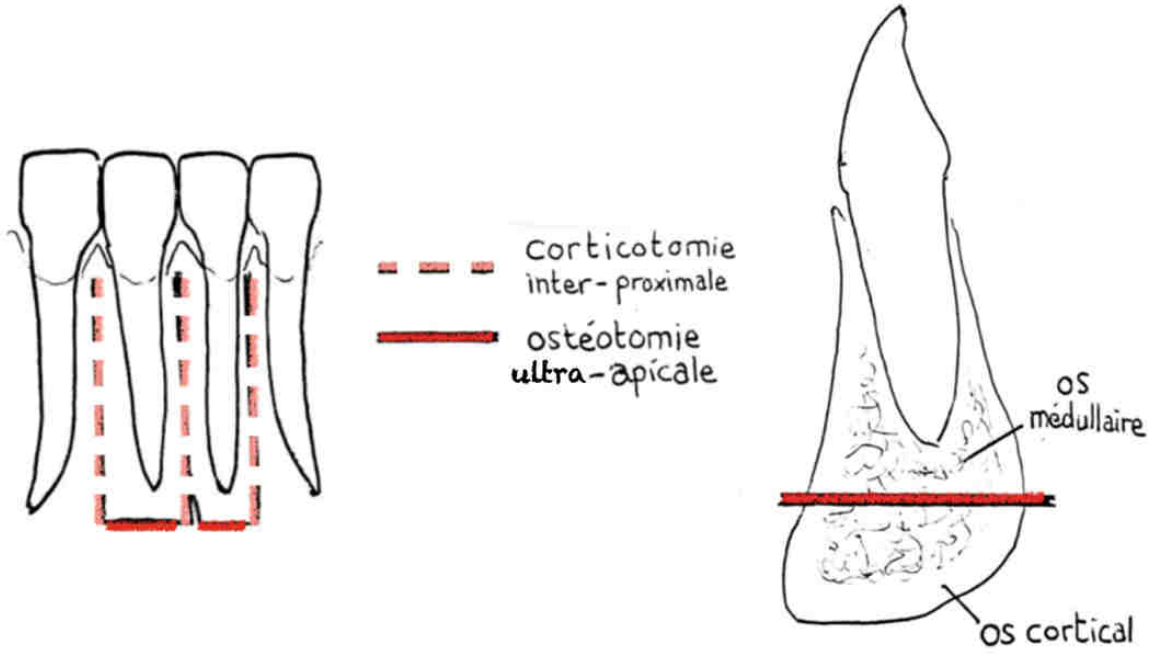



Figure 8. Schéma illustrant la technique des blocs osseux proposée par Heinrich Köle. Illustration personnelle.

Köle identifie ainsi l'os cortical comme une couche osseuse qui résiste au déplacement des éléments dentaires et qu'il faut fragiliser pour autoriser un mouvement orthodontique plus rapide.

Selon cette théorie, des « blocs osseux » amovibles doivent être créés chirurgicalement et mobilisés indépendamment les uns des autres (33,36). Pour cela, un appareil orthodontique multiattache doit être positionné avant la chirurgie puis activé directement après l'intervention. Il se sert donc des couronnes comme de véritables « poignées » pour mettre en mouvement les blocs osseux connectés uniquement par un os médullaire moins dense.

L'activation se fait à l'aide d'un arc rigide dans le but de générer des forces suffisantes à l'apparition de fractures en bois vert dans la région apicale (29). Ces fractures sont des fractures incomplètes, peu profondes et dont la cicatrisation est bonne et rapide. Ainsi, selon Köle, la quasi-totalité des cas est résolue en 6 à 12 semaines (29). Toutefois, il est important de préciser que les mouvements de finitions orthodontiques qui font aujourd'hui partie intégrante des traitements, n'étaient pas mis en œuvre à cette époque (37). Köle utilise ces corticotomies notamment dans la fermeture d'espace après avulsion ou pour la correction de malocclusions sévères.

Cette technique que l'on pourrait qualifier d'ostéotomie segmentaire s'inscrit pleinement dans une « théorie mécanique » du mouvement dentaire. Ce dernier serait alors permis grâce à une fragilisation ainsi qu'à une diminution de la résistance mécanique de l'os, liée au retrait de la couche la plus dense : la couche corticale. Ce protocole permet en outre, selon Köle, de préserver la vitalité des dents, de diminuer le risque de résorption radiculaire, et n'entraîne pas d'apparition de poches parodontales.

La technique des blocs osseux de Köle ne connait cependant que peu de succès auprès des chirurgiens oraux et des orthodontistes en raison de son caractère invasif et de ses résultats approximatifs : elle ne permet pas un alignement précis et prédictif des organes dentaires. En effet, les apex des dents ne sont en réalité quasiment pas déplacés : les dents sont donc inclinées vers la position souhaitée, et non translatées (29,36).

En 1978, Generson rapporte avec succès deux cas cliniques reprenant quasiment le même protocole mais en supprimant cette fois l'ostéotomie ultra-apicale et en ne retenant que les corticotomies inter-proximales, laissant l'os médullaire indemne (38). La modification de Generson est ensuite reprise par de nombreux auteurs comme Anholm en 1986 et Gantes en 1990, et devient la technique de référence pendant plusieurs décennies (39,40).

C'est Suya qui mène, en 1991, la première étude de grande envergure en reprenant la corticotomie modifiée par Generson (41). Il obtient sur 395 patients adultes japonais, des résultats très probants et la quasi-totalité des traitements est achevée en l'espace de 6 à 12 mois. Selon lui, cette technique permet en outre de réduire l'incidence des résorptions radiculaires iatrogènes (ce sont les blocs osseux qui se déplacent et non les dents elles-mêmes), ainsi que le risque de récidive à l'issue du traitement. Enfin il évoque une satisfaction importante des patients vis-à-vis de cette procédure orthodontico-chirurgicale en rapportant une douleur perçue à peine supérieure à celle des traitements orthodontiques conventionnels.

Suya, adhérant à la théorie mécanique des « blocs osseux », stipule que les mouvements orthodontiques les plus complexes doivent être achevés dans les 3 à 4 mois suivant la chirurgie, car à la fin de cette période les segments osseux fusionnent à nouveau entre eux.

Il faut attendre le 21ème siècle pour que cette théorie mécanique soit peu à peu abandonnée au profit d'une explication biologique introduite par les frères américains Thomas et William Wilcko.

## 2.2. BASES BIOLOGIQUES DU DEPLACEMENT DENTAIRE ACCELERE PAR CORTICOTOMIES

### 2.2.1 Le PAR, « phénomène d'accélération régionale » (Frost, 1981)

Avant de nous intéresser à l'apport des frères Wilcko concernant les corticotomies, il est important d'évoquer les principes biologiques qui les ont guidés.

L'orthopédiste américain Frost publie, entre 1981 et 1983, deux articles dans lesquels il introduit la notion de PAR : le « phénomène d'accélération régionale » qu'il explique de la manière suivante (42) (traduction de l'anglais) :

« Le PAR correspond à une réaction tissulaire complexe retrouvée chez les mammifères en réponse à un stimulus délétère. Ce phénomène intervient localement, implique à la fois les tissus mous et durs, et se manifeste par une accélération et une intensification de la plupart des processus tissulaires physiologiques. Il peut être comparé à un mécanisme d'urgence qui s'active pour potentialiser la guérison tissulaire ».

C'est donc en d'autres termes un phénomène physiologique d'accélération et d'augmentation majeures, transitoires et localisées du métabolisme et du remodelage tissulaire, impliquant le recrutement et l'activation de précurseurs nécessaires à la cicatrisation, en réponse à la lésion d'un tissu.

Il ne s'agit pas d'un processus distinct de la cicatrisation mais bien d'une accélération du processus physiologique de cicatrisation de 2 à 10 fois la vitesse habituelle.

Il explique que le stimulus à l'origine du PAR peut être une blessure, une fracture, une intervention chirurgicale (ostéotomie, artériotomie, greffes…), une infection, un processus inflammatoire non infectieux, ou encore une brûlure, une ischémie etc. Le PAR concerne les tissus osseux mais aussi vasculaires, nerveux, conjonctifs et fibreux, cartilagineux, etc.

Frost détermine que la durée du PAR est d'environ 4 mois au niveau osseux et qu'elle est inférieure au niveau des tissus mous. Il note aussi que cette durée est plus importante pour un stimulus de forte intensité.

C'est en adéquation avec les travaux de Frost que la corticotomie alvéolaire, autrefois considérée comme une technique permettant la mobilisation de blocs osseux contenant des éléments dentaires, apparaît désormais comme un stimulus à l'origine d'une accélération régionale du remodelage osseux. C'est le début de l'ère de l'orthodontie accélérée par corticotomie, basée sur des principes biologiques.

### 2.2.2. La théorie biologique du mouvement orthodontique accéléré : changement de paradigme

Si la simple force orthodontique suffit à créer un léger phénomène d'accélération régionale, à la suite des travaux de Frost, les chercheurs et cliniciens s'interrogent pour diminuer chirurgicalement la durée des traitements orthodontiques en s'appuyant sur ce phénomène et à démontrer l'implication du PAR dans l'accélération consécutive aux corticotomies alvéolaires.

En 1985, Shih et Norrdin montrent de façon expérimentale chez le chien l'implication de ce phénomène après une lésion de l'os alvéolaire par corticotomie (43). La cicatrisation était ainsi accélérée via des pics transitoires de remodelage tissulaire impliquant les tissus durs comme les tissus mous.

En 1994, Yaffe décrit un PAR au niveau des mâchoires de rats en réponse à la seule élévation de lambeaux muco-périostés, sans même avoir pratiqué une ostéoplastie (44). Il met en évidence, à l'aide de la microradiographie de haute résolution, de volumineuses plages radioclaires dans l'os alvéolaire mais aussi dans l'os basal à proximité des sites où le lambeau a été élevé. Ces plages peuvent être corrélées à des zones où la densité osseuse est faible (ostéopénie) et où le remodelage osseux est intense.

L'hypothèse d'un PAR en lien avec les corticotomies alvéolaires a ensuite été validée par de nombreuses études sur le chien notamment (45–50).

D'autres essais sur l'animal démontrent que les deux caractéristiques principales de ce phénomène sont l'ostéopénie régionale et l'accélération du métabolisme osseux, toutes deux responsables de la facilitation du mouvement dentaire provoqué (51–54).

En 2000, Hajji publie une étude clinique dans laquelle elle compare 3 modalités de traitements d'encombrements mandibulaires : un traitement conventionnel avec extractions, un traitement conventionnel sans extraction et un traitement sans extraction assisté par corticotomies alvéolaires (55). Elle obtient un temps de traitement drastiquement diminué dans ce dernier groupe, mais son étude vise aussi à expliquer les phénomènes impliqués : elle prévoit la mise en place d'un essai en bouche fractionnée (*split-mouth design*) au sein du groupe avec corticotomies. Ainsi, chez chaque patient de ce groupe, deux motifs de corticotomies sont prévus : sur l'hémi-arcade gauche, des corticotomies segmentaires (interdentaires et ultra-apicales) sont réalisées, en adéquation avec les principes mécaniques de fragilisation osseuse, tandis que sur l'hémi-arcade droite, de simples perforations corticales sont réalisées sur le rempart alvéolaire vestibulaire. Aucune différence significative d'accélération entre les 2 types de corticotomies n'est détectée ce qui va à l'encontre de la théorie mécanique : malgré une fragilisation osseuse supérieure du côté gauche, l'accélération du déplacement dentaire n'est pas supérieure.

A partir de 2000, les frères William et Thomas Wilcko (respectivement orthodontiste et parodontologue) sont les premiers à pratiquer chez l'Homme la corticotomie alvéolaire en accord avec les principes biologiques de Frost et en s'inspirant des résultats obtenus par Hajji.

Après avoir comparé les scanners préopératoires, postopératoires et en fin de traitement actif orthodontique de deux patients traités par corticotomie alvéolaire, les frères Wilcko ne trouvent aucun élément radiographique attestant d'un potentiel déplacement de blocs osseux ou de leur cicatrisation, comme la théorie mécanique le sous-entend (37). Ils observent en revanche une déminéralisation osseuse transitoire et localisée suivie d'une

reminéralisation, en adéquation avec le PAR. Par ailleurs, les images obtenues en fin de traitement orthodontique accéléré par corticotomie sont comparables à celles qu'ils obtiennent après un traitement orthodontique conventionnel. Ils présument donc que la corticotomie entraîne non pas un mouvement de segments osseux – et par extension des dents qu'ils contiennent, mais bel et bien une accélération du mouvement des dents elles-mêmes au sein de la matrice osseuse qui les entoure.

Ils déduisent par ailleurs que la diminution d'incidence et de sévérité des résorptions radiculaires apicales iatrogènes observée est en fait liée au remodelage osseux qui s'intensifie et qui permet aux racines de se déplacer dans un environnement moins dense et contraignant. Ils se basent notamment sur une étude de Goldie et King sur le modèle murin concluant qu'un os alvéolaire moins dense (induit par un régime pauvre en calcium et par l'allaitement) est associé à une diminution de l'incidence des résorptions radiculaires (51). Une étude sur le chien confirme plus tard cette hypothèse : la corticotomie entraîne une diminution de la hyalinisation du ligament et de la résorption radiculaire apicale (54).

La comparaison des scanners effectuée par Wilcko et Wilcko avant et après l'intervention montre chez certains patients l'apparition de déhiscences vestibulaires importantes. Ils remarquent que ces déhiscences interviennent préférentiellement lorsque l'os était déjà fin et fragile avant la chirurgie. Ils décident donc de compléter le protocole pour le rendre plus prédictible en y associant une augmentation alvéolaire (greffe osseuse). Un brevet est déposé en 2000 auprès de l'USPTO (*United States Patent and Trademark Office* : le bureau américain des brevets et marques déposées), et leur technique est appelée *Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics* ou PAOO, pouvant être traduite comme un « mouvement orthodontique accéléré par stimulation ostéogénique du parodonte » (36,37).

Au fil des cas rapportés par les frères Wilcko dans les années 2000, ils stipulent que (56):

- Le traumatisme généré au niveau de l'os cortical par la corticotomie provoque la mise en place d'un PAR, durant lequel les tissus durs et mous se réorganisent.

- Ce PAR débute quelques jours après la chirurgie, avec un pic à 1 ou 2 mois, et dure environ 4 mois.

- Il se manifeste par une activité catabolique : une déminéralisation de l'os alvéolaire à l'origine d'une ostéopénie (diminution de la densité osseuse) localisée et transitoire laissant place à une matrice osseuse molle et collagénique. Bien que la densité osseuse soit diminuée, le volume de la matrice osseuse reste le même. Puis 3 à 4 mois après la chirurgie, le PAR se dissipe : une reminéralisation osseuse progressive prend place et l'os retrouve sa densité initiale grâce à une activité osseuse anabolique. Un aspect radiographique normal réapparaît progressivement.

- Ils préconisent enfin l'adjonction d'un matériau de greffe osseuse pour prévenir l'apparition de déhiscences / fenestrations osseuses ou leur aggravation.

Plus tard, l'ostéopénie qui constitue l'étape biologique majeure de l'accélération du mouvement orthodontique, est mise en évidence chez l'Homme grâce à des outils radiographiques (tomographie à faisceau conique) (57,58). Elle est détectée par une diminution importante de la radio-opacité osseuse sur les clichés radiographiques qui débute quelques semaines après la chirurgie.

Ces phases catabolique et anabolique sont mises en évidence histologiquement pour la première fois par Sebaoun *et al.* en 2008, à l'aide de marqueurs tissulaires chez le rat (59). Cette étude est la première à réellement démontrer l'hypothèse émise par Wilcko et Wilcko selon laquelle, de manière consécutive à une décortication alvéolaire, a lieu une déminéralisation osseuse induite, locale et transitoire, suivie d'une reminéralisation.

Sebaoun constate en effet, 3 semaines après avoir pratiqué des corticotomies et à proximité immédiate du site chirurgical (chez le rat) :

- Un triplement des activités ostéoblastiques et ostéoclastiques.

- Une matrice spongieuse 2 fois moins minéralisée.

- Un espace ligamentaire 2 fois plus grand.

- A distance du site, soit au-delà d'une dent avoisinant le site lésé, aucun changement de métabolisme n'est mesuré : cela confirme le caractère localisé du PAR.
- A 7 semaines, il montre un retour à une situation tissulaire quasiment normale. Cela confirme le caractère ponctuel du PAR.

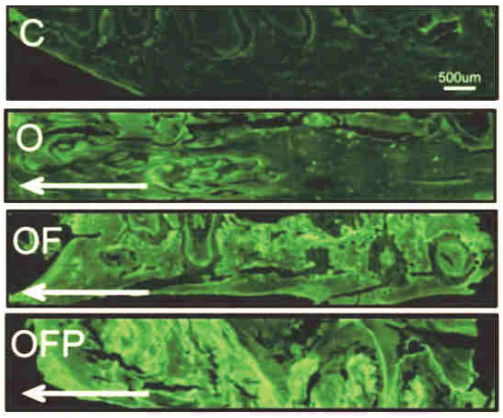
L'auteur qualifie ainsi ce phénomène de « fenêtre d'opportunité spatio-temporelle localisée ».

Sebaoun montre par ailleurs que le remodelage du LAD est certes stimulé par les décortications, mais c'est la composante spongieuse de l'os alvéolaire qui est plus largement impliquée dans l'accélération du déplacement dentaire.

En 2010 et 2011, deux études sur le rat de Teixeira *et al*. et Baloul *et al*. viennent confirmer ces données à l'échelle tissulaire et moléculaire (60,61). Une hausse de l'expression de cytokines inflammatoires est mesurée dans le groupe expérimental par RT-PCR (*Reverse Transcriptase Polymerase Chain Reaction* : réaction en chaîne par polymérase à partir d'un échantillon d'ARN).

Une augmentation de l'ostéoclastogenèse (corrélée aux marqueurs M-CSF, OPG, et RANKL) et de l'activité ostéoclastique (CTR, TRACP-5b, Ctsk) est aussi mesurée par qPCR (*Quantitative PCR* : PCR en temps réel) et par immunohistochimie.

Un remodelage osseux et une ostéoporosité accrus sont relevés par microradiographie et microscopie à fluorescence. Enfin, la phase anabolique est mise en évidence par la mesure des marqueurs de l'activité ostéoblastique (OPN, BSP, OCN) dont l'expression est augmentée.




C : groupe contrôle.

O : orthodontie seule.

OF : orthodontie + lambeau.

OFP : orthodontie + lambeau + perforations corticales.

Figure 9. Coupes sagittales de maxillaires de rats des 4 groupes étudiés par microscopie à fluorescence. L'intensité de la fluorescence est proportionnelle au remodelage osseux. Image issue de Teixeira, 2010 (60).

Enfin, en accord avec les travaux de Frost, Wilcko *et al.*, Cohen *et al.* et plus récemment Kernitsky *et al.* montrent que l'intensité du PAR ainsi que l'accélération du déplacement orthodontique sont d'autant plus grandes que la chirurgie est invasive (58,62,63).

Les étapes biologiques successives aux corticotomies alvéolaires qui sont connues à l'heure actuelle sont décrites dans une publication de Feller *et al*. en 2019 (64). Le traumatisme tissulaire provoqué par les corticotomies entraîne une libération intense de médiateurs biologiques par les cellules locales, dans leur microenvironnement. Ce sont ces médiateurs qui promeuvent le remodelage osseux et la cicatrisation tissulaire. Les étapes décrites ci-dessous proviennent de Feller *et al*. (2019) :

- L'agression des tissus osseux entraîne l'activation locale de plaquettes, macrophages et monocytes. Ces cellules libèrent des facteurs de croissance et cytokines (PDGF, FGF, VEGF, IGF, BMP, interleukine 1 β, TNFα) qui contribuent à l'installation d'une phase inflammatoire aiguë. Ces molécules stimulent la différenciation de cellules progénitrices ostéoblastiques, ostéoclastiques et endothéliales, aboutissant à un remodelage osseux (résorption/ostéopénie locale et temporaire, puis ostéoformation) et à une angiogenèse intenses. Un os ostéoporotique étant plus enclin à promouvoir le déplacement induit qu'un os à la densité normale, il en résulte une accélération de ce déplacement.

- Les dégâts tissulaires consécutifs à la chirurgie entraînent par ailleurs une altération des vaisseaux sanguins locaux et une désorganisation de la matrice-extracellulaire. Il en résulte d'une part une libération de facteurs de croissance, et d'autre part une diminution locale du débit sanguin et une perturbation du réseau lacuno-canaliculaire (LCN – *Lacuno-Canalicular Network* : réseau formé par les cellules dendritiques interconnectées que sont les ostéocytes, au sein de la matrice osseuse). Ces perturbations déclenchent des cascades de signalisation moléculaires intra-cellulaires dans le LCN qui mènent à la sécrétion de médiateurs comme l'oxyde nitrique, la prostaglandine E2 ou le TGF β. Ces molécules interfèrent avec le remodelage osseux et participent à son accélération.

- Dans le LAD, suite au traumatisme osseux a lieu une hyperémie, un œdème et donc un élargissement desmodontal ainsi qu'une infiltration de cellules inflammatoires. Il en résulte une modification des propriétés viscoélastiques du LAD et osseuses, et une libération de MMP (*Matrix metalloproteinases* – métalloprotéases matricielles) ainsi que d'autres agents cataboliques. Ceux-ci aboutissent à une réorganisation de la MEC et une augmentation de l'élasticité osseuse, favorisant une accélération du déplacement induit.

- Parallèlement à cela, des étapes observées dans d'autres types de lésions osseuses (élongations coronaires par exemple) sont susceptibles d'intervenir suite aux corticotomies. Parmi elles la formation d'un caillot sanguin fibrineux qui sert de matrice ostéoconductrice pour les cellules progénitrices mésenchymateuses provenant de la moelle osseuse et pour les péricytes pluripotents des petits vaisseaux sanguins adjacents. Le développement de ces cellules au sein du caillot mène à leur prolifération et différenciation en cellules endothéliales et ostéoblastes, et ainsi à un remplacement progressif du caillot par un tissu ostéoïde qui sera minéralisé dans un second temps. C'est de cette manière que les lésions osseuses cicatrisent au niveau des sites décortiqués.

Les corticotomies du XXI$^{ème}$ siècle, introduites par les frères Wilcko, n'ont donc plus pour vocation de constituer des segments osseux mobilisables mécaniquement, contrairement à ce que préconisait la théorie des blocs osseux ayant prévalu jusque-là. Elles ont désormais pour objectif de scarifier superficiellement l'os alvéolaire afin d'induire, par le biais d'un PAR, une augmentation du métabolisme osseux local ainsi qu'une déminéralisation osseuse réversible. La matrice déminéralisée qui en résulte favorise le déplacement des racines en son sein, puis se reminéralise lorsque le PAR s'atténue.

L'os cortical n'est dès lors plus perçu comme un obstacle ou une barrière, mais comme un tissu indispensable qui, lorsqu'il est activé par un stimulus même de faible intensité, provoque une activation ostéoclastique (65).

Si les phénomènes biologiques principaux impliqués dans l'accélération du déplacement orthodontique sont désormais connus, leur déroulement précis est encore étudié à l'heure actuelle.

## 2.3. PROTOCOLES ACTUELS : CORTICOTOMIES MODERNES

La technique de corticotomie proposée par Köle et mise à jour par les frères Wilcko dans les années 2000 a montré des résultats probants dans l'accélération des traitements orthodontiques. Elle a été validée par de nombreuses études précliniques mentionnées précédemment mais également au travers de nombreux rapports de cas et essais cliniques contrôlés et randomisés (48,50,56–58,66–71). La compréhension des phénomènes sous-jacents à cette technique a largement évolué, d'une théorie mécanique à une explication biologique.

### 2.3.1. La technique de référence (Wilcko *et al.*, 2000)

En accord avec les principes biologiques évoqués précédemment, les frères Wilcko revisitent la technique de corticotomie alvéolaire utilisée jusqu'alors, en y associant notamment une augmentation alvéolaire. Ils détaillent les étapes orthodontico-chirurgicales au travers de plusieurs cas publiés entre 2000 et 2008 (56,58,66), et

nomment leur technique « PAOO » (*Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics*) ou encore « *Wilckodontics ».*

C'est leur protocole qui prévaut durant les années 2000. En 2020, 13% des répondants orthodontistes américains ont recours à cette procédure de manière routinière alors qu'ils n'étaient que 2% en 2014 (13), et cela en fait la technique chirurgicale d'accélération du déplacement orthodontique la plus fréquemment utilisée.

Sebaoun décrit la technique des Wilcko comme une « technique novatrice d'ingénierie tissulaire » (59).

#### 2.3.1.1. Protocole

Le protocole tel qu'il est décrit par Wilcko et Wilcko est le suivant :

Préalablement à l'intervention :

- Mise en place et activation du dispositif orthodontique durant la semaine précédant l'intervention (72). D'autres auteurs prévoient l'activation immédiatement après l'intervention (73). Des brackets et des fils standards sont utilisés, ainsi que des forces normales.
- Un examen radiographique est réalisé : bilan long cône et/ou tomographie volumique à faisceau conique.

Le jour de l'intervention :

- Désinfection buccale par bain de bouche : chlorhexidine 0,12 % ou polyvidone iodée.
- Anesthésie locale : les infiltrations sont réalisées d'abord au niveau muqueux puis au niveau de la gencive attachée, à distance des papilles interdentaires et de la gencive libre. Une injection sous-périostée est possible pour faciliter le décollement d'un lambeau de pleine épaisseur.
- Réalisation d'une incision sulculaire classique sur les versants vestibulaires et linguaux / palatins à la mandibule et au maxillaire.

- Un lambeau muco-périosté, de pleine épaisseur, est élevé en vestibulaire mais aussi en lingual / palatin des dents maxillaires et mandibulaires. Tout tissu inter-dentaire / papillaire persistant est laissé en place et préservé au mieux pour potentialiser la cicatrisation de ces zones primordiales. Le lambeau est élevé au-delà des apex, à l'exception de la zone palatine (car l'os palatin vient se stabiliser au-dessus des apex des dents maxillaires). Le décollement des lambeaux se fait en prenant soin de ne pas léser les structures neuro-vasculaires rencontrées, notamment l'émergence antérieure du nerf alvéolaire inférieur, l'insertion ventrale du muscle génio-glosse (au niveau de la face interne de la symphyse mandibulaire) ou le foramen palatin.

- Les corticotomies sont ensuite réalisées à l'aide d'une fraise à os en carbure de tungstène (type fraise boule long col, ou une fraise de Lindemann, conique et fine), à haute vitesse, sur pièce à main et avec une irrigation abondante. Elles intéressent la totalité de l'épaisseur corticale et pénètrent très superficiellement l'os médullaire, en vestibulaire comme en lingual / palatin. Elles sont réalisées uniquement au niveau des dents qui doivent être déplacées orthodontiquement, mais pas des dents qui peuvent servir d'ancrage. Dans le cadre d'une fermeture d'espace, elles sont réalisées en regard du site qui doit être fermé. Une bonne communication entre l'orthodontiste et le chirurgien est donc indispensable.

  William Wilcko préconise de débuter par des décortications linéaires et verticales qui débutent quelques millimètres à distance de la crête alvéolaire et se terminent au-delà des apex (Figure 10 A-B). Puis une corticotomie festonnée horizontale ultra-apicale est réalisée et relie les incisions verticales entre elles, 2 à 3 mm au-delà de l'apex. Le tracé circonscrit donc le contour anatomique des racines dentaires, tout en gardant une distance indispensable pour ne pas léser le LAD ou le pédicule vasculo-nerveux apical.

  Enfin, de nombreuses perforations ponctiformes du diamètre de la fraise utilisée sont ensuite réalisées, partout où cela est possible en fonction de l'épaisseur corticale (qui doit être supérieure à 1 ou 2 mm) (Figure 10 A-B). Aucune luxation n'est prévue durant l'intervention.

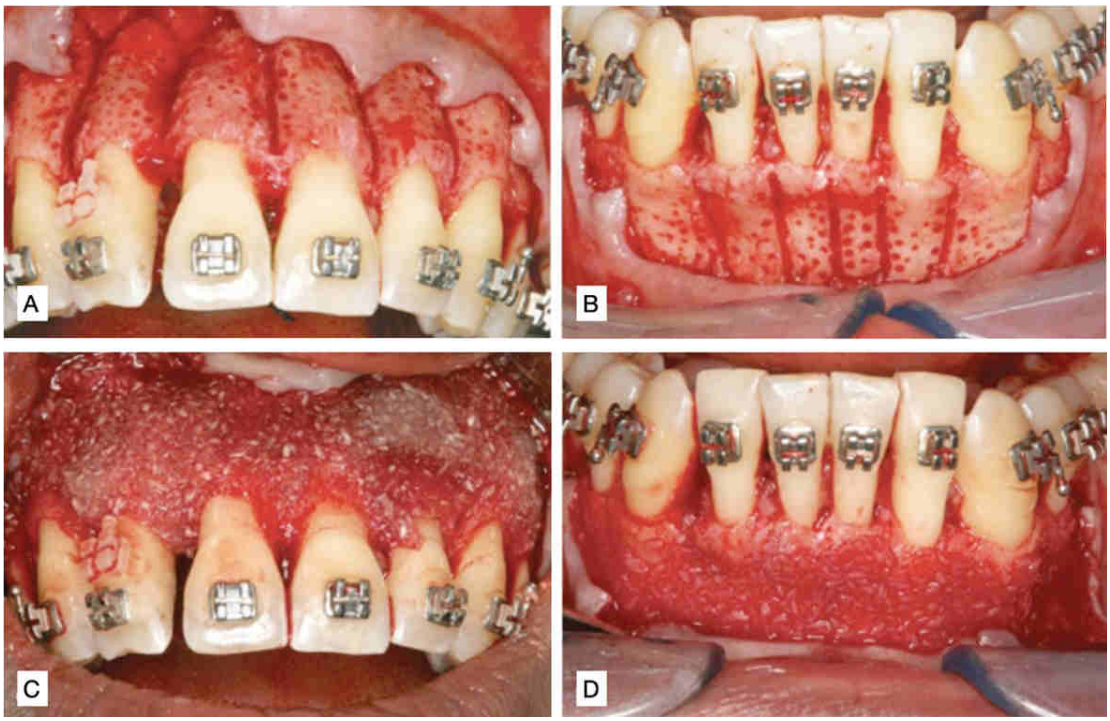



Figure 10. Photographies illustrant la technique chirurgicale de PAOO, vues antérieures intra-orales peropératoires. A-B : Après élévation du lambeau, des décortications combinant des entailles circonscrites et des points sont réalisées. C-D : Augmentation alvéolaire. Images issues de Proffit, 2018 (29) et photographiées par Dr. Dibart.

- Puis les frères Wilcko sont les premiers à proposer une greffe osseuse à la suite des décortications (Figure 10 C-D). Un apport de biomatériau osseux est ainsi réalisé à raison d'environ un centimètre cube par dent à déplacer. Dans certains cas il s'agit d'un mélange de particules osseuses d'origines humaine (*DFDBA* - Allogreffe Osseuse Congelée Déminéralisée) et de xénogreffe (Bio-Oss® – Geistlich Pharma, 0,25 à 1 mm, origine bovine) en quantités égales ou selon un rapport de 2:1. Dans d'autres cas rapportés, le matériau est d'origine synthétique. Les particules du matériau sont préalablement réhydratées avec du sérum physiologique, et/ou trempées dans une solution antibiotique (phosphate de clindamycine 10mg / mL) avant d'être appliquées sur les zones décortiquées, sans excès pour ne pas compromettre la fermeture sans tension des lambeaux. L'épaisseur de la couche de matériau atteint en moyenne 2 à 3 mm, et peut être supérieure en présence de zones de déhiscence ou de fenestration. L'utilisation d'une membrane n'est pas décrite dans la technique de Wilcko car, selon

l'auteur, les corticotomies réalisées suffisent à assurer la rétention et le plaquage du matériau, et le périoste jouerait le rôle de barrière biologique entre les tissus mous et la greffe.

- Les lambeaux sont ensuite suturés à l'aide de fil 4-0 ou 5-0 PTFE (polytétrafluoroéthène) non-résorbable par des points simples. Thomas Wilcko prévoit un seul point simple interdentaire par papille en postérieur, tandis que 2 points par papille sont réalisés en antérieur (un en mésial et un en distal de chaque papille). Notons que si la fermeture passive des berges n'est pas obtenue sans tension, une incision en épaisseur partielle sur la partie apicale du lambeau peut être réalisée. Les fils sont retirés 2 semaines après la chirurgie.

- Une ordonnance post-opératoire est délivrée au patient. Elle prévoit :

  - Un antibiotique à titre préventif. Chez Wilcko, c'est la pénicilline V 250mg 4 fois par jour pendant 7 à 10 jours selon les cas rapportés. Une prescription équivalente pourrait être : amoxicilline 2g par jour pendant une semaine.

  - Un antalgique : chez Wilcko, l'hydrocodone APAP 7,5/650mg (analgésique opioïde à base de codéine, comparable à la morphine) est prescrite. A titre de comparaison, un antalgique de pallier II comme l'association paracétamol-codéine 400/20mg peut être prescrit. Dans d'autres études, du paracétamol seul est prescrit à raison de 1000mg toutes les 6h jusqu'à disparition des douleurs.

  - Un anti-inflammatoire : chez Wilcko, c'est le naproxène sodique 550mg (anti-inflammatoire non stéroïdien – AINS) à arrêter dès que possible par le patient. Il est par ailleurs indiqué de ne plus prendre d'AINS au-delà d'une semaine après la chirurgie, et ce jusqu'à la fin du traitement orthodontique. D'autres auteurs proscrivent catégoriquement les AINS en raison d'une potentielle interaction avec les mécanismes inflammatoires et donc avec le PAR.

  - Bain de bouche à la chlorhexidine 0,12 % pendant 1 semaine, matin et soir.

- Des conseils postopératoires classiques sont remis au patient impliquant notamment l'application locale de froid, un rinçage au bain de bouche antiseptique prenant le relai sur le brossage localement durant les premiers jours, suivi de l'utilisation d'une brosse à dent chirurgicale jusqu'au retrait des fils etc.

- Des contrôles orthodontiques sont prévus en moyenne toutes les deux semaines (le délai varie entre 1 et 3 semaines), jusqu'à la fin du traitement. Un fil et / ou une gouttière de contention orthodontique sont ensuite prévus à la fin du traitement pour pérenniser le résultat.

#### 2.3.1.2. Intérêts de la PAOO

La technique PAOO présente, selon les auteurs, plusieurs intérêts :

##### 2.3.1.2.1 Une réduction de la durée totale du traitement

Il s'agit d'un protocole qui a fait ses preuves dans la littérature et la majorité des études conclut à une accélération conséquente du déplacement orthodontique (48–50,57).

La plupart des traitements d'encombrements modérés rapportés par Wilcko et Wilcko chez l'enfant et l'adulte est résolue en 6 à 8 mois contre 18 à 24 mois sans PAOO, soit une durée totale de traitement réduite d'un facteur 2,25 à 4 (56,58,66–68).

Hajji confirme cette accélération avec un protocole identique au travers d'un essai randomisé contrôlé en bouche fractionnée (*split-mouth design*) : la durée totale du traitement est de 6,1 mois en moyenne pour les cas avec PAOO sans extraction contre 18,7 et 26,6 mois pour les groupes sans PAOO, respectivement sans et avec extraction (55).

En 2007, dans une étude rétrospective sur 145 patients, Fernándes et Mascaranhas concluent à un temps de traitement significativement diminué avec corticotomies (7,6 ± 2,5 mois) en comparaison au traitement orthodontique seul (23,7 ± 7,2 mois), sur des cas de dysharmonie dents-arcade de Classes I et II (69). Cela correspond à un traitement mené 3 fois plus rapidement par rapport à la technique conventionnelle.

Fulk obtient également un temps de traitement environ 3 fois plus rapide avec PAOO (6,6 ± 1,8 mois contre 20,7 ± 6,5 mois) sur des encombrements mandibulaires (70).

Skountrianos en 2003 démontre les mêmes résultats sur des encombrements maxillaires : 7 ± 2,2 mois contre 21,2 ± 6,9 mois (71).

Les phases de rétraction après avulsions assistées par corticotomies sont en moyenne deux fois plus rapides que dans le groupe contrôle, durant les 2 premiers mois, avec un taux de rétraction moyen d'1,8 mm / mois au maxillaire et 1,57 mm / mois à la mandibule contre 1,02 et 0,87 mm / mois sans corticotomies (50,74).

Enfin, les nombreuses revues systématiques de la littérature disponibles sur cette technique concluent à une réduction du temps de traitement de 1,8 à 4 fois par rapport à un traitement conventionnel, avec une moyenne de 2,6 (75–79). En considérant une durée totale de traitement actif de 20 mois en orthodontie conventionnelle, le même traitement est résolu en moyenne en 7,7 mois avec PAOO. Il apparaît aussi que cette accélération intervient uniquement durant les 4 mois suivant la chirurgie, avec un sommet durant les 2 premiers mois.

2.3.1.2.2. Une réduction du caractère invasif

La décortication sélective et partielle est moins invasive que la technique d'ostéotomie segmentaire (Köle) ou que les techniques impliquant des luxations de segments osseux. Cela impliquerait des suites post-opératoires améliorées.

2.3.1.2.3. Stabilité et renforcement du volume osseux alvéolaire et gingival

Au cours d'un traitement orthodontique, la présence initiale de déhiscences et de fenestrations est susceptible de mener à des récessions gingivales et à une perte osseuse additionnelle en fin de traitement (80,81). Mais selon certaines publications, l'augmentation alvéolaire prévue par la PAOO permettrait de maintenir l'épaisseur osseuse alvéolaire et même de l'augmenter, tout en rendant possible le comblement des fenestrations et la prévention de déhiscences osseuses (56,58,66) (Figure 11).

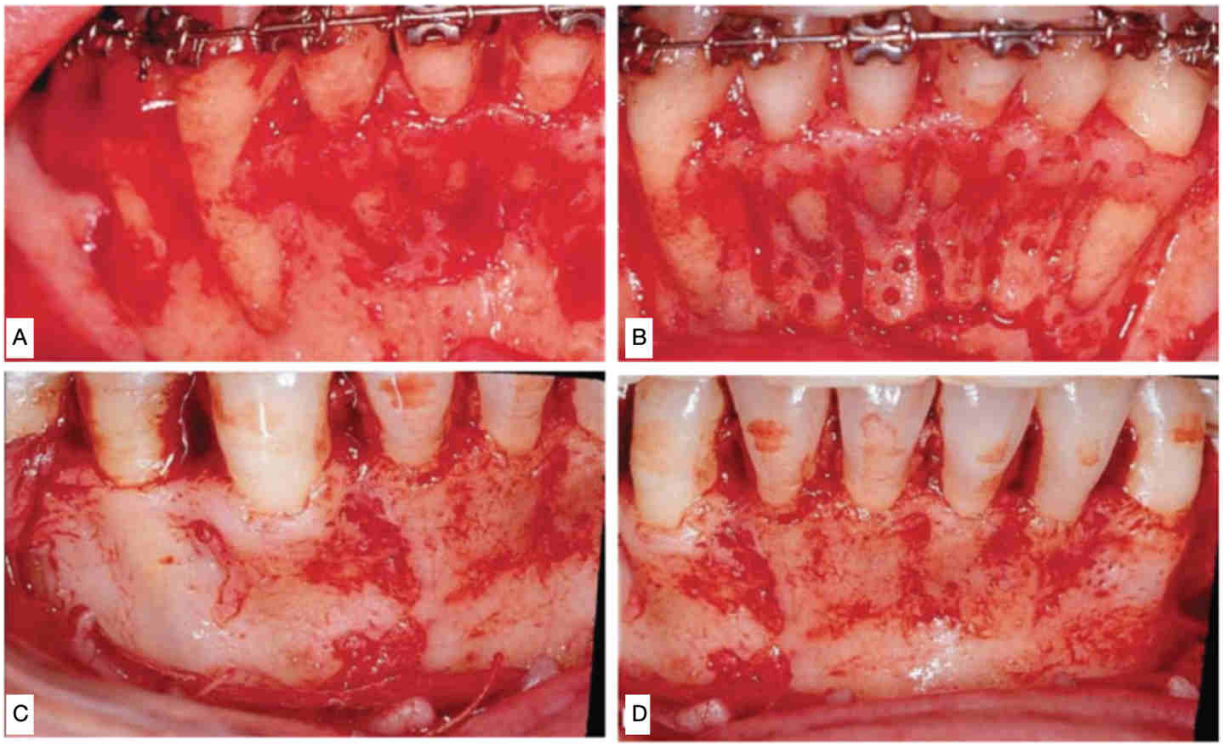



Figure 11. Photographies intra-orales en vues antérieures après élévation d'un lambeau vestibulaire d'épaisseur totale. A : Avant la réalisation des corticotomies (on distingue des déhiscences et fenestrations osseuses vestibulaires). B : Immédiatement après réalisation des corticotomies, avant la greffe. C-D : 7,5 ans après la chirurgie. On remarque un gain en épaisseur et en hauteur alvéolaire au long terme. Images issues de (68).

Twaddle *et al*. en 2002 démontrent à l'aide d'images scanners une augmentation de l'épaisseur alvéolaire vestibulo-linguale dans la région apicale des incisives mandibulaires, à 2 ans post-opératoires avec la technique PAOO (82).

Bhattacharya *et al.* démontrent au travers d'un essai randomisé contrôlé (PAOO dans un groupe, orthodontie seule dans l'autre), une augmentation significative ($p<0,05$) de l'épaisseur alvéolaire après PAOO aux tiers radiculaires coronaire et médian. Là encore, les mesures sont obtenues à l'aide de coupes de CBCT (83).

Agrawal *et al*. obtiennent des résultats comparables au sein d'une étude très similaire : après corticotomie, un gain significatif d'épaisseur osseuse alvéolaire de 1,15 ± 0,3 mm est mesuré au tiers radiculaire coronaire (p = 0,01), et de 0,48 ± 0,1 mm au tiers médian (p = 0,02) (84).

Hajji trouve quant à elle, par l'analyse céphalométrique du repère anatomique B, une augmentation de l'épaisseur alvéolaire après corticotomie en comparaison avec un traitement orthodontique conventionnel (55). De même, Machado démontre une augmentation de l'épaisseur alvéolaire par l'analyse du point céphalométrique A (85). Toutefois, il existe une discussion sur la fiabilité des points céphalométriques pour mener de tels essais, puisqu'ils sont soumis au remodelage physiologique et leur potentiel déplacement n'est pas mesuré (86). En revanche, les analyses dimensionnelles de l'os alvéolaire ainsi que la détection de déhiscences et fenestrations semblent être plus précises et pertinentes lorsqu'elles sont étudiées à l'aide d'images CBCT (87,88).

Si de nombreuses études comparent la technique PAOO à un traitement orthodontique conventionnel, peu d'études analysent l'intérêt spécifique de la greffe au sein du protocole PAOO. La pertinence d'une telle greffe peut donc être légitimement questionnée.

En 2008 la première étude de cas analysant l'intérêt de cette augmentation alvéolaire est réalisée par les frères Wilcko : 4 cas sont analysés dont 2 sujets jeunes et 2 sujets adultes (58). Ils concluent que chez l'enfant, la greffe semble facultative car le potentiel de reminéralisation osseuse est plus élevé et permet de retrouver le volume osseux initial *ad integrum*. A l'inverse, chez l'adulte, la greffe semble être indispensable et permettrait de pallier le ralentissement du métabolisme qui peut mener à une perte de volume osseux après une telle chirurgie.

Les revues de la littérature évoquées plus haut concluent aussi à un réel apport de la greffe (75,76,89) car celle-ci permet une augmentation de l'épaisseur alvéolaire vestibulaire et de la densité osseuse à 6 mois post-opératoires, tandis que dans les groupes avec corticotomies sans greffe, la densité osseuse semble diminuer par rapport aux valeurs pré-opératoires. Cependant les niveaux de preuves restent bas.

De plus, des traitements de décompensation orthodontique (précédant une chirurgie orthognathique) assistés par PAOO sont rapportés dans la littérature et mettent en évidence, si ce n'est un gain réel de volume osseux horizontal, au moins une stabilisation de ce volume lors de mouvements orthodontiques à risque de déhiscences ou fenestrations vestibulaires (90,91).

Toujours dans le cadre de traitements orthodontiques pré-chirurgicaux chez des patients de Classe III squelettique, Sun *et al* (2019) concluent au travers d'un essai contrôlé incluant 17 patients (204 sites étudiés) – par l'analyse de CBCT avant et après traitement, que la PAOO permet une réduction de l'étendue des déhiscences et fenestrations dans la région antérieure mandibulaire (92).

Enfin, une série de cas menés par Brugnami en 2021 incluant 10 patients et 60 sites décortiqués puis augmentés confirme à l'aide d'images CBCT l'augmentation significative ($p<0,05$) du volume alvéolaire : 0,58 ± 0,22 $mm^2$ avant l'intervention contre 1,76 ± 0,4 $mm^2$ 7 mois après l'intervention (93). Cette différence de volume est mesurée à l'aide d'un logiciel qui permet de superposer les scanners pré / post-opératoires (3D Slicer).

La greffe permettrait donc un meilleur soutien parodontal aux éléments dentaires, mais elle contribuerait également à augmenter le soutien de lèvre grâce à ce gain d'épaisseur alvéolaire, et participerait à l'aménagement esthétique de l'étage facial inférieur (58). Toutefois, des études approfondies doivent être menées pour confirmer cette hypothèse.

Cette expansion de l'enveloppe alvéolaire permettrait par ailleurs, selon plusieurs auteurs, d'éviter des avulsions thérapeutiques et certaines chirurgies orthognathiques, du fait que les arcades peuvent subir une expansion plus ample dans le sens transversal notamment (53,58,68). Ainsi, ils avancent que la protraction incisive peut s'étendre à 9 mm avec la PAOO, contre 5 mm sans, et que les limites des mouvements orthodontiques chez l'adulte sont en moyenne doublées par la PAOO (Figure 12). Cependant, aucune preuve scientifique de cette hypothèse n'existe à l'heure actuelle, et certains auteurs la réfutent.

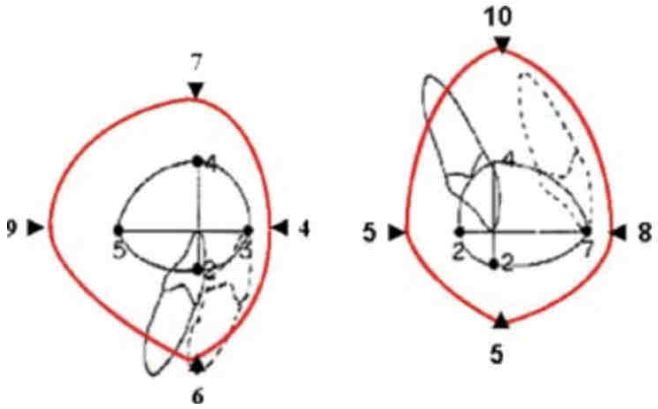



Figure 12. Ces deux schémas décrivent les limites des mouvements orthodontiques réalisables chez l'adulte en millimètres : avec l'orthodontie seule (enveloppe interne, noire, décrite par Proffit) en comparaison avec la PAOO (enveloppe externe, rouge). Image issue de Bell, 2007 (33), reprise et commentée par Wilcko (68).

La gencive kératinisée semble aussi être stable, voire renforcée par la PAOO. En effet, deux récents essais menés par Jing *et al*. et Han *et al.* (2020) étudiant l'impact de la PAOO sur le parodonte rapportent (94,95) :

- Une absence de différence ($p > 0,05$) de profondeur de poche et d'indice de saignement gingival avant et 6 mois après la chirurgie.
- Une augmentation significative ($p < 0,05$) de la hauteur de gencive kératinisée 6 mois après la chirurgie : 5,18 ± 2,32 mm après PAOO contre 4,22 ± 1,43 mm en préopératoire.
- Une augmentation significative ($p < 0,05$) de l'épaisseur de la gencive kératinisée supra-crestale (située 1 à 2 mm apicalement par rapport à la gencive libre), 6 mois après la chirurgie.

En outre, Dounis *et al*. proposent un arbre décisionnel guidant le chirurgien dans le protocole opératoire en fonction des particularités anatomiques locales (Figure 13) (96).

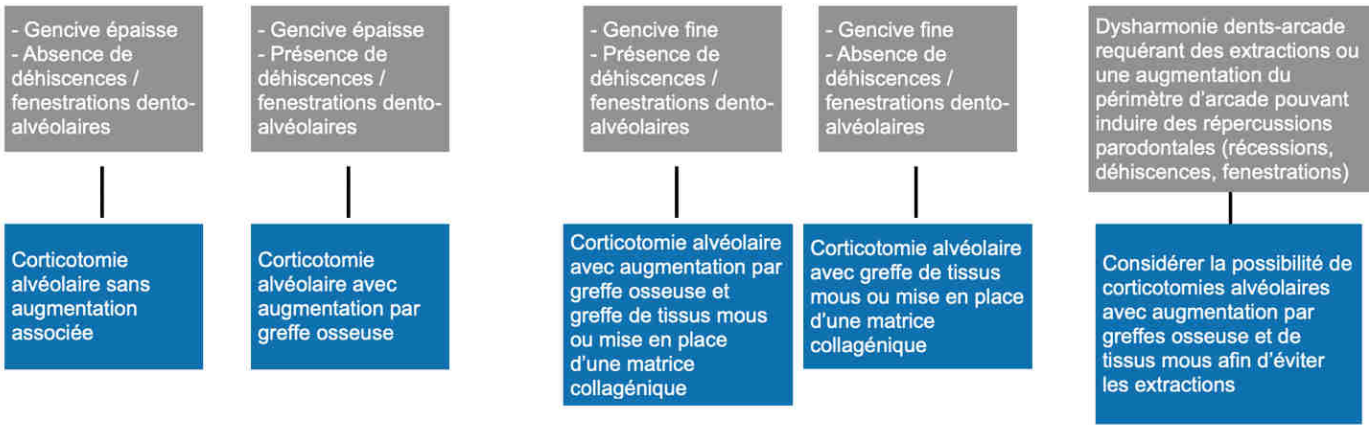



Figure 13. Arbre décisionnel pour l'augmentation tissulaire associée à une corticotomie alvéolaire. Reproduction personnelle d'une illustration issue de Dounis *et al.*, 2020 (96).

#### 2.3.1.2.4. Une technique sûre

Les revues systématiques concluent dans l'ensemble à une absence d'effets néfastes sur le parodonte, en analysant notamment les valeurs du sondage parodontal, l'indice de plaque, les récessions gingivales, et la perte d'attache dans le cadre de corticotomies associées ou non à une greffe (75,76,97).

Ces thérapeutiques n'ont par ailleurs pas de répercussions connues sur la vitalité pulpaire des organes dentaires (75,76,97). Des études sur le long terme manquent cependant.

Quant aux résorptions radiculaires : plusieurs études tendent à montrer que la corticotomie semble diminuer l'incidence des résorptions radiculaires en comparaison à un traitement orthodontique classique (54,55,73,85). En effet, elle permettrait de limiter le phénomène de hyalinisation grâce à la déminéralisation osseuse qui intervient.

De plus, le risque de résorption augmentant avec la durée d'application des forces orthodontiques (98,99), il se pourrait également que les corticotomies permettent de réduire l'incidence des résorptions grâce à la diminution de la durée des traitements qu'elles impliquent.

Cependant, des études récentes dont deux revues systématiques concluent à une absence de différence significative quant au risque de résorption dans les groupes

expérimentaux par rapport aux groupes contrôles (75,76,100). Les investigations doivent là encore être poursuivies.

Les corticotomies semblent également potentialiser le déplacement orthodontique par ancrage. En effet, elles permettent d'accélérer le déplacement de la/des dent(s) mobilisée(s), sans accélérer celui de l'unité d'ancrage si cette dernière est à une distance suffisante du site décortiqué (74,76).

Enfin, la technique de PAOO permet au chirurgien, par l'élévation d'un lambeau d'avoir une vue directe sur l'os alvéolaire et les structures anatomiques contrairement aux techniques mini-invasives qui seront évoquées plus tard. Cela assure une certaine sécurité dans la réalisation des décortications et un respect des structures dento-parodontales.

2.3.1.2.5. Durabilité des résultats en fin de traitement

Une stabilité supérieure du traitement dans le temps a été constatée, avec un risque de récidive diminué en comparaison avec un traitement orthodontique conventionnel (58,70,101).

En étudiant des récidives d'encombrement mandibulaire après traitements orthodontiques conventionnels, Rothe *et al.* démontrent qu'une corticale alvéolaire mandibulaire plus fine est associée à un risque supérieur de récidive (102). Cela conforte les frères Wilcko dans leur idée que l'augmentation alvéolaire pourrait contribuer à pérenniser le résultat orthodontique. Toutefois, la vestibuloversion incisive est aussi un facteur important à prendre en compte concernant la récidive.

Makki *et al.* montrent, au travers d'une étude cas-témoins sur une durée de 10 ans, que les sujets ayant subi des corticotomies ont un indice d'irrégularité mandibulaire plus faible (et donc un ré-encombrement incisif plus lent) que les sujets du groupe contrôle (103). Cependant l'étude présente plusieurs limites d'interprétation, notamment la différence majeure d'effectifs dans les cohortes étudiées.

Ferguson *et al*. obtiennent des résultats concordants en analysant un indice de stabilité des traitements orthodontiques (l'ABO-OGS : l'*American Board of Orthodontics Objective Grading System*) sur 28 sujets, 1 an et demi après la fin du traitement actif : le score est significativement meilleur dans le groupe PAOO par rapport au groupe contrôle (traitement orthodontique conventionnel) (104).

Les mêmes auteurs suggèrent que cette stabilité supérieure serait liée à la « perte de mémoire tissulaire » engendrée par un remaniement drastique de l'os alvéolaire, ainsi qu'à une augmentation de l'épaisseur alvéolaire conséquente à la greffe osseuse (67). La cicatrisation qui s'ensuit serait ainsi apparentée à un réagencement tissulaire avec un nouveau phénotype régional (68,104).

#### 2.3.1.3. Inconvénients

La PAOO présente malgré tout certaines limites :

- Des suites chirurgicales qui restent relativement importantes (ecchymoses, douleur, œdème), en lien avec les lambeaux d'épaisseur totale élevés de part et d'autre des remparts alvéolaires, et les décortications associées. De rares cas d'hématomes faciaux ou cervicaux post-opératoires ont été décrits avec la technique des Wilcko (105).

  Une étude de Al-Naoum *et al*. met en évidence que 50% des patients rapportaient une douleur intense pendant l'alimentation le lendemain de l'intervention (106). De plus, une semaine après l'intervention, plus de 30% des patients présentaient toujours des douleurs.

  Dans cette même étude, 80% des patients présentaient un œdème moyen à volumineux le lendemain de l'intervention, et plus de la moitié des sujets ressentaient un inconfort modéré à sévère du côté opéré.

  Une autre étude démontre une diminution nette de la qualité de vie en lien avec la santé orale (*Oral Health Quality of Life*) durant la semaine suivant l'intervention (107).

- De plus, l'intervention proposée par les Wilcko est chronophage de par l'élévation de lambeaux vestibulaire et palatin/lingual, l'étendue des décortications et l'étape d'augmentation alvéolaire. Ainsi, une certaine lenteur opératoire peut être ressentie à la fois par les patients mais aussi par les praticiens.

- Il s'agit d'une intervention relativement onéreuse pour le patient car elle est longue, nécessite une certaine technicité du praticien, et un apport de biomatériau osseux est nécessaire.

- Les revues systématiques disponibles rapportent toutes (76,77,97,105,108) :

  - Une faible quantité d'études sur le long terme, bien que la technique ait fait ses preuves depuis 2000.
  - Une hétérogénéité entre les études. En effet, la variabilité de populations, de malocclusions, de temps de traitement, de médications postopératoires, de suivi et du type d'études rend compliquée l'analyse des données et la réalisation d'une méta-analyse.
  - Un biais de publication qui serait aussi à considérer : les articles non concluants seraient publiés moins systématiquement que les articles démontrant une efficacité de la technique.

Ces inconvénients participent au fait que les corticotomies, qui ont certes fait leurs preuves comme de véritables accélérateurs des traitements orthodontiques, présentent malgré tout un taux d'acceptation très faible au sein de la population orthodontique (109). Cette faible acceptation est principalement liée à la peur de la douleur, mais aussi à l'appréhension vis-à-vis de la chirurgie (après que le protocole ait été expliqué), et enfin au surcoût qu'occasionne l'intervention.

#### 2.3.1.4. Indications

- Environnement dento-parodontal sain.

- Denture adulte principalement. Bien que des traitements de patients de 11 à 78 ans ont été décrits dans la littérature, la population demandeuse de traitement orthodontique accéléré est d'abord une population adulte (58).

- Dans la littérature la grande majorité des diagnostics initiaux concerne des malocclusions modérées à sévères (76,77) impliquant notamment :

  - Les phases de rétraction après avulsion. La fermeture d'espace est réalisée en moyenne en 3 à 4 semaines avec cette technique. C'est l'indication la plus décrite dans la littérature.

  - Les Classes I avec encombrement modéré à sévère (allant jusqu'à 10 mm par arcade, dans de rares cas). Il s'agit du candidat idéal selon certains auteurs (53). Toutefois, un encombrement de 10 mm orientera l'orthodontiste d'abord vers des extractions dentaires pour sa résolution, et éventuellement par la suite la réalisation de corticotomies.

    Récemment, un rapport de cas décrit la résolution en 9 mois, sans extraction, d'un cas présentant une Classe I molaire et Classe II canine associées à un surplomb incisif de 9 mm, un recouvrement aux ¾ des dents antérieures mandibulaires, et un encombrement incisif mandibulaire de 11 mm (4 mm au maxillaire) (110).

  - Les Classes II modérées à sévères.

  - Certaines Classes III, plus rarement décrites.

  - Les béances antérieures (53). Les mouvements d'ingression molaires peuvent être associés aux corticotomies (55,105).

  - Mésialisation de molaires mandibulaires (73,111).

  - Distalisation de molaires maxillaires dans certains cas de Classes II dentaires (73).

  - Les occlusions inversées postérieures (expansion maxillaire) (112).

  - L'expansion maxillaire unilatérale (113).

  - La traction orthodontique d'une dent incluse : la corticotomie alvéolaire peut être utilisée pour faciliter son éruption (68,105).

- La décompensation orthodontique avant chirurgie orthognathique (73).

• Certains rares cas sévères qui auraient pu nécessiter une chirurgie orthognathique, mais qui, grâce à l'enveloppe de mouvements orthodontiques augmentée, sont candidats à la corticotomie alvéolaire (58). Toutefois aucun consensus n'existe sur ce sujet, et des études complémentaires sont indispensables.

• Certains cas où l'augmentation alvéolaire par greffe osseuse ou l'apport de tissus mous est de toutes façons nécessaire (corticale fine, déhiscence, fenestration, récessions gingivales etc.) et où l'on profite de l'intervention pour réaliser les corticotomies.

N.B. : Quatre cas concluants de PAOO ont par ailleurs été publiés incluant des patients porteurs de fentes palatines opérées pendant l'enfance mais présentant une rétrognathie maxillaire persistante et refusant une chirurgie orthognatique (114). Pour ces tableaux cliniques, l'ostéotomie Lefort I qui est généralement indiquée occasionne parfois une hypernasalité en lien avec une insuffisance vélopharyngée (IVP) du fait du repositionnement du palais vers l'avant. C'est pourquoi certains auteurs ont proposé comme alternative thérapeutique la technique de PAOO qui permettrait une augmentation du périmètre d'arcade dans le sens transversal et ainsi de privilégier le déplacement dento-alvéolaire plutôt qu'un déplacement squelettique et ses potentiels effets indésirables. Cependant, cela reste une indication relativement marginale dans la littérature.

#### 2.3.1.5. Contre-indications

Facteurs généraux :

• Une pathologie générale et/ou une médication à l'origine d'une immunodépression ou interférant avec le métabolisme osseux.

Exemples : hyperparathyroïdie, hypoparathyroïdie, maladie de Basedow, thyroïdite d'Hashimoto, ostéoporose, carence en vitamine D, ostéomalacie, dysplasie fibreuse,

maladie de Paget, myélome multiple, ostéogénèse imparfaite, métastases osseuses, diabète non équilibré, patients sous bisphosphonates, AINS, supplémentation en calcium (53,58,73).

Une médication de type AINS est déconseillée pendant et après la chirurgie, car elle peut interférer avec les phénomènes inflammatoires à l'origine du déplacement dentaire accéléré (58).

Facteurs locaux :

- La présence d'une pathologie parodontale : gencive inflammatoire, indice de plaque élevé, tartre, saignement au sondage, poches parodontales, récessions gingivales, mobilités dentaires. De même, la présence d'infections parodontales comme les lésions de furcations actives, les abcès parodontaux, ou les LIPOE (lésions inflammatoires périapicales d'origine endodontique) sont des contre-indications strictes.

- La présence d'une carie active, d'une dent nécrosée, ou d'une lésion inflammatoire péri-apicale d'origine endodontique (LIPOE).

- La présence d'une dent ankylosée.

- Une résorption radiculaire préexistante.

- Les malocclusions sévères antéro-postérieures d'origine squelettique ne sont pas des cas favorables aux corticotomies en dehors des thérapeutiques de décompensation pré-chirurgicales (53).

- De même, certaines malocclusions chez l'adulte comme des occlusions inversées postérieures sévères (les corticotomies ne permettent pas de s'affranchir d'une expansion palatine assistée chirurgicalement), ou la protrusion bimaxillaire associée à un sourire gingival ne sont pas des situations favorables à l'utilisation de cette technique seule (49,105,108).

N.B. : Une faible épaisseur alvéolaire initiale n'apparaît pas comme un critère d'exclusion pour ce type de thérapeutiques chirurgicales. En effet, la greffe particulée permet d'assurer la stabilité du volume osseux alvéolaire, voire son augmentation, comme nous l'avons évoqué précédemment.

Facteurs comportementaux :

- Le tabagisme (pour certains auteurs : >10 cigarettes par jour).
- Le patient non compliant.

En conclusion, la littérature actuelle démontre que la PAOO permet un mouvement orthodontique accéléré de manière conséquente, et que ce mouvement intervient durant les premiers mois suivant la chirurgie. Cependant la recherche doit se poursuivre pour aboutir à de solides conclusions, notamment sur les effets au long terme.

Si aucune complication dento-parodontale majeure n'est décrite à ce jour, la PAOO reste toutefois relativement invasive, occasionne fréquemment des douleurs postopératoires importantes, et se heurte à un faible taux d'acceptation comme nous l'avons évoqué plus haut. C'est pourquoi durant les années 2000 puis 2010, de nombreux auteurs cherchent à alléger le protocole chirurgical sans compromettre l'efficacité de la technique.

### 2.3.2. Corticotomies modifiées

#### 2.3.2.1. Technique piézo-chirurgicale (Sebaoun *et al.*, 2008)

Une variante de la technique des Wilcko a été décrite par Sebaoun *et al.* en 2008. Au lieu d'une fraise chirurgicale montée sur pièce à main, un insert piézo-chirurgical fin est utilisé (53). Cette technique permet, selon l'auteur, d'augmenter le confort peropératoire et postopératoire pour le patient, et de rendre le geste chirurgical plus aisé en raison de l'insert particulièrement adapté (Figure 14).

Figure 14. Photographie intra-orale en vue antérieure des incisions de décortications réalisées avec un instrument piézo-chirurgical. Image issue de (53).

#### 2.3.2.2. Technique MTDLD, Monocortical Tooth Dislocation and Ligament Distraction (Vercellotti *et al.*, 2007)

En 2007, les italiens Vercellotti et Podesta introduisent la technique MTDLD (*Monocortical Tooth Dislocation and Ligament Distraction* - Distraction Ligamentaire et Dislocation Dentaire Monocorticale) (115).

Ils utilisent une micro-scie piézochirurgicale pour effectuer autour de chaque dent, sur le rempart alvéolaire du côté vers lequel les dents sont déplacées, des décortications aux motifs relativement similaires à la technique de Wilcko.

L'intervention est suivie d'une application de forces orthodontiques importantes occasionnant la dislocation de la corticale osseuse et la distraction ligamentaire (du côté en tension) (Figure 15).

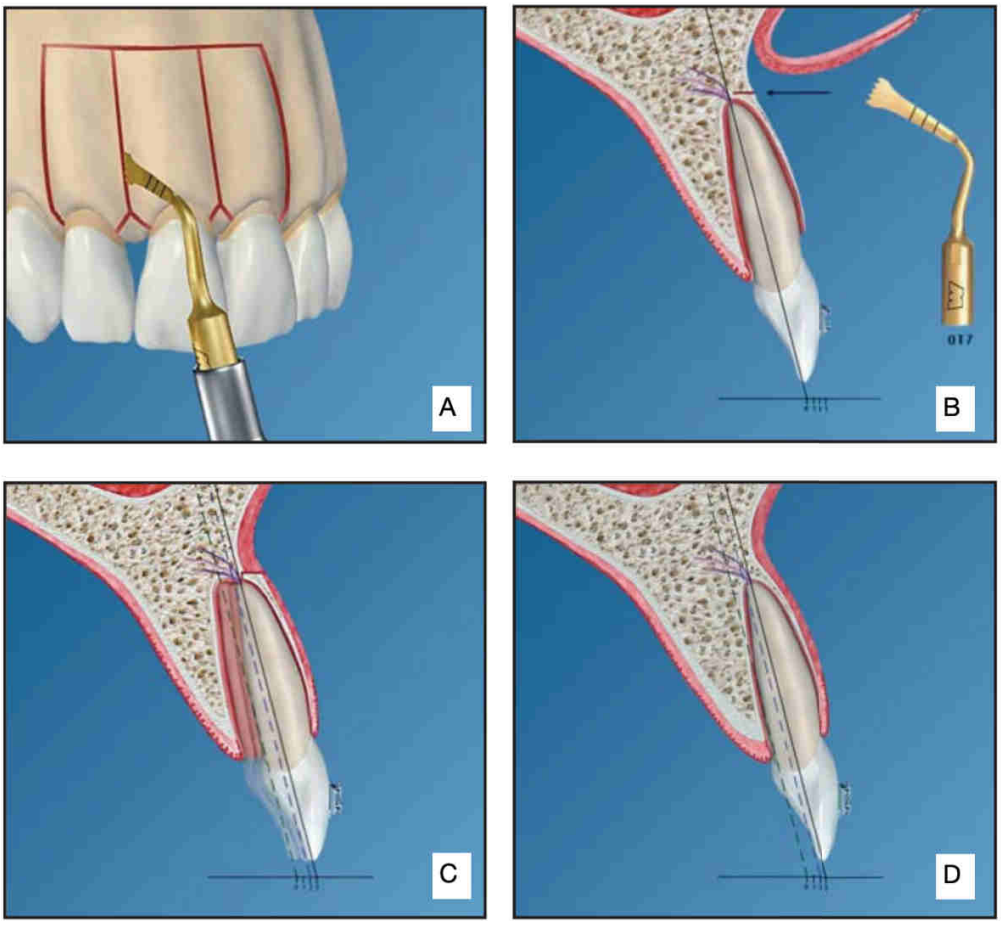



Figure 15. Schéma d'une protraction incisive assistée par MTDLD. A : décortications vestibulaires autour des racines. B : corticotomie ultra-apicale horizontale. C : application de forces orthodontiques importantes occasionnant un élargissement desmodontal (distraction ligamentaire) et une dislocation de la corticale vestibulaire, poussée par la dent protractée. D : après cicatrisation, l'épaisseur alvéolaire vestibulaire est conservée, et l'épaisseur palatine est augmentée. Issue de (115).

Par la dislocation de la corticale du côté en pression, l'auteur cherche à diminuer la pression subie par cette corticale et le phénomène de hyalinisation intense (forces mécaniques importantes) ainsi que les effets indésirables qui pourraient y être associés. L'objectif est donc la fragilisation d'un rempart alvéolaire d'un côté, associée à un étirement du ligament du côté opposé, objectif qui s'inscrit pleinement dans une théorie mécanique de l'accélération du mouvement orthodontique.

Ils obtiennent des résultats concluants sur 8 patients : une réduction du temps de traitement de 70% et 60% respectivement au maxillaire et à la mandibule par rapport au groupe contrôle (thérapeutique orthodontique conventionnelle). Un déplacement de l'ordre de 0,5 à 1 mm par jour est prévu à l'aide de cette technique.

Mais il s'agit d'un protocole complexe qui prévoit notamment la mise en place de deux arcs – palatin et vestibulaire et d'un dispositif intra-oral de distraction. De plus, il ne bénéficie que d'un faible recul clinique.

Enfin, cette technique prévoit toujours l'élévation de lambeaux de pleine épaisseur et a recours à la distraction ligamentaire. Elle reste donc relativement invasive.

D'autres protocoles relativement voisins de la MTDLD existent mais ne seront pas explicités dans cette revue, puisqu'ils s'apparentent davantage à des protocoles de distraction ligamentaire ou osseuse et non à une accélération du déplacement orthodontique basée sur des principes biologiques.

#### 2.3.2.3. Technique mono-corticale (Germeç *et al.,* 2006)

Germeç propose une technique de corticotomie modifiée dite « mono-corticale », dans un rapport de cas paru en 2006 (116). La technique proposée est identique à la technique de Wilcko mais n'est réalisée que du côté vestibulaire : les lambeaux et décortications linguaux/palatins ne sont pas retenus. L'auteur stipule que le PAR apporté par les incisions vestibulaires est suffisant pour provoquer une accélération substantielle du déplacement dentaire. Cette modification s'inscrit aussi dans une démarche psychosociale qui vise à augmenter l'acceptation des corticotomies auprès des patients en réduisant le temps opératoire et l'inconfort postopératoire.

##### 2.3.2.3.1. Avantages

- Une diminution du caractère invasif de la chirurgie, et par conséquent, des suites post-opératoires diminuées. C'est l'avantage principal de cette technique.

- Un temps opératoire diminué qui peut aussi se répercuter sur le coût de l'intervention.
- Une technique qui semble promouvoir une accélération conséquente du déplacement dentaire provoqué, malgré la diminution de moitié du volume osseux décortiqué en comparaison avec la technique de référence.

Dans son rapport de cas, Germeç décrit chez une adolescente présentant un encombrement maxillaire et mandibulaire sévère (8 mm et 6 mm) associé à une Classe III canine et une occlusion inversée antérieure, une durée totale de traitement de 16 mois avec la technique mono-corticale. Il estime que sans corticotomie, la durée de traitement aurait été doublée, et évoque une durée moyenne de 31 mois pour les thérapeutiques orthodontiques impliquant des extractions.

Des résultats similaires sont obtenus dans un essai contrôlé avec *split-mouth design* comparant la technique mono-corticale d'un côté de l'arcade au traitement orthodontique conventionnel de l'autre côté, dans le cadre de rétraction canine après extraction de prémolaires (117).

En 2017, un essai clinique est mené par Addanki *et al.* avec un *split-mouth design*, et aucune différence significative n'est trouvée entre le côté « corticotomie vestibulaire et linguale » et le côté « corticotomie vestibulaire uniquement » concernant la durée totale du traitement (118).

2.3.2.3.2. Inconvénients

- Recul très faible et littérature insuffisante.
- L'élévation d'un lambeau de pleine épaisseur reste une étape relativement invasive, à l'origine d'un inconfort post-opératoire.

2.3.2.3.3. Indications

- A privilégier dans les cas où l'accès lingual/palatin est difficile et l'ouverture buccale limitée.

#### 2.3.2.3.4. Contre-indications

- Les contre-indications sont les mêmes que pour la technique de Wilcko.

### 2.3.2.4. Corticotomie avec lambeau de préservation gingivale (Abbas *et al.*, 2016)

Cette technique prévoit la réalisation d'un lambeau sub-marginal (festonné ou non) de pleine épaisseur permettant la préservation des papilles interdentaires et de la gencive marginale. La technique est mono-corticale et prévoit également une augmentation alvéolaire. Il semblerait qu'Abbas soit le premier à rapporter pour la première fois cette procédure dans la littérature en 2016 (100). Elle est également reprise par Pakhare en 2017 et Chillès en 2018 (119,120).

#### 2.3.2.4.1. Protocole

- L'incision débute 4 à 5 mm apicalement par rapport à la gencive marginale tout en suivant son contour.
- Des incisions de décharge sont réalisées de part et d'autre, puis un lambeau de pleine épaisseur est élevé (Figure 16). La suite du protocole est identique à celui des corticotomies conventionnelles.

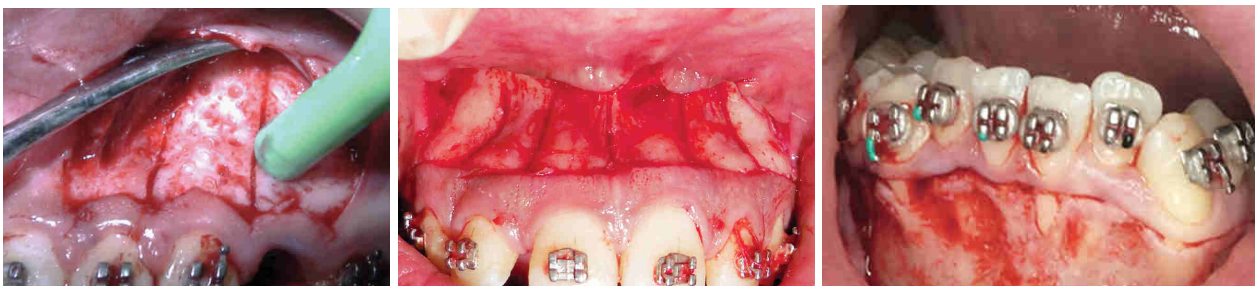


Figure 16. Photographies peropératoires en vues antérieures intra-orales. A gauche : lambeau festonné sub-marginal et réalisation des corticotomies selon Abbas *et al*., 2016 (100). Au centre : lambeau sub-marginal (non festonné) issu de Pakhare *et al*., 2017

(120). A droite : lambeau « de préservation parodontale » issu de Chillès *et al*., 2018 (119).

2.3.2.4.2. Avantages

- Excellent résultat esthétique : brides cicatricielles peu visibles.
- Permet une préservation de la gencive marginale et des papilles interdentaires.

2.3.2.4.3. Inconvénients

- Complexité technique : suivre les collets à distance, décollement difficile, déchirement du lambeau possible, pas d'accès au 1/3 coronaire de la racine.

2.3.2.4.1. Indications

- Nécessite au moins 5 mm de hauteur de gencive attachée.

### 2.3.2.5. Technique du dumpling (Ma *et al.,* 2016)

La technique dite du « dumpling » est introduite par Ma *et al.* en 2016 (121). L'objectif est de servir du périoste comme une couverture qui vient stabiliser le matériau de greffe osseuse au contact de l'os alvéolaire. Cette stabilité est un élément essentiel et indispensable au succès de l'augmentation alvéolaire, selon les auteurs.

L'étude qu'ils publient inclut 11 patients nécessitant un traitement orthodontique et présentant un os alvéolaire fin ou des défects osseux dans la région antérieure mandibulaire. Ils réalisent des acquisitions CBCT avant l'intervention, puis 1 semaine et 6 mois après l'intervention, et concluent à une augmentation significative tant en épaisseur ($p<0,05$) qu'en hauteur alvéolaire ($p<0,001$).

Le mot dumpling est un anglicisme désignant une spécialité culinaire et il est choisi en référence à l'enveloppe formée par le périoste et l'os alvéolaire permettant d'encapsuler et stabiliser le matériau de greffe.

#### 2.3.2.5.1. Protocole (121)

- Le protocole pré-chirurgical est semblable à la technique conventionnelle de PAOO.

- Réalisation d'une incision horizontale au niveau de la ligne de jonction muco-gingivale (LMG) s'étendant une dent au-delà de la zone à décortiquer, sans incision de décharge. En profondeur, cette incision horizontale s'étend jusqu'au périoste qui doit être identifié et préservé au mieux de toute lésion ou perforation (Figure 17 – A).

- Un lambeau d'épaisseur partielle (supra-périosté) est élevé en disséquant apicalement jusqu'à la région mentonnière, permettant une exposition suffisante du périoste. Une attention particulière est requise pour ne pas léser les structures anatomiques mentonnières.

- Dans la région mentonnière, très apicalement, le périoste est à son tour incisé horizontalement (Figure 17 – B) et élevé coronairement à l'aide d'un élévateur à périoste, donnant pleinement accès à la corticale alvéolaire. Verticalement, le périoste est décollé jusqu'à la crête alvéolaire (en préservant au maximum la gencive cervicale) pour permettre au matériau de greffe de combler les déhiscences.

- Réalisation des corticotomies alvéolaires sélectives d'abord verticalement au niveau des espaces inter-radiculaires, puis des décortications horizontales qui viennent relier les incisions verticales 2 à 3 mm au-delà de l'apex (Figure 17 – C).

- Au-delà de ces décortications horizontales, des perforations doubles sont effectuées jusqu'à la couche superficielle de l'os médullaire et dans des directions obliques opposées qui permettront ensuite de suturer le périoste (Figure 17 – C). Le fil (5-0 résorbable) est passé à travers ces perforations avant la mise en place du matériau de greffe.

- Le matériau de greffe osseuse est ensuite appliqué sur la surface alvéolaire partiellement décortiquée. Dans la plupart des cas, 1 à 2 grammes de matériau d'augmentation sont requis (Figure 17 – D).

- Puis le périoste est suturé à la surface alvéolaire (Figure 17 – E). Si l'enveloppe périostée ne permet pas de recouvrir l'ensemble de la zone greffée, une membrane de collagène peut être utilisée en complément afin de prévenir l'éparpillement des particules.

- Le lambeau muqueux d'épaisseur partielle est ensuite suturé avec du fil 4-0 résorbable, sans tension.

- Des consignes post-opératoires similaires à celles délivrées pour la PAOO sont remises au patient. Les auteurs prévoient en plus une prescription d'antibiotiques pendant 3 jours ainsi qu'une mentonnière à porter pendant 1 semaine afin de réduire l'œdème post-opératoire.

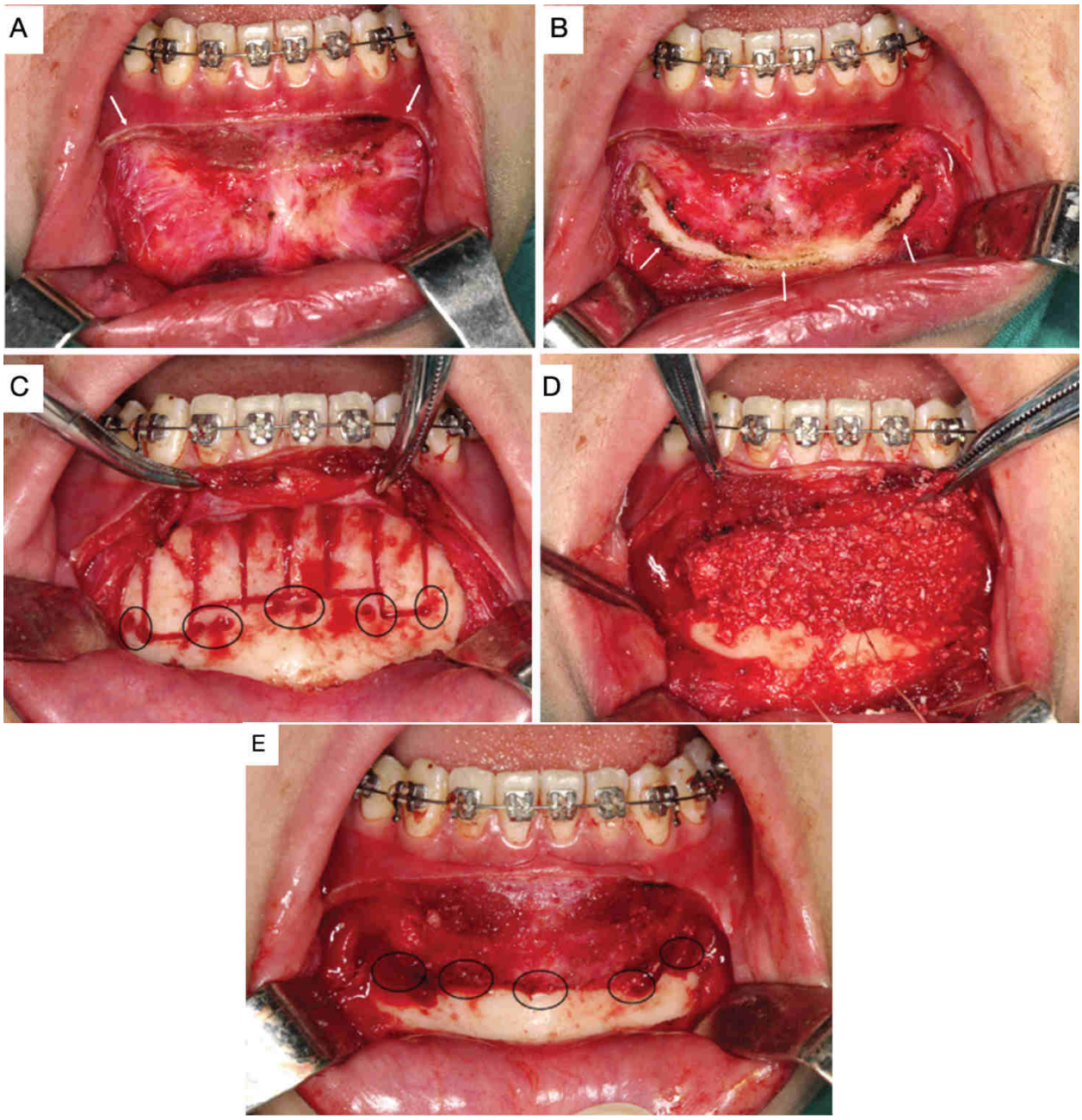



Figure 17. Vues antérieures per-opératoires de la technique du dumpling. A : Après incision horizontale à la LMG et dissection en épaisseur partielle apicalement jusqu'à la région symphysaire. B : Incision du périoste dans la région mentonnière. C : Incisions de décortication alvéolaire et perforations ultra-apicales après élévation du périoste. D : Placement sous-périosté du matériau de greffe osseuse (mélange d'os autogène et d'origine bovine – Bio-Oss®, Geistlich). E : Suture du périoste à la surface alvéolaire. Images issues de Ma *et al.*, 2016 (121).

#### 2.3.2.5.2. Intérêts

Cette technique présente des avantages :

- Stabilisation du matériau de greffe qui permettrait d'optimiser l'augmentation alvéolaire.
- Préservation gingivale.
- Des résultats probants au sein de l'étude menée par Ma *et al.* : les mesures radiographiques réalisées mettent en évidence un gain en épaisseur et en hauteur alvéolaire 6 mois après la chirurgie (T2), par rapport aux mesures réalisées avant la chirurgie (T0).

#### 2.3.2.5.3. Limites

- Difficulté opératoire importante.
- Cette technique prévoit l'élévation d'un lambeau et reste relativement invasive.
- Technique chronophage.
- Peu de recul clinique : une seule étude disponible.

### 2.3.2.6. Technique du lambeau périosté avec affaiblissement mentonnier (Saint-Surin *et al.*, 2020)

Il s'agit d'une technique voisine de la technique du dumpling, mais qui y associe un affaiblissement du muscle mentonnier.

En effet, selon les auteurs l'hypertonie des muscles péri-oraux (notamment le muscle mentonnier) pourrait chez certains patients comprimer la greffe osseuse et aboutir à un risque élevé de résorption, compromettant l'issue du traitement par PAOO (122).

L'encapsulation de la greffe par le périoste (*cf*. technique du dumpling) combinée à une dissection des fibres musculaires dans la région symphysaire permettrait de sécuriser l'augmentation alvéolaire.

#### 2.3.2.6.1. Protocole (122)

- Les étapes initiales sont identiques à celles de la technique du dumpling.

- Après l'incision muqueuse horizontale d'épaisseur partielle, effectuée en préservant la couché périostée, une dissection entre le muscle et le périoste est opérée.

- Une incision horizontale du périoste est réalisée dans la région mentonnière, au contact osseux, puis le périoste est élevé coronairement avec précaution.

- L'affaiblissement mentonnier est ensuite réalisé : une incision des terminaisons verticales du muscle mentonnier (Figure 18) est opérée dans le but de relâcher les fibres musculaires. Puis une incision des fibres horizontales sous-jacentes et du fascia intermédiaire est également réalisée jusqu'à la partie profonde du muscle. Un lambeau musculaire est alors créé.

- Les décortications sont réalisées classiquement. Des perforations osseuses sont prévues pour la fermeture du lambeau périosté.

- Le lambeau périosté est suturé comme dans la technique du dumpling, et le lambeau mentonnier est rattaché à son insertion d'origine et suturé à l'aide de fil résorbable (4/0).

- La fermeture muqueuse est réalisée avec du fil résorbable 4/0 également.

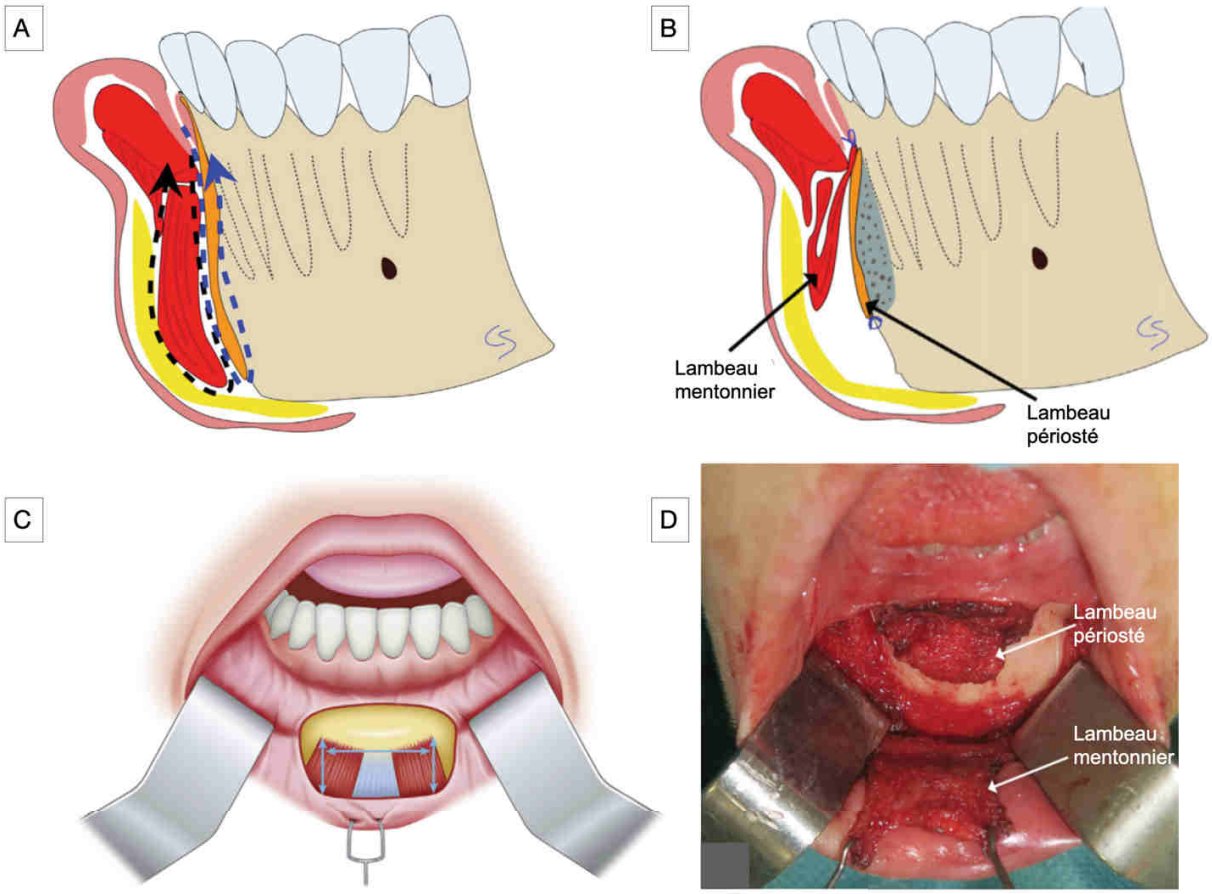



Figure 18. A : Schéma illustrant les trajets d'incisions des tissus mous. Flèche noire : dissection du muscle mentonnier. Flèche bleue : dissection puis décollement du périoste. B : Schéma illustrant la fermeture des lambeaux périosté et mentonnier en fin d'intervention. La partie basse du lambeau mentonnier est repliée vers le haut et attachée à l'insertion haute du muscle. C : Schéma représentant les incisions (flèches) verticales et horizontales du muscle mentonnier et de son fascia intermédiaire. D : Photographie en vue frontale peropératoire permettant de visualiser le lambeau périosté et le lambeau d'affaiblissement mentonnier. Images issues de Saint-Surin, 2020 (122).

2.3.2.6.2. Avantages

- Permettrait de sécuriser la greffe et de prévenir sa résorption. Augmenterait ainsi l'enveloppe de mouvements induits transversaux.

- Préservation gingivale.
- Des résultats probants au sein de l'étude menée Saint-Surin *et al*. (122).

2.3.2.6.3. Inconvénients

- Cette technique prévoit l'élévation d'un lambeau ainsi qu'une dissection musculaire et reste donc relativement invasive.
- Difficulté opératoire importante.
- Technique chronophage.
- Peu de recul clinique : une seule étude disponible.

En conclusion, le protocole de corticotomie conventionnelle ainsi que ses déclinaisons décrites ci-dessus restent relativement invasifs et à l'origine de suites postopératoires importantes. Différents auteurs ont donc proposé des protocoles chirurgicaux alternatifs impliquant un allègement peropératoire et postopératoire : ces techniques alternatives préservatrices seront regroupées sous le terme de « techniques minimalement invasives ».

# CHAPITRE 3 :

# CORTICOTOMIES MINIMALEMENT INVASIVES

Ces techniques ont pour objectif de permettre une accélération du DDP en limitant au maximum le traumatisme tissulaire occasionné, tout en assurant une efficacité comparable aux techniques conventionnelles.

Il s'agit de trouver un compromis entre l'intensité du traumatisme généré aux tissus – intensité dont dépendent directement les suites postopératoires que l'on cherche à diminuer, et l'activation d'un PAR suffisant pour obtenir une accélération satisfaisante du traitement orthodontique.

Au travers de ces techniques minimalement invasives, « le protocole chirurgical diffère, les principes biologiques demeurent » (73). En effet, on cherche désormais à déclencher la réponse cellulaire (ostéopénie transitoire) avec un stimulus minimal et en accord avec des principes biologiques, de sorte à obtenir une activation corticale (qualitative) plus qu'une résection corticale (quantitative).

Ces techniques ont pour point commun d'être transmuqueuses, et donc de ne pas nécessiter l'élévation d'un lambeau. Elles font l'objet de nombreuses études depuis les années 2000, et la littérature est partagée quant à leur efficacité.

Si certains auteurs affirment que ces protocoles permettent d'obtenir des résultats similaires à ceux des techniques plus agressives (123,124), d'autres comme Ruso (2014), Tunçer (2017) et Uribe (2017) stipulent que l'accélération du mouvement orthodontique est entièrement dépendante de l'élévation d'un lambeau qui provoque un dommage plus important à l'os alvéolaire (125–127).

Ces derniers avancent que pendant l'élévation d'un lambeau, il y a atteinte à l'intégrité du périoste et interruption de l'apport vasculaire, entraînant une réponse inflammatoire plus importante. De plus, il a été démontré que la seule élévation d'un lambeau – même sans corticotomies pratiquées, est à l'origine d'un remaniement osseux important (44,128).

On peut donc légitimement se demander si les techniques minimalement invasives sont à même de déclencher un PAR suffisant pour accélérer le déplacement dentaire provoqué.

Intérêts **:**

- Caractère mini-invasif : un confort post-opératoire qui serait supérieur avec des douleurs largement diminuées. Cet argument s'appuie sur des études issues de l'implantologie, comparant la pose d'implants avec lambeau et sans lambeau, et qui concluent à une douleur moins intense et plus courte pour le groupe *flapless* (sans lambeau) (129).

Limites :

- L'absence de lambeau implique une navigation chirurgicale à l'aveugle et rend l'intervention plus périlleuse : elle pourrait augmenter le risque de lésion des structures dentaires et anatomiques voisines, et rendre plus difficile l'appréhension de l'épaisseur osseuse ainsi que la localisation des racines dentaires. Une atteinte du LAD, du cément ou même de la racine peut aussi intervenir en cas d'orientation inappropriée de la lame ou de l'insert et en présence d'une anatomie atypique.

Afin de pallier au mieux l'absence de vue directe, l'outil radiographique préopératoire (rétro-alvéolaire et/ou scanner) doit être exploité au maximum et corrélé à un examen clinique rigoureux de la zone opérée.

Indications :

- Si ces techniques s'avéraient aussi efficaces que la technique de référence, leur champ d'indication couvrirait l'ensemble des traitements d'accélération orthodontique et ces protocoles supplanteraient les techniques conventionnelles plus invasives.

Voyons quelles sont les différentes techniques minimalement invasives étudiées à l'heure actuelle.

## 3.1. TECHNIQUE DE MICRO-OSTEOPERFORATION (Alikhani *et al.*, 2013)

La technique de micro-ostéoperforation (MOP), aussi appelée *alveocentesis* en anglais, est introduite par Alikhani *et al.* en 2013. Elle consiste en la réalisation de perforations transmuqueuses punctiformes, à minima, de 1,5 mm de largeur et 3 à 7 mm de profondeur (130). Ces perforations peuvent être réalisées en utilisant un instrument dédié (Propel®), mais aussi à l'aide de dispositif permettant la pose de minivis (TADs : *temporary anchorage device* : dispositif d'ancrage temporaire), ou encore à l'aide d'une fraise boule montée sur pièce à main sous irrigation abondante.

En 2020, 10% des répondants orthodontistes affirment avoir recours de manière routinière à ce protocole et 42% de manière occasionnelle, contre respectivement 2% et 23% en 2014 (13).

### 3.1.1. Protocole (130)

- Une radiographie pré-opératoire est préalablement réalisée : rétro-alvéolaire et/ou tridimensionnelle (tomographie volumique).
- Aucune prémédication antibiotique ou autre n'est décrite dans la littérature.
- Un bain de bouche antiseptique à la chlorhexidine 0,2% d'une minute au moins est conseillé avant l'anesthésie ; une compresse imbibée de polyvidone iodée désinfecte le site opératoire.
- Anesthésie locale.
- A l'aide d'une pièce à main manuelle dédiée semblable à un tournevis, les micro-ostéoperforations sont réalisées dans l'os alvéolaire autour des dents que l'on souhaite déplacer, ou entre 2 dents bordant un édentement (lors de la fermeture de sites d'extraction). La pièce à main proposée par la firme américaine Propel Orthodontics® présente un manche réutilisable stérilisable et un embout à usage unique qui s'emboîte dans le manche (Figure 19).

Figure 19. Pièce à main *Excellerator® (à gauche), Excellerator® RT (au milieu) et Excellerator® PT (à droite), proposés par le fabricant Propel Orthodontics®.* Images issues du site du fabricant Propel®.

Les perforations sont réalisées à équidistance entre les 2 racines des dents adjacentes. L'utilisation de points de repères anatomiques est indispensable. Plusieurs points peuvent être réalisés sur un même site avec le même embout, et avec plusieurs possibilités de motifs.

Il est possible de les réaliser en vestibulaire comme en lingual / palatin (bien que l'accès au rempart lingual semble compliqué avec une pièce à main manuelle sans embout coudé). Dans le cas d'une fermeture de site d'extraction, le chirurgien peut par exemple réaliser 3 perforations alignées verticalement en vestibulaire (Figures 20-21).

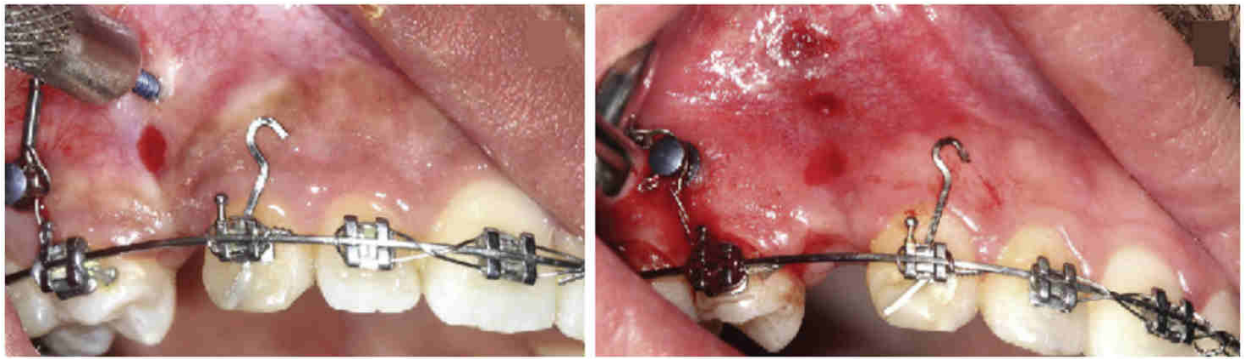


Figure 20. Photographies intra-orales peropératoires montrant la réalisation de trois MOP vestibulaires sur un site de rétraction canine. Images issues de Alkebsi *et al*., 2018 (131).

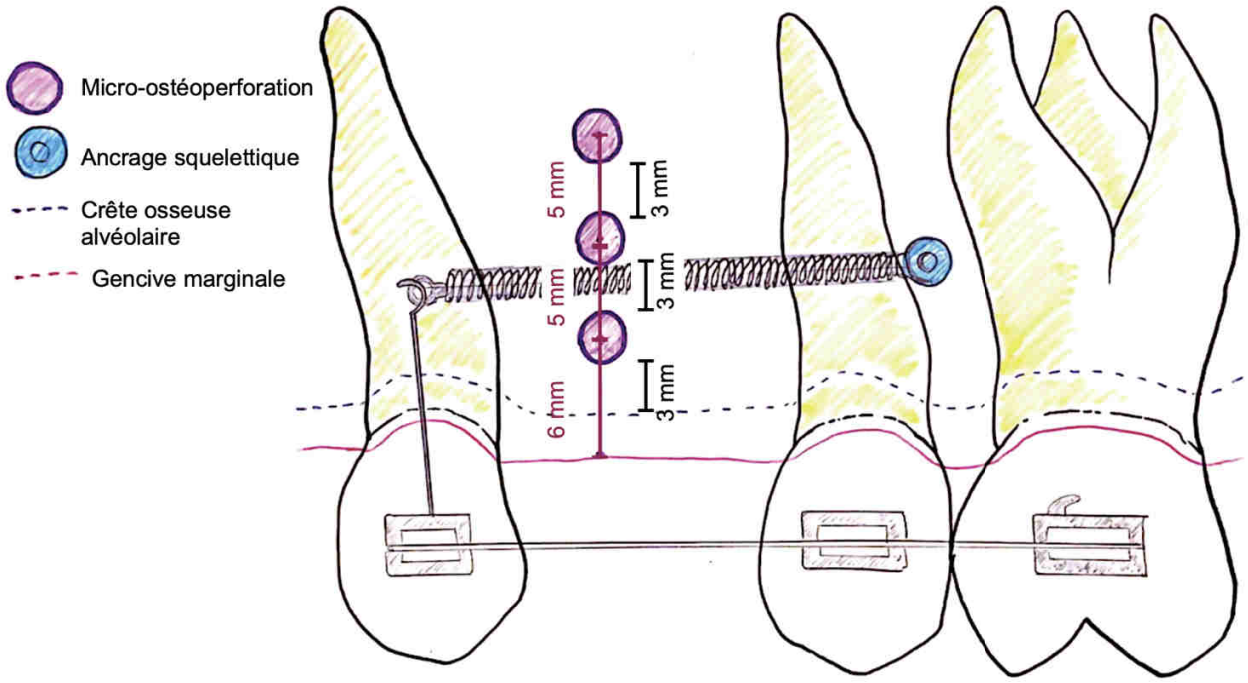



Figure 21. Schéma proposant des distances à respecter entre les points d'impact et les structures anatomiques, illustration personnelle inspirée de Alkebsi *et al*., 2018 (131).

Après avoir positionné l'extrémité de l'embout au niveau du point de perforation souhaité, une mollette située sur le manche est tournée dans le sens des aiguilles d'une montre, faisant pénétrer la partie travaillante de l'embout dans la gencive puis dans l'os.

Un indicateur d'enfoncement permet de connaître la profondeur de perforation : 3 traits sont présents à 3, 5 et 7 mm. Le fabricant propose une cartographie de profondeur de perforation en fonction de la localisation du site à perforer (Figure 21), que le chirurgien doit bien sûr corréler à la situation clinique : épaisseur gingivo-muqueuse allant de 1 à 3 mm et épaisseur osseuse, ainsi qu'à l'outil radiographique. La couche corticale doit être franchie intégralement et la couche médullaire doit être pénétrée légèrement. Durant la perforation, une irrigation au liquide physiologique peut être réalisée.

- Lorsque la profondeur souhaitée semble atteinte, une sonde parodontale peut être utilisée pour vérifier la bonne profondeur de la perforation.

- La mollette est ensuite tournée dans le sens inverse jusqu'au retrait complet de l'instrument.

- Un rinçage avec du liquide physiologique est opéré par le chirurgien, puis une compresse appliquée sur la zone perforée permet d'obtenir l'hémostase par compression. Cette technique ne nécessite pas de fermeture muqueuse.

- La prescription antalgique post-opératoire n'est pas systématique dans la littérature. En cas de prescription, un antalgique de pallier I comme le paracétamol est recommandé. Un bain de bouche antiseptique à la chlorhexidine peut aussi être associé.

Dans le cadre d'une rétraction canine, le dispositif localisé de rétraction doit être activé à peu près au même moment que les MOP. Si un ancrage type minivis est associé, il doit être placé à une distance acceptable du site où les MOP sont réalisées. En effet il a été démontré que le PAR s'étend jusqu'aux dents adjacentes (131). Ceci est d'ailleurs valable pour l'ensemble des techniques de corticotomies.

N.B. : certaines études proposent par ailleurs une récurrence dans la réalisation des MOP pour obtenir une rémanence de l'effet : 4 récurrences, à 3 semaines d'intervalle chez Gulduren *et al*. (132), tous les 28 jours chez Attri *et al.* (133). Sivarajan *et al.* étudient à l'aide d'un essai en bouche fractionnée plusieurs modalités de MOP récurrentes avec trois chronologies différentes : avec un intervalle d'1 mois, 2 mois, et 3 mois, sans constater de différence significative au sein de ces groupes (134). La supériorité des MOP récurrentes n'est pas prouvée en comparaison aux MOP ponctuelles.

#### 3.1.2. Avantages

- Dans la littérature, une majorité d'études conclut à une efficacité des MOP dans l'accélération du déplacement dentaire provoqué.

Plusieurs études pré-cliniques décrivent cette accélération (60,135–137).

Chez le rat, une augmentation significative de l'activité ostéoclastique est démontrée suite à la réalisation de MOP par rapport au groupe contrôle (60,135,138), attestant d'un remodelage osseux supérieur dans le groupe expérimental.

Chez l'Homme, de nombreuses études randomisées et contrôlées avec *split-mouth design* confirment ces résultats (130,132,139,140). Ainsi la rétraction canine est significativement accélérée ($p<0,05$) d'un facteur 2 à 2,3 en moyenne, au maxillaire comme à la mandibule. Dans ces études, la mesure est en général effectuée 28 jours après les MOP, et les dimensions des MOP sont d'environ 1,5 mm de largeur et 2,5 à 3 mm de profondeur. Deux autres études à la méthodologie similaire décrivent une accélération significative ($p<0,05$) d'un facteur 1,5 en moyenne (84,133).

Mheissen *et al*. (2021) concluent dans une récente revue systématique avec méta-analyse que les MOP permettent une accélération significative mais temporaire de la rétraction canine et de la rétraction en-masse de 0,25 mm / mois et 0,31 mm / mois respectivement par rapport à un groupe contrôle (141). Une autre revue systématique avec méta-analyse conclut à une vitesse de rétraction canine augmentée de 0,45 mm / mois (142). Toutefois, les deux revues systématiques mentionnées présentent un taux d'hétérogénéité très élevé entre les études incluses, de plus de 95%.

La distalisation molaire montre en revanche des résultats non concluants chez Gulduren *et al*. avec une accélération d'un facteur 1,17 dans le groupe expérimental, différence statistiquement non significative ($p<0,05$) (132).

Il est aussi prouvé que les MOP entraînent l'apparition d'une inflammation localisée supérieure au groupe contrôle : ceci est démontré par l'augmentation significative de l'expression de cytokines et chimiokines au niveau du fluide gingival local (130). Ces marqueurs de l'inflammation pourraient témoigner d'une inflammation accrue en lien avec un PAR provoqué par les MOP.

- Il s'agit d'une technique très peu invasive. En effet, selon la littérature, les MOP ne provoquent quasiment pas ou peu de symptomatologie postopératoire. Seul un léger inconfort statistiquement non différent du groupe contrôle, et n'ayant pas nécessité le recours à une médication antalgique, a été décrit (130,133,139).

  D'autres études démontrent toutefois une douleur perçue statistiquement supérieure sur l'hémi-arcade ayant reçu les MOP pendant les 24h suivant la chirurgie mais pas au-delà (131,132,143). Il est cependant important de préciser que l'analyse de la douleur perçue suite aux MOP ne fait l'objet d'aucune étude en tant qu'objectif principal : elle est étudiée en tant qu'objectif secondaire.

  Un taux élevé de satisfaction des patients a été relevé à l'issue de l'intervention, ainsi qu'une volonté de la recommander à leurs proches (130–132). Cela en fait une intervention qui pourrait être proposée largement et avec un retour patient encourageant.

- Le temps opératoire est très réduit. Les perforations sont en effet très rapides et simples à réaliser : un seul outil est nécessaire, il n'y a pas de lambeau élevé ni de sutures à réaliser. La durée d'une telle intervention est comprise entre 15 et 30 minutes.

- Aucune complication sur le parodonte ou la vitalité pulpaire n'a été mise en évidence à ce jour (84,130–133,143). De la même manière, aucun impact sur l'incidence et l'étendue des résorptions radiculaires n'a été relevé suite à cette intervention.
  Les MOP ne semblent pas non plus occasionner de perte osseuse alvéolaire (84). Les recherches d'éventuelles complications doivent cependant être poursuivies.

- Risque probablement très limité de brides cicatricielles de par la faible étendue des perforations. Aucune étude ne relate l'apparition de cicatrices suite aux MOP.

- Pour les cas de rétraction canine à la suite d'une extraction prémolaire, les mouvements parasites de perte d'ancrage ou de bascule/rotation de la canine ne sont statistiquement

pas plus importants que dans les groupes contrôles (130,131). Cependant il s'agissait, là encore de mesures obtenues dans le cadre d'un objectif secondaire. La méta-analyse de Mheissen (2021) conclut à une absence d'effet significatif (p>0,05) des MOP sur la perte d'ancrage au niveau molaire par rapport au groupe contrôle (141).

- Un coût faible en raison du plateau technique restreint et de la rapidité de l'intervention. Coût d'une pièce à main Propel Excellerator® RT : environ 500€, et 100€ par embout.

#### 3.1.3. Inconvénients

- Pas d'accès visuel direct à l'os perforé comme pour l'ensemble des techniques mini-invasives. Une analyse clinique et radiographique préopératoire rigoureuse est primordiale.

- Pas de greffe possible.

- Certaines études n'obtiennent pas des résultats concluants quant à une potentielle accélération du déplacement associée aux MOP. Ainsi, Alkebsi *et al*. ou Aboalnaga *et al.* décrivent une accélération non significative (p>0,05) dans le cadre d'essais randomisés contrôlés en bouche fractionnée étudiant la rétraction canine assistée ou non par MOP (131,143). Une récente revue de la littérature menée par Sivarajan *et al.*, incluant 2 études (faible hétérogénéité), conclut également à une accélération non significative du DDP grâce aux MOP (p>0,05) (144). De plus, des biais seraient présents dans ces études et rendent les résultats controversés. Ces biais répertoriés concernent :
  - Un biais de sélection :
    - L'âge moyen des patients inclus qui varie de manière importante entre les études.
    - Le sexe des patients (75% de femmes dans certaines études, uniquement des sujets féminins chez Aboalnaga *et al*. (143)).

- Une variabilité méthodologique :
    - Objectif primaire variable.
    - Accélération minimale perceptible variable (20, 50%…).
    - Études rétrospectives ou prospectives.
    - Technique de randomisation variable.
    - Une durée d'étude trop courte. Souvent, l'étude considère la durée de fermeture de site d'extraction sans analyser la durée totale du traitement.
    - Le point de référence choisi pour le calcul des distances (incisive latérale, rugae palatin) : choix inconstant entre les études, et fiabilité du repère anatomique choisi remise en question.
    - L'absence de prise en compte de potentielles perturbations occlusales qui pourraient influencer le mouvement des dents étudiées.
    - Un traitement associé ou non à des extractions.
    - L'élévation d'un lambeau dans certains protocoles.
    - Le rayon d'action inconnu des MOP : le fabricant Propel® parle d'un rayon d'action de 6 à 10 mm entourant la zone perforée, mais aucune donnée précise ne figure dans la littérature.
    - Motif, profondeur et étendue variables des décortications.
    - Un relevé variable des mesures (alginates scannés : imprécisions possibles).
    - Une perte d'ancrage non mesurée dans certaines études.
    - Une variabilité des mouvements étudiés (rétraction en-masse ou en deux temps, translation…) et des mouvements parasites recherchés (bascule, rotation canine).
    - Une région étudiée inconstante entre les études (mandibule – maxillaire, secteur antérieur – postérieur).
    - Utilisation d'un ancrage squelettique (minivis) ou ancrage dentaire.
    - Utilisation de brackets auto-ligaturants ou conventionnels.
    - Utilisation de chaîne élastomérique ou métallique.
    - Absence d'étude des marqueurs de l'inflammation dans certaines études.
    - Extrapolation d'études précliniques à l'Homme.

Tous ces paramètres rendent compliqués la réalisation d'une méta-analyse pertinente de la littérature à l'heure actuelle. Notons que cette hétérogénéité entre les études ne concerne pas que les MOP mais l'ensemble des techniques de corticotomies.

### 3.1.4. Indications

- Les indications semblent être sensiblement les mêmes que pour les autres techniques de corticotomies.

- Dans la littérature, un nombre important de cas de fermeture de sites d'extraction (rétraction canine) est décrit. Néanmoins, la forte représentation de cette technique dans les essais peut s'expliquer par le fait que l'analyse de ce mouvement est particulièrement favorable à l'étude scientifique. En effet, il s'agit d'un mouvement propice à la mise en place d'essais en bouche fractionnée (bilatéralité des extractions), et au relevé des mesures qui est relativement aisé.

- Certains auteurs suggèrent que les MOP peuvent être particulièrement utiles dans la fermeture d'espaces importants, la protraction molaire (3ème molaire par exemple), la correction de l'inclinaison molaire, l'expansion d'arcade unilatérale ainsi que pour le déplacement de dents « difficiles » (135). Un cas de fermeture d'une béance antérieure menée avec succès en 16 mois, impliquant des MOP localisées en région molaire dans le but de faciliter l'ingression postérieure, a récemment été publié (145).

### 3.1.5. Contre-indications

- Ce sont les mêmes que pour les autres techniques de corticotomies : pathologies parodontales, mauvaise hygiène bucco-dentaire, perte osseuse préexistante, médications anti-inflammatoires, maladies métaboliques osseuses.

### 3.1.6. Discussion

- Le nombre et le motif des MOP est un sujet controversé dans la littérature. Néanmoins ce qui ressort de nombreuses études est que l'accélération est corrélée au nombre de perforations et donc au degré de décortication osseuse (135,146). L'accélération du DDP est par exemple supérieure avec 3 MOP plutôt que 2 (130,139).
- Dans de nombreux essais étudiant la rétraction canine après avulsion d'une prémolaire, la chirurgie de MOP est réalisée 6 mois après l'extraction et, seulement après, la rétraction orthodontique est initiée. Pourquoi ne pas effectuer ces étapes directement après l'extraction et ainsi profiter du PAR de l'extraction cumulé à celui des MOP ?

La réponse donnée par les auteurs (130) est la suivante : l'extraction occasionne un PAR important qui pourrait interférer avec les phénomènes biologiques mis en jeu suite aux MOP si les deux phénomènes concordent chronologiquement. En d'autres termes, le PAR des MOP pourrait être dilué dans le PAR de l'extraction et les mesures seraient alors biaisées. Pour éviter cela, les MOP et la rétraction orthodontique sont donc prévues 6 mois après l'avulsion. Par conséquent, on peut supposer que la durée totale de traitement actif au sein de ces essais est rallongée par rapport à celle d'un traitement réel (en dehors de toute étude) durant lequel la rétraction canine débute rapidement après l'extraction.

De plus, ce délai qui est de rigueur dans la majorité des essais actuels ne permet pas la mesure d'un potentiel effet synergique des PAR d'origines différentes (origine orthodontique, post-extractionnelle, et liée aux MOP).

Or nous avons vu précédemment que les phénomènes biologiques sont plus intenses et durables lorsque la corticotomie est combinée à un mouvement orthodontique par rapport à la corticotomie seule, ce qui atteste d'un effet synergique entre les deux traitements. On pourrait donc supposer qu'il existe de la même manière une synergie entre les PAR liés à l'orthodontie, aux MOP et à l'avulsion.

Toutefois, les auteurs précisent que, en dehors des essais cliniques, si des extractions sont prévues, il est conseillé de pratiquer les MOP soit le jour de l'extraction, soit peu de temps après.

- Certains auteurs s'interrogent à propos de la pertinence des essais en bouche fractionnée pour la validation d'une technique chirurgicale d'accélération du DDP (cela concerne aussi les autres protocoles de corticotomies). En effet, O'Brien écrit dans un commentaire d'article que même si l'accélération du métabolisme découlant des corticotomies semble être très localisée, il n'exclut pas un effet sur le côté contrôle de l'arcade (147).

#### 3.1.7. Conclusion

Un total de 9 essais cliniques randomisés et contrôlés est disponible dans la littérature actuelle concernant les MOP, incluant un total de 240 individus. Parmi ces études, cinq concluent à une accélération significative du déplacement dentaire provoqué assisté par MOP (84,130,133,139,140). Les autres concluent à une accélération non significative (131,132,134,143).

Si cette technique est probablement l'une des moins invasives et des plus simples à mettre en œuvre, elle ne fait donc pas consensus à l'heure actuelle et son efficacité demeure discutée.

Enfin, la revue systématique de Hoffmann *et al*. conclut que le niveau de preuve concernant cette technique est insuffisant, et que des études à plus grande échelle doivent être menées (148). Il n'y a à l'heure actuelle pas de données suffisantes pour conclure à une réelle efficacité des MOP, et les revues qui concluent à une accélération du DDP ont un taux d'hétérogénéité très élevé et / ou n'étudient que la période de rétraction canine sans prendre en compte la durée globale du traitement. Les recherches concernant ce protocole doivent être approfondies.

## 3.2. TECHNIQUE DE CORTICISION (Kim *et al.*, 2016)

La chirurgie de corticision est décrite par Kim *et al.* en 2009 (149). Elle est ensuite détaillée par Park *et al.* en 2016 (150). Les incisions sont réalisées directement au travers de la gencive vestibulaire et linguale / palatine sans élévation de lambeau, à l'aide d'une lame de bistouri (lame 15) qui pénètre l'os alvéolaire au moyen d'un maillet chirurgical. Le mot corticision provient de l'anglais *cortical bone incision* – incision de l'os cortical, et on retrouve parfois le terme « corticocision » ou « cortico-incision ».

### 3.2.1. Protocole (150)

Avant l'intervention :

- Les étapes pré-chirurgicales sont identiques à celles du protocole de PAOO.

Le jour de l'intervention :

- Bain de bouche antiseptique, et anesthésie locale par infiltrations para-apicales.
- L'incision transmuqueuse débute verticalement à une distance de 5 mm du sommet de la papille gingivale pour la préserver (Figure 22). La lame de bistouri doit être inclinée à 45-60° par rapport au grand axe de la dent voisine, la partie tranchante de la lame étant dirigée vers le vestibule. Le maillet permet l'enfoncement de la lame jusqu'à une profondeur d'environ 10 mm afin de perforer l'os cortical mais aussi de pénétrer l'os spongieux. La lame est ensuite retirée avec des mouvements d'oscillations apico-coronaires pour prévenir la fracture de l'instrument et permettre une désinsertion progressive.

  Cette intervention ne se limite donc pas uniquement à l'épaisseur corticale. Les corticisions étant relativement profondes, le trajet d'incision s'arrête apicalement environ aux 2/3 de la longueur radiculaire afin de ne pas léser le paquet vasculo-nerveux périapical.

- Une fois les incisions terminées, un rinçage au sérum physiologique est réalisé pendant quelques minutes, ainsi qu'un tamponnement avec des compresses de gaze jusqu'à

obtention de l'hémostase. Cette technique ne nécessite pas de sutures ou de pansement chirurgical.

- Un antalgique de pallier 1 (type paracétamol) est ensuite prescrit associé à un bain de bouche antiseptique pendant 1 semaine.

Figure 22 : Maillet chirurgical et porte-lame. Photographies peropératoires illustrant les incisions de corticisions. Images issues de : Park *et al*. (2016) (150)

### 3.2.2. Discussion

La littérature présente des résultats inconsistants sur le modèle animal :

Chez le rat, Peron *et al.* (151), Tsai *et al.* (135), Kurohama *et al.* (152), Librizzi *et al.* (153), Murphy *et al.* (154,155), comparent un groupe contrôle (mouvement orthodontique simple) avec d'une part un groupe corticision et d'autre part un groupe corticotomie. Dans ces 6 études, aucune différence significative n'est retrouvée entre les différents groupes

concernant la vitesse du déplacement dentaire orthodontique, la réponse alvéolaire, ou l'incidence de résorption radiculaire et ce, quelle que soit la force orthodontique appliquée.

Les auteurs pondèrent cependant leurs résultats affirmant que dans chacune de ces études, les rats étudiés étaient jeunes et en période de croissance (âgés de 6 semaines) et possédaient donc physiologiquement un remodelage important par rapport à des rats adultes que l'on peut retrouver dans d'autres études concluantes (17 semaines). La différence entre groupes contrôle et expérimentaux était donc moins importante. Ils appuient cet argument à l'aide d'une étude de Ren *et al.* (26) démontrant que selon l'âge, le rat présente un taux de déplacement orthodontique différent.

Les études de Kim *et al.* (149), Tsai *et al.* (135), et Gu *et al*. (156) montrent, tant à l'échelle tissulaire que cellulaire et moléculaire, que les corticisions sont pourtant à l'origine d'un PAR intense chez le rat. En effet, ces 3 études décrivent une déminéralisation accrue dans le groupe expérimental à la suite des corticisions, ainsi qu'une zone de hyalinisation moins étendue et se résorbant plus vite par rapport au groupe contrôle. De plus, à 28 jours, l'apposition de nouvel os était 3,5 fois plus élevée dans le groupe corticision, reflet d'une accélération du remodelage osseux. Ces investigations concernant les phénomènes biologiques mis en œuvre lors des corticisions viennent soutenir l'idée que ces dernières pourraient bel et bien accélérer le déplacement dentaire provoqué.

À notre niveau de connaissance actuelle, aucune étude clinique randomisée et contrôlée n'a été réalisée chez l'Homme. Sur les 16 articles apparaissant avec le mot-clef *corticision*, seules 12 évoquent réellement la technique de corticision, parmi lesquelles 9 sont des études pré-cliniques (dont 3 seulement obtiennent des résultats concluants). Seuls quelques cas sont rapportés chez l'Homme à l'heure actuelle, et montrent des résultats concluants (150,157). Park *et al*. affirment ainsi avoir résolu un encombrement maxillaire léger en 3 semaines, et un encombrement modéré en 9 semaines. Enfin, un cas d'encombrement avec protrusion antérieure associée à une Classe II d'Angle nécessitant des extractions, est résolu en 10 mois en combinaison avec une chirurgie de corticision au maxillaire, en début de traitement.

### 3.2.3. Avantages

- Rapidité de l'acte opératoire.
- Pas de surchauffe tissulaire liée à un instrument rotatif ou piézo-chirurgical.
- Coût très faible du plateau technique.
- Possibilité théorique de greffe osseuse ou gingivale associée en réalisant un décollement des tissus, mais non décrite dans la littérature.

### 3.2.4. Inconvénients

- L'utilisation d'un maillet chirurgical ne permet pas un contrôle précis / optimal de l'enfoncement et du trajet de la lame dans l'os alvéolaire.
- L'incision de la couche corticale à l'aide d'une lame peut être difficile en raison de la densité de cette couche osseuse, notamment à la mandibule. Aussi, il est nécessaire de prêter attention à la torsion voire à la fracture de la lame et l'utilisation d'un bistouri sécurisé est recommandée.
- Le mailletage peut occasionner des mouvements de la tête du patient si celle-ci n'est pas stabilisée soit par le patient lui-même soit par l'assistante. L'utilisation répétée du maillet chirurgical peut aussi entraîner un inconfort important pour le patient, voire un effet de surprise et une certaine anxiété. Risque de « vertige paroxystique positionnel bénin » (mouvement des otolithes) lié au mailletage (158).
- Risque probable de brides cicatricielles, bien que cela n'ait pas été décrit dans la littérature.
- La littérature actuelle est insuffisante sur le sujet et ne permet pas de mettre en évidence une réelle efficacité ou inefficacité clinique de cette technique chirurgicale. Des études supplémentaires doivent être menées.

### 3.2.5. Indications

- Les cas décrits dans la littérature sont des alignements d'encombrements antérieurs légers à modérés (150), ainsi qu'un cas de malocclusion nécessitant une protraction de molaires mandibulaires associant une corticision en site d'extraction molaire à un ancrage par minivis (157).
- Les indications pourraient s'étendre à celles des corticotomies conventionnelles si la technique s'avérait efficace.

### 3.2.6. Contre-indications

- Les contre-indications sont les mêmes que pour la technique de corticotomies conventionnelle.

## 3.3. TECHNIQUES MINI-INVASIVES PIEZO-CHIRURGICALES

Les techniques de piézochirurgie font appel à l'utilisation d'inserts dont la fréquence de vibration appartient au champ des fréquences ultrasonores - généralement comprise entre 20 et 40kHz.

La piézochirurgie, basée sur le phénomène de piézoélectricité, repose sur l'utilisation d'un courant alternatif fourni par un générateur, et traduit par un transducteur (la pièce à main) en des micro-oscillations mécaniques (Figure 23).

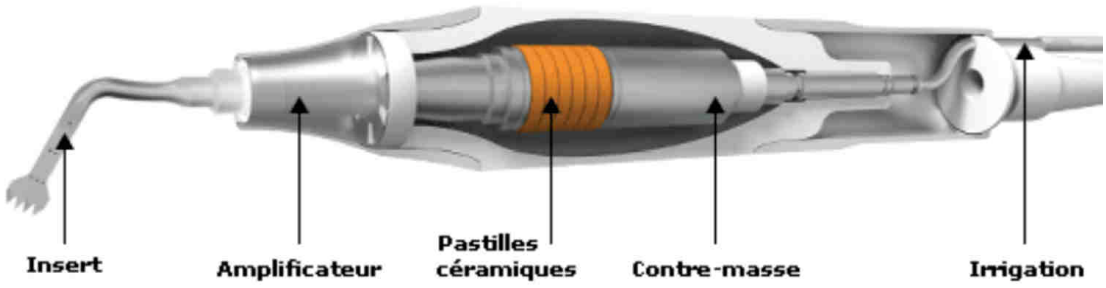



Figure 23. Fonctionnement d'un insert de piézochirurgie (ici le Piézotome de chez Acteon®)

Aux fréquences d'utilisation classiques, les inserts piézoélectriques coupent préférentiellement les tissus minéralisés et moins les tissus mous.

Plusieurs fabricants proposent des moteurs de piézochirurgie : Acteon®, EMS®, Esacrom®, Mectron® etc.

A l'heure actuelle, deux techniques de corticotomies par piézochirurgie mini-invasive sont décrites : la piézocision et la piézopuncture. Ces deux techniques fonctionnent sur le même principe et avec les mêmes outils, mais diffèrent par l'étendue et le motif des décortications.

Notons que seules les techniques mini-invasives, sans élévation de lambeau sont décrites dans cette partie, mais que la piézo-chirurgie peut tout à fait être utilisée après élévation d'un lambeau pour la réalisation de corticotomies conventionnelles, comme nous l'avons évoqué plus haut.

### 3.3.1. **TECHNIQUE DE PIEZOCISION® (Dibart *et al*., 2009)**

Dibart, Sebaoun et Surmenian introduisent la technique de piézocision — aussi appelée « piézocorticision », en 2009 (72,159).

Il s'agit d'une approche au cours de laquelle des décortications verticales transmuqueuses sont réalisées dans l'os alvéolaire interproximal, à l'aide d'un insert piézochirurgical, en vestibulaire uniquement et au travers de micro-incisions gingivales (159,160). Ces corticotomies ont généralement une profondeur de 3 mm pour une largeur de moins d'1 mm, et une longueur de 5 à 10 mm.
Bien que mini-invasive, cette technique a la particularité d'autoriser si nécessaire une greffe osseuse et / ou gingivale par tunnelisation entre les différentes incisions (159,161).

Les auteurs introduisent la technique de piézocision comme une variante de la corticision, tout en palliant l'impossibilité de greffe osseuse de cette dernière, en proposant un

protocole plus aisé, et en évitant les désagréments du mailletage (162). En 2013, ils déposent un brevet concernant cette procédure (163).

Bien que la piézocision soit une technique relativement connue, elle reste récente et peu référencée. En 2020, 13% des répondants orthodontistes américains affirment avoir recours à ce protocole, et ce de manière occasionnelle (13).

#### 3.3.1.1. Protocole

- Préalablement à l'intervention, le chirurgien réalise un bilan parodontal complet par sondage ainsi qu'un bilan radiographique rétro-alvéolaire et tridimensionnel permettant notamment la détection : (73)
    - De déhiscences ou fenestrations.
    - De particularités anatomiques (forme atypique des racines) ou de zones de proximité radiculaire : si la distance séparant deux racines est faible (< 2 mm d'épaisseur osseuse inter-radiculaire), il est déconseillé de pratiquer la décortication.
    - Des foramina mentonniers ou autres structures anatomiques critiques.
    - Des zones où un apport osseux est nécessaire.
- Une à deux semaines avant l'intervention, le dispositif orthodontique est mis en place et activé afin d'initier le mouvement. Certains auteurs prévoient toutefois l'activation rapidement après l'intervention ou parfois au cours du même rendez-vous (72,127,164).
- Réalisation par le patient d'un bain de bouche antiseptique à la chlorhexidine 0,12 % pendant 1 à 2 minutes, ou à la povidone iodée 10%.
- Anesthésie locale par infiltration para-apicale / gingivale.
- Incisions verticales interproximales de pleine épaisseur dans la gencive, à l'aide d'une lame 15, pour permettre l'accès de l'insert piézochirurgical au cortex alvéolaire (Figure 24). Généralement, la hauteur de ces « micro-incisions » ne dépasse pas 10 mm. Ces

incisions doivent respecter une distance d'au moins 4 mm du sommet de la papille interdentaire et rester à une distance d'au moins 2 mm de la gencive marginale. Des traits d'incisions plus coronaires pourraient entraîner une rupture de la vascularisation de cette zone pouvant aboutir à une nécrose papillaire avec une potentielle résorption du septum osseux (73). Par ailleurs, Charavet préconise que les incisions soient réalisées autant que possible dans la gencive attachée pour permettre une cicatrisation gingivo-muqueuse optimale et réduire le risque de brides cicatricielles.

Pour la réalisation de ces incisions muqueuses, il est possible d'utiliser des guides métalliques verticaux, fixés sur le dispositif orthodontique, puis validés par radiographie rétro-alvéolaire (angulateur indispensable) pour réaliser ces incisions plus sereinement (Figure 25).

Figure 24. Photographie illustrant la réalisation des incisions gingivo-muqueuses à l'aide d'une lame 15. Image issue de Sebaoun *et al.*, 2011 (72).

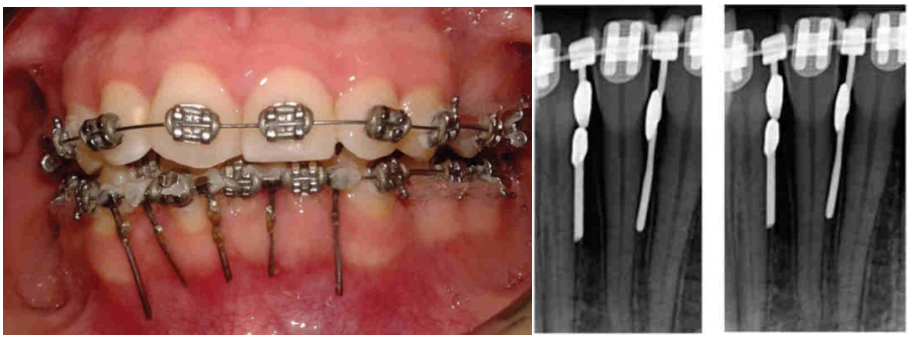


Figure 25. Cliché montrant l'utilisation de guides métalliques verticaux pour faciliter le tracé d'incision et le contrôle radiographique 2D. Issue de Gibreal *et al*., 2019 (165).

L'incision muqueuse doit traverser le périoste afin d'exposer le cortex alvéolaire. A ce stade, les tissus mous peuvent être légèrement écartés et/ou décollés pour visualiser l'os sous-jacent (Figure 26).

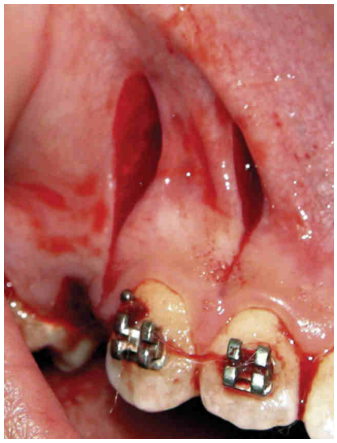


Figure 26. Photographie après écartement des incisions gingivo-muqueuses, la visibilité sur l'os est améliorée. Issue de Abbas *et al*., 2016 (100)

- Une fois les incisions gingivo-muqueuses réalisées, il est utile de mesurer, à l'aide d'une sonde parodontale, la profondeur de tissus mous séparant la surface gingivale du cortex alvéolaire. La valeur mesurée est ensuite répercutée sur la profondeur de pénétration de l'insert piézoélectrique afin de contrôler son insertion. Ainsi, si la profondeur gingivale est de 3 mm et la profondeur de décortication souhaitée de 3 mm, l'insert devra pénétrer la gencive de 6 mm.

- Incisions piézochirurgicales de décortication alvéolaire à travers les ouvertures réalisées, à l'aide d'un insert (type BS1 sur Piézotome®, ou OT7S-3 Piezosurgery chez Mectron® - Figure 27) sur une profondeur osseuse de 3 mm et une longueur de 5 à 10 mm, et sous irrigation abondante (Figure 28). Le saignement important obtenu lorsque l'os trabéculaire est atteint indique une profondeur de coupe suffisante (Figure 29).

Figure 27. À gauche : insert PZ1 - Acteon® (3 mm de longueur et 0,35 mm d'épaisseur) et à droite : insert OT7S-3 - Mectron®.

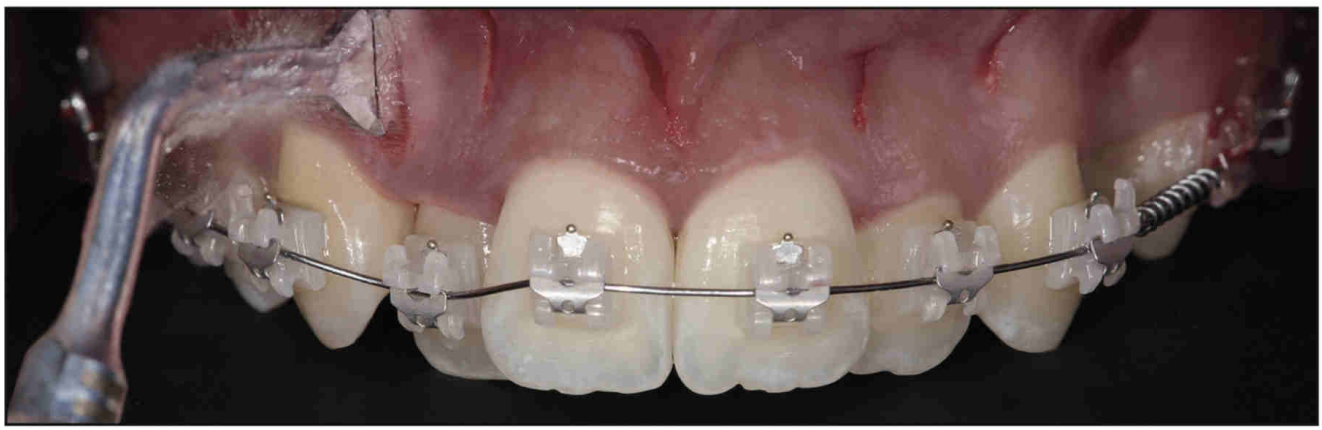


Figure 28. Photographie intra-orale peropératoire en vue antérieure illustrant la réalisation des incisions de décortication alvéolaire sous irrigation abondante. Issue de Charavet *et al.*, 2019 (36).

Figure 29. Résultat d'une corticotomie réalisée au piézotome (3 mm de profondeur, 5 mm de longueur) mise en évidence d'un saignement attestant de la pénétration de l'os médullaire. Issue de Charavet *et al*., 2019 (36).

- A ce stade, si besoin, une augmentation osseuse peut être associée. Pour cela, une technique de tunnelisation sélective est utilisée. A l'aide d'un décolleur, un espace sous-périosté reliant les incisions est créé au contact osseux afin de permettre la mise en place du matériau de greffe (Figure 30).

  Typiquement, en présence d'un encombrement antérieur associé à une table osseuse vestibulaire très fine, à des déhiscences et/ou fenestrations osseuses, la greffe osseuse peut être envisagée. En effet, des défects osseux sont retrouvés sur plus de 50% des sites chez des patients de Classe I présentant un encombrement léger à modéré (166).

  De même, si l'épaisseur gingivale / muqueuse est réduite ou qu'une récession gingivale est présente à proximité, un apport de tissus mous peut aussi être envisagé au cours de l'intervention.

  Lorsque des extractions sont indiquées, elles peuvent être réalisées pendant la chirurgie et des décortications vestibulaires peuvent alors être réalisées en regard de l'alvéole d'extraction.

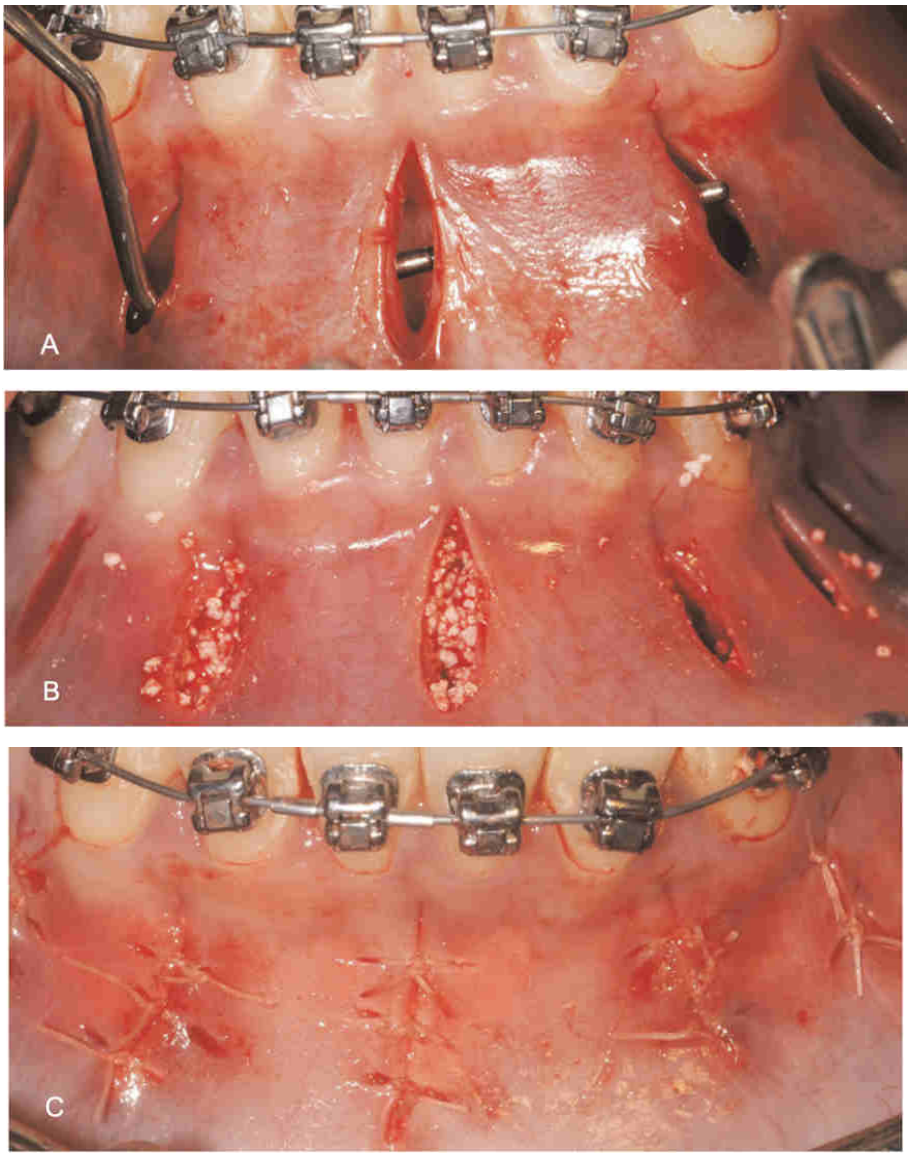



Figure 30. Photographies intra-orales peropératoires en vue antérieure du secteur antérieur mandibulaire dans le cadre d'une chirurgie de piézocision. A. Les incisions communiquent les unes avec les autres par un couloir sous-périosté. B. Comblement des enveloppes avec un biomatériau résorbable (RTR, Septodont, Lancaster, Etats-Unis) dans le couloir obtenu. C. Réalisation de sutures (points simples) résorbables 5-0. Images issues de Charavet *et al*., 2018 (161).

- Les incisions ne sont pas systématiquement suturées, sauf aux endroits où le matériau de greffe est déposé, et si le trajet d'incision s'étend au-delà de la gencive attachée dans la muqueuse (un fil résorbable 5-0 peut alors être utilisé) (Figure 31). L'utilisation d'une colle tissulaire peut aussi être envisagée.

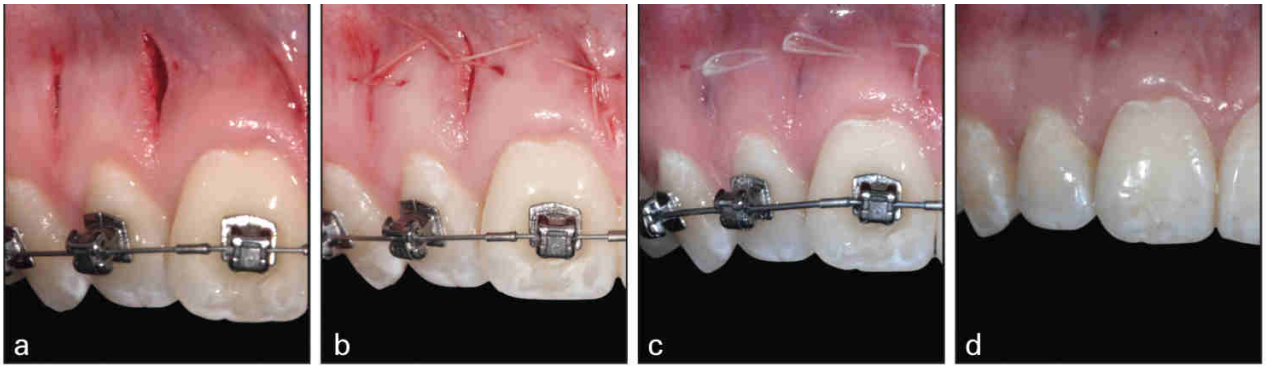



Figure 31. Clichés intra-oraux en vues antérieures d'un site de piézocision. Intervention chirurgicale et suivi post-opératoire. a : Incisions verticales de piézocision. b : Sutures résorbables par points simples. c : Cicatrisation à une semaine. d : En fin de traitement. Image issue de Charavet *et al*., 2019 (36).

- Rinçage au sérum physiologique, obtention de l'hémostase (compression possible avec de la gaze stérile).

- Une prescription antalgique postopératoire de paracétamol est recommandée (164).

  Un bain de bouche à la chlorhexidine 0,12% pendant 1 à 2 semaines est aussi associé (36,72). Certains auteurs prescrivent un anti-inflammatoire non stéroïdien en prévention de l'œdème (72,167). D'autres proscrivent catégoriquement leur usage pour éviter toute interférence potentielle avec le PAR (36,168). Un brossage précautionneux et parcimonieux est conseillé en restant à distance des sites chirurgicaux au cours de la semaine suivant l'intervention.

- Un contrôle postopératoire à 1 semaine est prévu, ainsi qu'un suivi orthodontique régulier à intervalle de 2 à 3 semaines, à adapter en fonction de l'évolution du traitement. Il est conseillé de rapprocher les séances de suivi orthodontique de sorte à profiter du mouvement accéléré.

N.B. : il existe un kit d'inserts dédié, chacun étant conçu pour une région précise de l'arcade (Figure 32).

Figure 32. Kit Piézocision (Acteon®). De gauche à droite : PZ1: insert scie ronde dédié aux corticotomies antérieures (trait à 3 mm). PZ2L : décortications postérieures vestibulaires côté droit du patient. PZ2R : décortications postérieures vestibulaires côté gauche du patient. PZ3 : insert fin dédié aux décortications antérieures sur des espaces inter-radiculaires très étroits.

#### 3.3.1.2. Avantages

- La littérature est riche en études concernant cette technique. Plusieurs essais précliniques concluants sont disponibles. Dibart démontre, d'un point de vue tissulaire et histologique, une déminéralisation et un nombre d'ostéoclastes significativement plus importants dans le groupe « piézocision + orthodontie » par rapport aux groupes contrôles « piézocision seule » et « orthodontie seule », suggérant un remaniement osseux accru et plus durable (169). Cela suggère par ailleurs une action synergique entre la piézocision et le mouvement orthodontique sur le remaniement osseux. Ainsi, la stimulation orthodontique permet de prolonger le PAR et la phase de déminéralisation osseuse provoqués par la piézocision ainsi que de repousser la phase de reminéralisation. Dibart démontre aussi que la piézocision permet de réduire la durée de la phase de latence précédant le mouvement orthodontique, et il obtient un mouvement orthodontique 2 fois plus rapide dans le groupe « piézocision + orthodontie » par rapport au groupe « orthodontie seule ».

Des rapports de cas concluants sur l'Homme sont ensuite publiés (160,170,171). Puis l'efficacité de la piézocision est démontrée dans plusieurs essais cliniques randomisés contrôlés. L'intervention entraîne une diminution significative de la durée totale du traitement orthodontique, de 43% chez Charavet (168) et 60% chez Mehr (172) dans le cas d'encombrements légers à modérés, et de 59% chez Gibreal (165) dans les cas d'encombrements sévères en combinaison avec des extractions de prémolaires mandibulaires ($p<0,0001$). Dans cette dernière étude, la durée moyenne de résolution de l'encombrement est de 53,5 ± 12,5 jours dans le groupe expérimental (orthodontie + piézocision) contre 131,4 ± 38,5 jours ($p<0,0001$) dans le groupe contrôle (orthodontie).

Dans les cas de rétraction canine le mouvement est 1,5 à 2 fois plus rapide avec l'utilisation de la piézocision durant les 2 à 3 mois suivant l'intervention (100,173–175). Quant à la rétraction incisive dans des cas de malocclusions de Classe II 1, la durée totale du traitement est significativement réduite de 27% ($p<0,001$), avec une vitesse de rétraction accélérée en moyenne de 53% (176). Selon Sebaoun, une grande partie des malocclusions y compris sévères, peut être résolue en l'espace de 5 à 9 mois, impliquant des temps de traitement 3 fois plus courts que ceux observés avec un traitement conventionnel pour une malocclusion comparable (72).

Une récente méta-analyse regroupant 8 essais cliniques, s'intéressant à la rétraction canine assistée par piézocision, conclut à une rétraction significativement accélérée durant les deux premiers mois – avec une différence de 0,57 ± 0,42 mm/mois ($p<0,00001$) par rapport au groupe contrôle (177). La rétraction en-masse assistée par minivis est aussi 2 fois plus rapide avec piézocision, 4 mois après le début de la rétraction : 4,8 ± 0,57 mm contre 2,4 ± 0,33 mm dans le groupe contrôle (178). De plus, aucune différence significative n'est mise en évidence concernant la durée de rétraction en-masse avec piézocision comparée à la PAOO (4,04 ± 1,1 mois contre 3,75 ± 2,14 mois) (179).

Une récente méta-analyse conclut que la piézocision permet une accélération significative ($p<0,03$) d'environ 46% dans la durée totale de résolution d'encombrements antérieurs par rapport au traitement orthodontique classique (180).

- De plus, il s'agit d'une technique sûre : dans la revue systématique de Yi *et al*., aucune complication n'est décrite (181).

  En effet, concernant de potentielles complications sur les éléments dentaires : la quasi-totalité des études conclut à un risque de résorption radiculaire comparable voire diminué par rapport à un traitement conventionnel (177). Aucune perte de vitalité pulpaire conséquente à une telle intervention n'est décrite à ce jour dans la littérature (73,168).

  D'un point de vue parodontal, aucune aggravation des indices n'est détectée dans les différents essais cliniques (poches parodontales, récessions gingivales, saignement au sondage, indice de plaque). De même, les déhiscences et fenestrations osseuses sont restées stables dans la grande majorité des études lors d'analyses par CBCT (36,72,168,175,182). Cependant, les études sur de potentielles complications doivent être approfondies.

- Les suites postopératoires sont minimes. Dans son essai clinique, Charavet montre que cette technique n'occasionne pas de douleur significativement supérieure au traitement orthodontique seul (168). En effet, la prise de paracétamol est statistiquement équivalente dans les deux groupes.

- Les patients ayant subi cette intervention sont globalement plus satisfaits de leur traitement que le groupe contrôle (orthodontie seule), plus à même de renouveler le traitement s'il était à refaire, et plus enclins à conseiller cette thérapeutique à leurs proches. La plupart des études relate un très fort taux d'acceptation, et la satisfaction vis-à-vis de la durée totale du traitement est supérieure après la piézocision par rapport au traitement orthodontique conventionnel.

  Ces données sont issues d'une étude menée par Charavet *et al.* et ayant pour objectif principal l'analyse des PROMs (*Patient reported outcomes measures*) correspondant

aux retours-patients, au ressenti perçu et à l'impact du traitement subi sur la qualité de vie (183). Les mêmes données ressortent d'une autre étude analysant l'impact de la piézocision sur la qualité de vie menée par Strippoli *et al*. ainsi que de deux autres études de Charavet *et al*. et Keser *et al*. (164,168,170). Les PROMs sont considérées comme étant de grand intérêt pour la validation d'une nouvelle technique dans l'arsenal thérapeutique bucco-dentaire (184).

Enfin, un essai randomisé et contrôlé récent mené par Gibreal *et al*. décrit des résultats très encourageants concernant l'inconfort postopératoire suite à la piézocision (185). Le jour suivant l'intervention, aucune différence significative n'est mise en évidence entre le groupe expérimental (piézocision) et le groupe contrôle (orthodontie conventionnelle) concernant le niveau de douleur, les difficultés à la mastication et à la déglutition, les mouvements mandibulaires, et le taux de satisfaction est là encore très élevé.

- La piézocision n'entraîne pas de perte d'ancrage supérieure par rapport à un traitement orthodontique conventionnel (100,174). Une méta-analyse conclut même à une perte d'ancrage supérieure dans le groupe contrôle pour les cas de rétraction canine (177).

- C'est une technique qui n'entraîne pas non plus d'augmentation significative des mouvements parasites (comme la rotation canine pendant sa rétraction) bien qu'une légère augmentation ait été mesurée dans une étude (174).

- Il existe une possibilité d'associer une greffe osseuse ou de tissus mous durant le même temps opératoire. Ainsi, cela permettrait de corriger des faiblesses parodontales fréquemment observées (récessions, déhiscences osseuses) et d'éviter leur aggravation au cours du traitement orthodontique (161). C'est la seule technique mini-invasive dont l'association avec une greffe peropératoire est décrite dans la littérature (72,161). Dans une récente étude de Charavet, la piézocision combinée à une augmentation alvéolaire permet une augmentation significative de l'épaisseur osseuse vestibulaire à l'issue du traitement (Figure 33) (186). L'épaisseur est davantage augmentée aux tiers moyen et apical, et le gain moyen sur toute la hauteur de crête alvéolaire est de 2,7 ± 2,7 % (p=0,018).

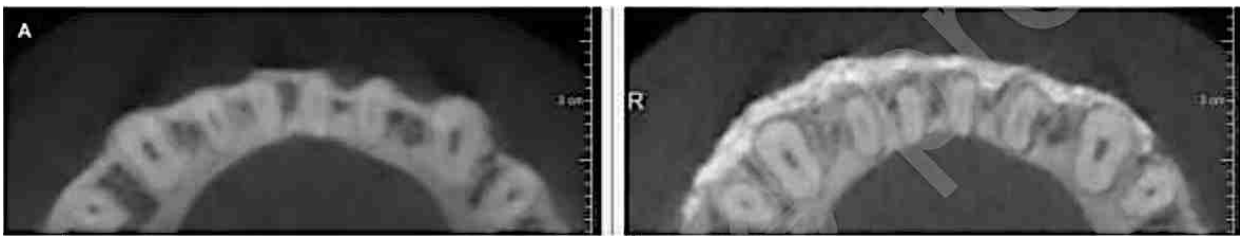



Figure 33. Coupes transversales obtenues par CBCT, avant (à gauche) et en fin de traitement orthodontique (à droite), chez un patient ayant subi une chirurgie de piézocision avec augmentation alvéolaire par tunnelisation. Le matériau semble bien intégré à l'os natif. Images issues de Charavet *et al*., 2020 (186).

- La piézocision offre également la possibilité d'utiliser un guide chirurgical (187–190) (Figures 34-35). Cet outil, qui permet la de réaliser les incisions muqueuses et la décortication alvéolaire de manière plus prudente et planifiée, s'accompagne toutefois d'un coût supérieur ainsi que d'une potentielle surchauffe tissulaire en lien avec une difficulté d'accès de la solution d'irrigation au site opératoire. Une irrigation manuelle doit fréquemment interrompre la coupe et une pression réduite sur l'instrument doit être utilisée. Des rigoles d'irrigation peuvent aussi être conçues sur le guide. Certaines imprécisions liées à la qualité du CBCT et de l'empreinte optique, à la confection du guide, à l'impression et au positionnement du guide en bouche peuvent également intervenir et sont à prendre en compte.

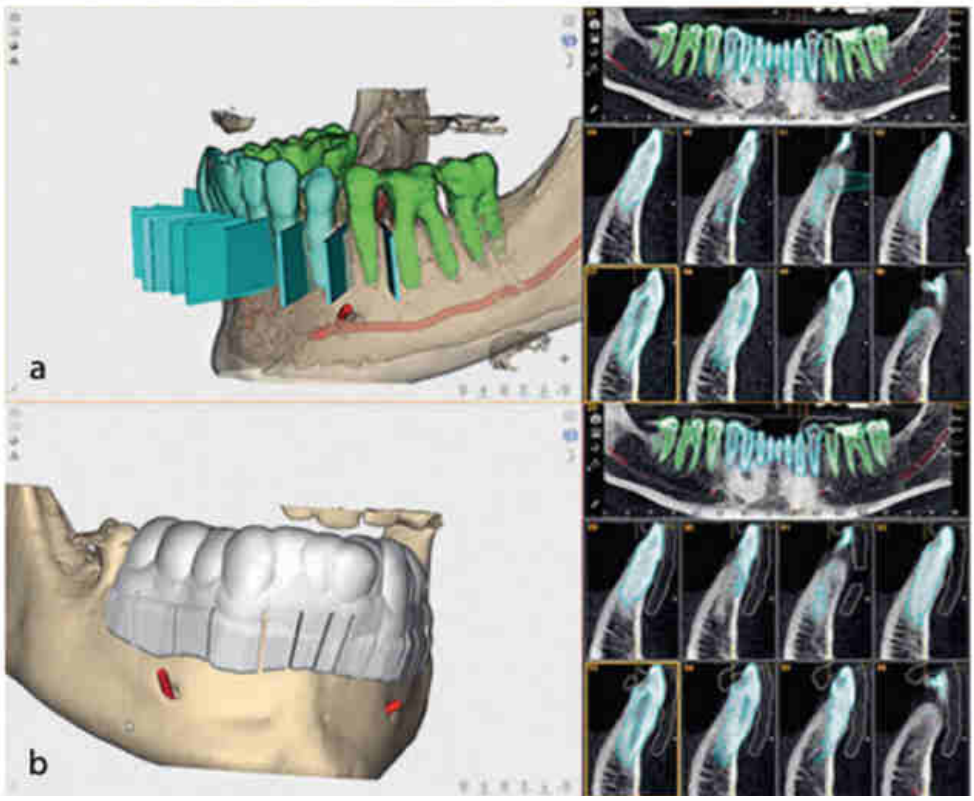



Figure 34. Conception du guide assistée par ordinateur à l'aide d'un logiciel superposant les données du CBCT à celles obtenues par empreinte optique des arcades. a : plans de coupes. b : visualisation virtuelle du guide. Image issue de Paris *et al.*, 2020 (190).

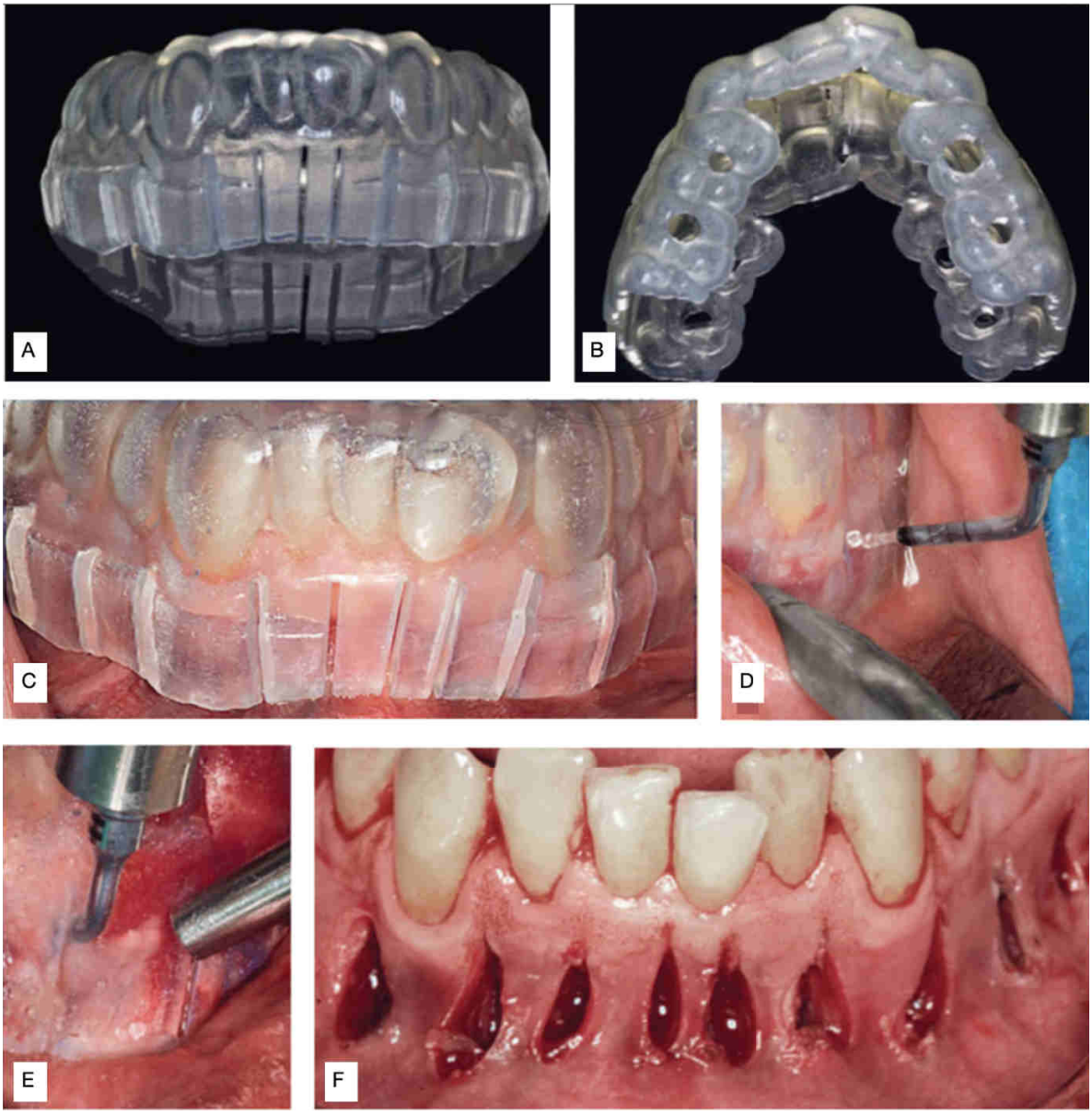



Figure 35. Après impression du guide. A : vue frontale du guide mandibulaire (largeur des rainures : 0,8 mm). B : vue occlusale du guide maxillaire montrant les ouvertures permettant le contrôle du bon positionnement. C : positionnement du guide mandibulaire en bouche. D-E : incisions au travers du guide sous irrigation abondante (100 ml / min). F : résultat après réalisation des incisions de décortication. Images issues de Paris *et al.,* 2020 (190).

- Un temps opératoire réduit : environ 1 heure pour une intervention sur les 2 arcades avec greffe contre environ 3 heures pour les techniques de corticotomies classiques (72).

Les avantages communs aux techniques de piézochirurgie :

- Précision et sécurité de coupe des inserts ultrasonores. En effet, la coupe micrométrique et lente permise par ces instruments les rendraient plus précis que les instruments rotatifs conventionnels dont les vibrations sont macrométriques et la vitesse de coupe beaucoup plus élevée. Le volume d'os réséqué est moindre par rapport à une ostéotomie conventionnelle, et la cicatrisation primaire de l'os est plus rapide (191–193).

- La capacité des inserts piézochirurgicaux d'éliminer le tissu minéralisé en minimisant le risque de lésion accidentelle des tissus mous environnants est intéressante : on parle de sélectivité de coupe (188,191,192). La tête de l'instrument piézochirurgical est moins active lorsqu'elle perd le contact avec le tissu minéralisé car la fréquence d'oscillation convient particulièrement à la section de ce type de tissus. Un glissement accidentel au niveau des tissus mous environnants est donc de moindre danger par rapport aux instruments rotatifs à grande vitesse.

- Il s'agit d'une technologie préférée par les patients en comparaison avec une approche conventionnelle impliquant une pièce à main et des instruments rotatifs. En effet, dans le cadre d'avulsions de dents de sagesse mandibulaires, l'utilisation d'inserts piézoélectriques a mesuré un confort supérieur auprès des patients, en lien avec une diminution des vibrations et du bruit peropératoires, mais aussi une diminution de la douleur et de l'œdème postopératoires, le tout accompagné d'une anxiété inférieure dans le groupe piézochirurgie (194–196).

- Variété des inserts disponibles : de toutes tailles, de toutes formes et certains présentent un trajet incurvé (autorisant une meilleure vue directe) permis par l'absence de rotation de l'insert.

- Le bistouri piézoélectrique travaille avec des micro-oscillations par balayage et les forces exercées sur la pièce à main sont inférieures à celles des instruments rotatifs conventionnels. Cela permettrait un contrôle plus aisé de la pièce à main et donc du trajet d'incision.

- Ces micro-oscillations abrasives transmettent une information plus précise quant à la résistance et la dureté de l'os, alors que pour une corticotomie conventionnelle, la fraise actionnée à très haute vitesse coupe de la même manière un os dense qu'un os mou. La profondeur de coupe serait donc plus aisément contrôlée en piézochirurgie.

#### 3.3.1.3. Inconvénients

- Il existe un risque non négligeable de brides cicatricielles (Figure 36). En effet, celui-ci concerne 50 à 70% des sites en l'absence de sutures. Il s'agit de la seule complication parodontale qui a été relevée.

  Deux études menées par Charavet *et al*. tendent toutefois à prouver que la mise en place de sutures sur les sites incisés diminue l'étendue des cicatrices et donc leur visibilité, sans toutefois diminuer l'incidence de ces dernières. En effet, lorsque des sutures sont réalisées, 66% des sites présentent malgré tout des brides cicatricielles mais parmi ces cicatrices, la grande majorité sont punctiformes et seulement 12% sont linéaires (contre 34% en l'absence de sutures) (164,168,187,197).

  Bien que les cicatrices soient relativement mineures, cet inconvénient doit être mentionné dans le consentement éclairé et le patient doit impérativement en être informé.

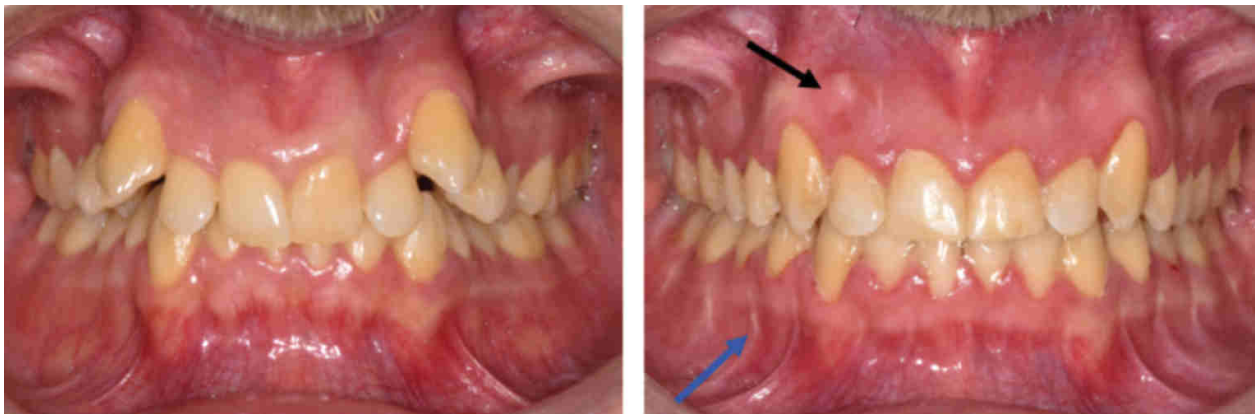


Figure 36. Photographies intra-orales en vue antérieure. A gauche : avant le début du traitement. A droite : à l'issue du traitement orthodontique assisté par piézocision. Les brides cicatricielles sont visibles : la flèche noire montre une cicatrice punctiforme tandis que la flèche bleue montre une cicatrice linéaire. Images issues de Strippoli *et al.*, 2017 (164).

- Si la majorité des études ayant investigué l'incidence de la perte de substance radiculaire suite à la piézocision conclut à un risque faible voire diminué de cette complication, un essai contrôlé mené par Patterson *et al*. conclut l'inverse (198).

  En effet, cette étude analyse l'incidence de deux types de lésions radiculaires : les cratères radiculaires traumatiques potentiellement générés par l'insert de manière accidentelle, et la résorption radiculaire iatrogène (Figure 37). A l'aide d'un *split-mouth design* et de la micro-tomographie aux rayons X (*micro-CT*), Patterson analyse les surfaces radiculaires de prémolaires extraites (après avoir réalisé des décortications par piézocision) en les comparant à des prémolaires extraites de l'hémi-arcade contrôle (sans piézocision).

  Il trouve une augmentation de 44% de l'incidence des résorptions radiculaires après la piézocision en comparaison avec une thérapeutique orthodontique conventionnelle, ainsi qu'une augmentation de 110% de perte volumique radiculaire totale (cumulant les cratères traumatiques et la résorption radiculaire iatrogène).

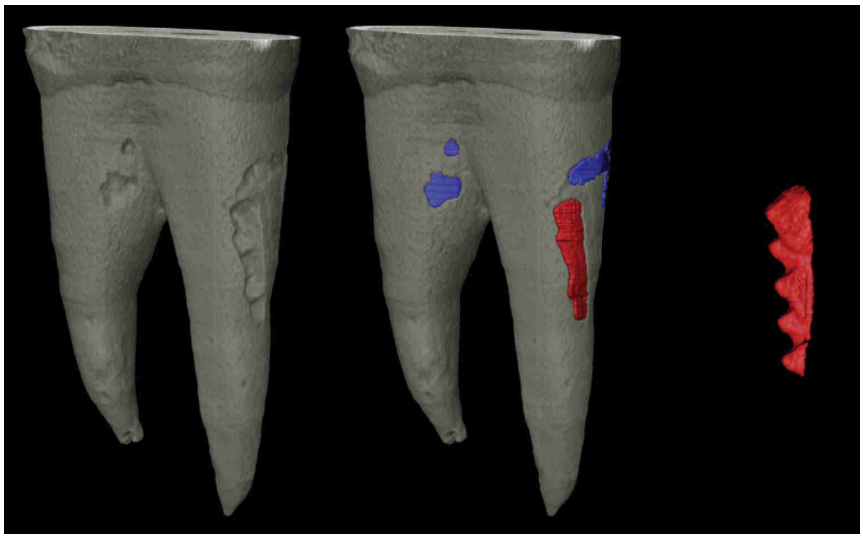


Figure 37. Images obtenues par *micro-CT* attestant de la présence de cratères radiculaires dont la topographie correspond à celle de l'insert utilisé (en rouge), ou issus de phénomènes de résorptions (en bleu). Image issue de Patterson *et al.*, 2017 (198).

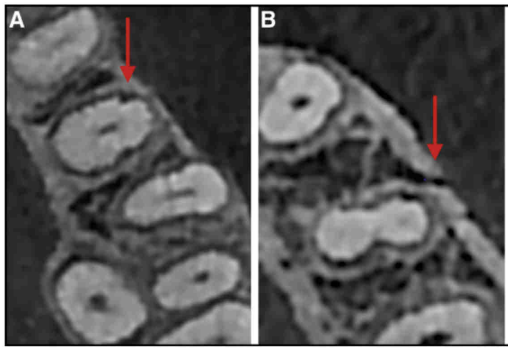



Figure 38. A : lésion radiculaire et B : cicatrisation corticale incomplète, observées par CBCT à l'issue d'un traitement orthodontique assisté par piézocision. Images issues de Strippoli *et al*., 2017 (164).

Les cratères observés peuvent être expliqués en partie par l'absence d'élévation de lambeau muco-périosté et donc de vision directe sur l'os réséqué menant à une navigation chirurgicale plus périlleuse. La piézocision peut en effet, comme toutes les autres techniques de corticotomie occasionner un risque de lésion des racines en particulier dans les zones de forte proximité inter-radiculaire.

Il est par ailleurs intéressant de relever que c'est la seule étude qui ait analysé la perte de substance radiculaire à l'aide d'outils radiographiques aussi précis. Patterson reproche ainsi à la plupart des études menées jusqu'alors sur la piézocision d'avoir voulu quantifier des résorptions radiculaires à l'aide de clichés radiographiques bidimensionnels (rétro-alvéolaires). Il évoque la superposition des structures adjacentes qui peut intervenir avec ce type de radiographie, la magnification, la capacité de diagnostiquer la résorption seulement en mésial et distal des surfaces radiculaires, et un manque de reproductibilité et de sensibilité de ces clichés.

Dans cette étude comme dans la majorité des études sur les corticotomies, un seul et même chirurgien pratique l'intervention sur l'ensemble des sites. Il est important de rappeler qu'il s'agit de techniques hautement praticien-dépendantes, et l'apport de l'imagerie tridimensionnelle ainsi que l'utilisation d'un guide chirurgical pourraient pallier l'absence de vue directe en aidant à la planification et la localisation des incisions, et ainsi prévenir la formation accidentelle de ces cratères radiculaires iatrogènes. Les patients candidats aux techniques de corticotomies doivent par conséquent être choisis prudemment et les incisions réalisées uniquement en présence d'espaces inter-radiculaires suffisants. Il est par ailleurs indispensable que de nouvelles études se penchent sur cette complication, à l'aide d'outils de mesure aussi précis.

- L'accélération du déplacement générée par la piézocision est plus importante au maxillaire qu'à la mandibule, et y intervient plus rapidement et durablement (162,168,187). Il est possible que cette différence soit en lien avec une densité osseuse supérieure à la mandibule. Cette variation doit être prise en compte dans les modalités du traitement.

- L'accélération n'intervient que dans les 3 premiers mois suivant la chirurgie (125,169,187). La réalisation d'une seconde chirurgie à ce stade pourrait être pertinente, mais nous ne disposons pas d'un recul suffisant quant à l'intérêt d'une ou plusieurs récurrence(s) de cette intervention. Seule une étude de cas menée par Keser *et* al. est disponible concernant la piézocision séquentielle et a fourni des résultats encourageants. Le cas rapporté est celui d'une patiente présentant une malocclusion de Classe III avec encombrements maxillaire (7,5 mm) et mandibulaire (2 mm) ainsi

qu'une occlusion inversée antérieure et postérieure. Une première séance de piézocision a été réalisée en début de traitement, au maxillaire uniquement, car le traitement orthodontique a débuté par cette arcade. Deux mois et demi plus tard, après correction transversale, le collage de l'arcade mandibulaire suivi d'une nouvelle séance de piézocision à la mandibule est réalisé. Le traitement a duré au total 8 mois. Cependant, la piézocision séquentielle doit encore être investiguée.

- Enfin, des cas d'encapsulation du matériau de greffe ont été décrits par Charavet suite à une chirurgie de piézocision combinée à une augmentation alvéolaire (Figure 39). Dans son étude, 2 patients sur les 10 ayant subi l'intervention ont présenté cet effet indésirable.

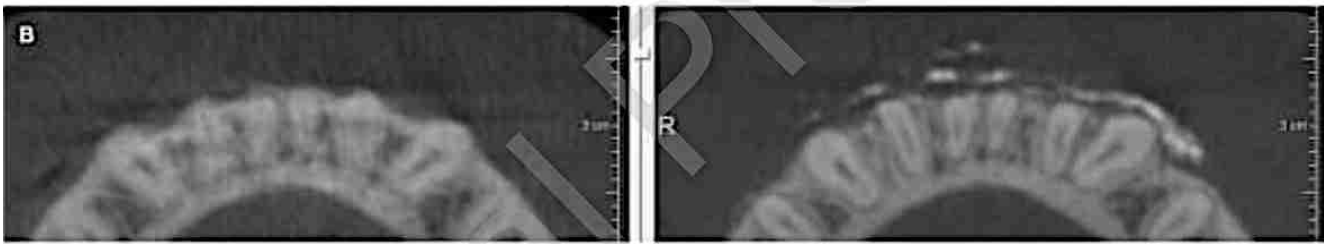



Figure 39. Coupes transversales issues de CBCT avant (à gauche) et après traitement orthodontique (à droite) chez un patient ayant subi une chirurgie de piézocision avec augmentation alvéolaire. A droite, le matériau de greffe semble encapsulé et à distance de l'os natif. Images issues de Charavet *et al*., 2020 (186).

Inconvénients communs aux techniques de piézochirurgie :

- Coût élevé d'un moteur de piézochirurgie : débute à 4 000 – 5 000€ et peut aller jusqu'à 10 000€, et les inserts coûtent plusieurs centaines d'euros chez la plupart des fabricants, avec une répercussion sur le coût de l'intervention. Toutefois, la piézochirurgie présente plusieurs domaines d'application et ne se limite pas à cette seule intervention : en implantologie, en chirurgie extractionnelle et en chirurgie parodontale par exemple.

- La piézochirurgie est relativement chronophage par rapport aux techniques rotatives : la décortication à l'aide d'un instrument piézochirurgical est plus lente qu'avec un instrument rotatif classique, toutefois cette différence est non significative d'après une étude menée sur des soulevés de sinus par Barone *et al*. (199), et des résultats concordants sont obtenus dans une autre étude menée sur les corticotomies et comparant les instruments rotatifs versus piézoélectriques (107).

#### 3.3.1.4. Indications (73,160,170,200)

- Malocclusions de Classe I avec dysharmonie dents-arcade modérée à sévère, nécessitant ou non des extractions.
- Malocclusions de Classe II modérées avec dysharmonie dents-arcade modérées à sévère, nécessitant ou non des extractions. Dans les cas avec extractions, 2 à 3 incisions corticales peuvent être réalisées en regard de l'alvéole au cours de la même intervention.

  Ces deux indications représentent les indications principales de la piézocision.
- Certaines malocclusions de Classe III.
- Les supraclusions, même importantes.
- Les béances antérieures.
- La distalisation de molaires.
- La palatoversion des apex radiculaires.
- L'intrusion ou extrusion rapide.
- L'expansion d'arcade. Un cas de résolution d'une occlusion inversée postérieure unilatérale avec réalisation d'incisions corticales vestibulaires de la 3 à la 7 est rapporté dans la littérature (171). Une récente étude contrôlée comparant l'expansion maxillaire rapide (EMR) assistée par piézocision à l'EMR conventionnelle dans le cadre d'une

occlusion inversée postérieure a par ailleurs été publiée, concluant à une efficacité de la piézocision dans la résolution de ce type de malocclusion (201).

- La décompensation rapide précédant une chirurgie orthognathique.
- La chirurgie d'exposition d'une dent incluse.
- Un traitement orthodontique rapide à la demande du patient constitue une indication fréquente, et des gouttières d'alignement y sont souvent associées. A titre d'exemple, un patient concerné par son encombrement antérieur avec une forte demande esthétique, souhaitant aligner rapidement les dents apparentes lors du sourire (« *social-six* »(167)), est un candidat potentiel à la piézocision. Cette technique est par ailleurs compatible avec l'orthodontie linguale.
- La prévention ou la correction des défects osseux et/ou gingivaux qui peuvent intervenir pendant ou après le traitement orthodontique, par l'association d'une technique de greffe.

#### 3.3.1.5. Contre-indications (36,127,164,170)

- Une ligne du sourire haute : les potentielles brides cicatricielles peuvent provoquer un inconfort esthétique, d'autant plus lorsqu'elles sont exposées lors du sourire (secteur antérieur, sourire gingival). C'est la principale contre-indication de cette technique.
- Les pigmentations gingivales d'origine ethnique : la technique peut être à l'origine de brides cicatricielles qui ne se repigmentent pas ou peu, et donc d'un préjudice esthétique en cas de découvrement gingival important.
- Les contre-indications communes aux techniques de corticotomies évoquées plus haut.

#### 3.3.1.6. Discussion

- Si pour certains auteurs, la piézocision associée à une greffe osseuse permettrait d'augmenter l'enveloppe des mouvements orthodontiques réalisables dans le sens transversal (160), la littérature reste controversée à ce sujet et Charavet précise que

cette technique ne peut aucunement être proposée comme une alternative aux extractions thérapeutiques (36).

- Concernant le caractère invasif de la piézocision, une étude a investigué l'influence de cette intervention sur la bactériémie (202). Si aucune différence significative entre les échantillons préopératoires et postopératoires n'a été mise en évidence, 3 participants sur les 30 ayant subi la piézocision présentaient toutefois une bactériémie postopératoire alors qu'aucun des participants ne présentait une bactériémie préopératoire. Cela soulève une discussion quant au caractère invasif d'une telle procédure et des précautions à prendre vis-à-vis des patients à risque d'endocardite infectieuse notamment.

- Dans une étude de Mehr complétée et publiée par Uribe *et al*., une accélération de la durée du traitement de l'encombrement mandibulaire n'est démontrée que durant les 4 à 5 semaines suivant la piézocision, tandis qu'au-delà, aucune différence significative n'est mesurée entre le groupe piézocision et le groupe orthodontie conventionnelle (127,172). Toutefois, il est nécessaire de préciser que les incisions corticales ne s'étendaient dans cette étude qu'à 1 mm de profondeur et 4 mm de longueur contre une profondeur de 3 mm pour une longueur de 5 à 10 mm dans la quasi-totalité des autres études. Or l'ampleur du PAR est dépendante de l'intensité de la chirurgie (42,58,62).

  Par ailleurs, les incisions n'ont été réalisées que sur 3 sites entre les canines mandibulaires, bien que dans les autres essais étudiant la piézocision dans le cadre d'encombrements mandibulaires, le nombre de sites incisés est supérieur.

  D'un point de vue orthodontique, les sujets inclus dans cette étude n'ont été suivis que toutes les 4 à 5 semaines par leur orthodontiste. Les activations trop espacées n'ont donc probablement pas permis de profiter de manière optimale de l'intensification et l'accélération des phénomènes biologiques conséquentes à la piézocision. En effet, dans les autres études, un suivi orthodontique bimensuel est programmé. Enfin, l'activation du dispositif orthodontique a été effectuée immédiatement après la chirurgie,

alors que dans la majorité des études celle-ci est effectuée 1 semaine avant la chirurgie pour initier le mouvement orthodontique.

- Dans l'étude de Gibreal *et al*. portant sur des cas d'encombrements antérieurs mandibulaires sévères nécessitant des extractions, une réduction significative importante (de 59%) de la durée totale du traitement orthodontique est constatée à l'aide de la piézocision par rapport au groupe contrôle ($p<0,001$). C'est l'étude qui trouve la réduction du OAT (*overall alignment time* : la durée totale de traitement actif) la plus importante (165). Suite à ces résultats concluants, l'auteur suggère qu'il pourrait y avoir un effet synergique du PAR engendré par les incisions piézochirurgicales et le PAR lié aux extractions comme nous l'avons évoqué plus haut.

- Malgré les essais contrôlés randomisés menés sur la piézocision et les revues systématiques disponibles, le niveau de preuve de ce protocole reste faible. La publication d'une méta-analyse est difficile à l'heure actuelle compte tenu du nombre restreint d'études disponibles et du peu de sujets inclus dans chacune d'elles, ainsi que de leur hétérogénéité :

    - Variabilité méthodologique concernant :
        - Les mouvements orthodontiques étudiés.
        - La durée des études.
        - Les modalités d'administration (ponctuelle ou séquentielle, localisée ou généralisée).
    - Quantité faible de données quant à la stabilité des traitements sur le long terme.
    - Risque de biais considéré comme moyen à élevé selon les revues systématiques disponibles (148,177) :
        - Modifications du protocole chirurgical prévu au cours de l'intervention chez certains sujets.
        - Processus de randomisation approximatif dans 2 études notamment.
        - Age moyen des sujets : les populations étudiées sont composées quasi exclusivement d'adultes ce qui n'est pas représentatif de la population orthodontique moyenne composée en grande partie d'adolescents. L'efficacité

d'une telle méthode ne peut donc pas être extrapolée chez le sujet jeune. Toutefois, ces thérapeutiques s'adressent principalement à une population adulte.

- Environnement hospitalo-universitaire : population aux profils orthodontiques probablement plus sévères que la population moyenne, surestimation possible de la durée nécessaire des traitements.
- Double aveugle impossible à mettre en œuvre du fait de la technique chirurgicale : études ouvertes où seule la personne qui collecte les données ne connaît pas la répartition des groupes.
- Biais de confusion (concernant la causalité entre la chirurgie et l'accélération du DDP).
- Présence de données incomplètes à l'issue de certaines études, de cas rapportés sélectivement (uniquement lorsqu'ils sont concluants : biais de publication) etc.

Si la piézocision est l'une des techniques de corticotomie mini-invasive les plus documentées de la littérature et pour laquelle les résultats sont les plus encourageants, le niveau de preuve ainsi que le recul clinique sont toujours insuffisants à l'heure actuelle. Cependant, les études disponibles constituent une base intéressante pour la planification de nouvelles études de plus grande ampleur.

### 3.3.2. **TECHNIQUE TURC – *TUNNEL REGENERATIVE CORTICOTOMY* (Brugnami *et al.*, 2020)**

La technique TURC (corticotomie régénérative par tunnelisation) est présentée par Brugnami en 2020 comme une technique palliant à la fois les manques de la PAOO et ceux de la piézocision (203). Elle s'apparente toutefois davantage à une variante du protocole de piézocision en y associant une tunnelisation par abord intra-sulculaire ainsi qu'une régénération osseuse guidée.

#### 3.3.2.1. Protocole

N.B. : en dehors des étapes qui sont détaillées, le protocole est identique à celui de la piézocision.

- Les incisions verticales gingivo-muqueuses sont réalisées classiquement à l'aide d'une lame, et sont reliées entre elles par tunnelisation sous-périostée grâce à un décolleur.
- Une incision intra-sulculaire est également réalisée à 360° autour de chaque dent pour laquelle une augmentation est prévue. Les tissus mous parodontaux doivent pouvoir être tractés coronairement « au-delà de la jonction amélo-cémentaire » dans le but de gagner un volume suffisant et permettre le positionnement de la greffe osseuse au niveau de l'os marginal.
- Un décollement sous-périosté en direction coronaire, au travers des incisions verticales est donc également prévu, rejoignant les incisions intra-sulculaires.
- Les incisions de décortication sont ensuite réalisées au travers des incisions muqueuses à l'aide d'un insert piézo-chirurgical, comme en piézocision conventionnelle.
- Une membrane collagénique (xénogénique et résorbable dans l'étude de Brugnami) est ensuite insérée dans l'espace sous-périosté et suturée dans le but de la stabiliser.
- Le matériau de greffe osseuse (xénogreffe chez Brugnami) est déposé entre la membrane et l'os alvéolaire, en position la plus coronaire possible. Lorsqu'une quantité suffisante est déposée, une pression digitale délicate permet d'assurer la répartition homogène du biomatériau et son étalement sur la surface osseuse.
- Les incisions verticales sont ensuite suturées (points simples).

#### 3.3.2.2. Avantages

- Ce protocole semble moins invasif que la PAOO du fait de l'absence de lambeau, et il permettrait selon l'auteur d'éviter la dispersion des particules de greffe qui migreraient « en direction apicale » dans la technique de piézocision.

#### 3.3.2.3. Inconvénients

- Technique plus invasive que la technique de piézocision, de par l'extension du décollement gingivo-muqueux.
- Niveau de preuve très faible : un seul cas est décrit dans la littérature (203).
- Difficulté opératoire, technique chronophage.
- Risque de brides cicatricielles, comme pour la piézocision.

#### 3.3.2.4. Discussion

- C'est l'un des seuls cas pour lequel l'utilisation d'une membrane a été décrite. La membrane est utilisée ici principalement pour contenir la greffe et prévenir la dispersion des granules.

### 3.3.3. **TECHNIQUE DE PIEZOPUNCTURE (Kim *et al*. 2013)**

La piézopuncture est une technique piézochirurgicale qui consiste en la réalisation de corticotomies punctiformes dans l'os alvéolaire inter-proximal par voie transmuqueuse. La technique est introduite par Kim *et al*. en 2013 (162). La différence avec les MOP réside dans l'utilisation d'un insert ultrasonore piézochirurgical (Figure 38) et non d'un dispositif de perforation rotatif (manuel ou mécanisé).

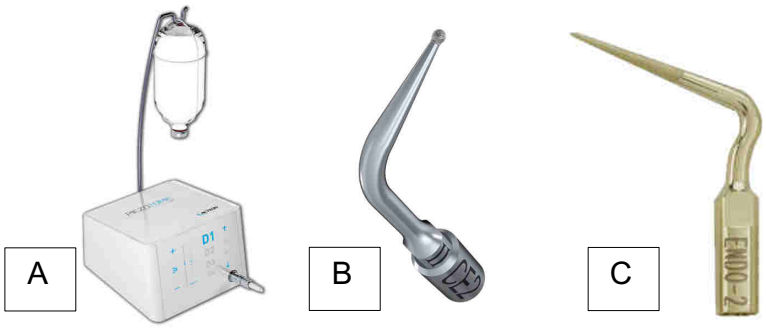



Figure 40. A : Piézotome du fabricant Acteon®. B : Insert CE2 pour Piézotome. C : Insert Endo Tip 2 ProUltra de chez Dentsply Sirona®.

La technique a d'abord été étudiée chez le chien au travers d'un essai contrôlé randomisé comparant la technique avec un traitement orthodontique conventionnel (162). La protraction prémolaire au maxillaire et la rétraction prémolaire à la mandibule étaient augmentées respectivement d'un facteur 3,26 au maxillaire et 2,45 à la mandibule. Des analyses histologiques démontrent par ailleurs une augmentation significative de l'activité anabolique et donc de l'apposition osseuse au sein du groupe expérimental.

Par la suite, deux cas sur l'Homme sont rapportés par Omidkhoda *et al.* décrivant le traitement d'encombrements antérieurs associés à une Classe II dentaire et squelettique nécessitant l'extraction de premières prémolaires (204). Ce rapport de cas qui a mis en œuvre un *split-mouth design* comparant l'association « mouvement orthodontique et piézopuncture » au traitement orthodontique seul, a permis de mettre en évidence une augmentation comprise entre 49% et 74% de la distance parcourue par la canine au bout du 2ème mois postopératoire. Cependant, les mesures n'ont pas été relevées au-delà.

Plus récemment, le même auteur a mené un essai en bouche fractionnée sur 17 patients mesurant la vitesse de rétraction canine (205). Aucune différence significative n'est trouvée entre le côté piézopuncture et le côté contrôle. L'apport véritable de cette technique est donc remis en question.

#### 3.3.3.1. Protocole (162,204)

- Les étapes pré-chirurgicales sont les mêmes que pour les autres protocoles.

- La pointe de l'insert est positionnée au point d'impact souhaité, perpendiculaire au rempart alvéolaire, et pénètre la gencive et l'os cortical. La profondeur de pénétration corticale doit être d'au moins 3 mm. Pour cela, l'insert est maintenu en place pendant environ 5 secondes, sous une irrigation abondante au liquide physiologique afin d'éviter une surchauffe.

  Les perforations sont répétées de nombreuses fois autour de chaque dent à déplacer, en mésial et en distal, du côté vestibulaire comme palatin. Exemple : 10 à 25 perforations autour de chaque dent à déplacer.

- Un rinçage avec du liquide physiologique est opéré par le chirurgien, puis une compresse appliquée sur la zone perforée permet d'obtenir l'hémostase par compression. Cette technique ne nécessite pas de fermeture muqueuse.

- Une prescription antalgique post-opératoire peut être associée. Un bain de bouche antiseptique à la chlorhexidine est aussi conseillé pendant 1 à 2 semaines.

#### 3.3.3.2. Avantages

- Il s'agit d'une des techniques les moins invasives en raison de l'étendue très limitée des décortications grâce au motif punctiforme et à l'utilisation d'un instrument piézoélectrique.

- Confort postopératoire.

- Rapidité de réalisation.

- Simplicité et reproductibilité du protocole.

- Possibilité d'utiliser un guide chirurgical.

#### 3.3.3.3. Inconvénients

- Faible recul clinique, peu d'études disponibles et parmi elles certaines sont non concluantes.

- Probable risque de brides cicatricielles punctiformes (de faible étendue).

- Pas de greffe possible.

#### 3.3.3.4. Discussion

- On peut s'interroger quant à l'intérêt réel qu'apporte cette technique par rapport aux micro-ostéoperforations.

### 3.3.4. **TECHNIQUE DE DISCISION (Buyuk *et al*. 2018)**

La discision est une technique proposée en 2018 par Buyuk *et al*., directement inspirée de la piézocision, mais qui diffère par l'utilisation d'un disque rotatif sur pièce-à-main ou sur contre-angle, et non d'un insert piézochirurgical (206). Elle permet ainsi au chirurgien de s'affranchir d'un équipement de piézochirurgie dont le caractère onéreux est un inconvénient majeur.

#### 3.3.4.1. Protocole

Le protocole est rigoureusement le même que celui de la piézocision, à l'exception de l'étape de décortication :

- Après avoir réalisé les incisions muqueuses avec une lame 15, les décortications alvéolaires sont réalisées au moyen d'un disque rotatif sur pièce à main, à haute vitesse et sous irrigation abondante (Figure 39). Un disque d'un diamètre de 6 à 7 mm est conseillé afin de ne pas dépasser 3,5 mm de profondeur de coupe, et l'épaisseur du disque est d'environ 0,3 mm. La fermeture des plaies à l'aide de sutures est conseillée, comme pour la piézocision.

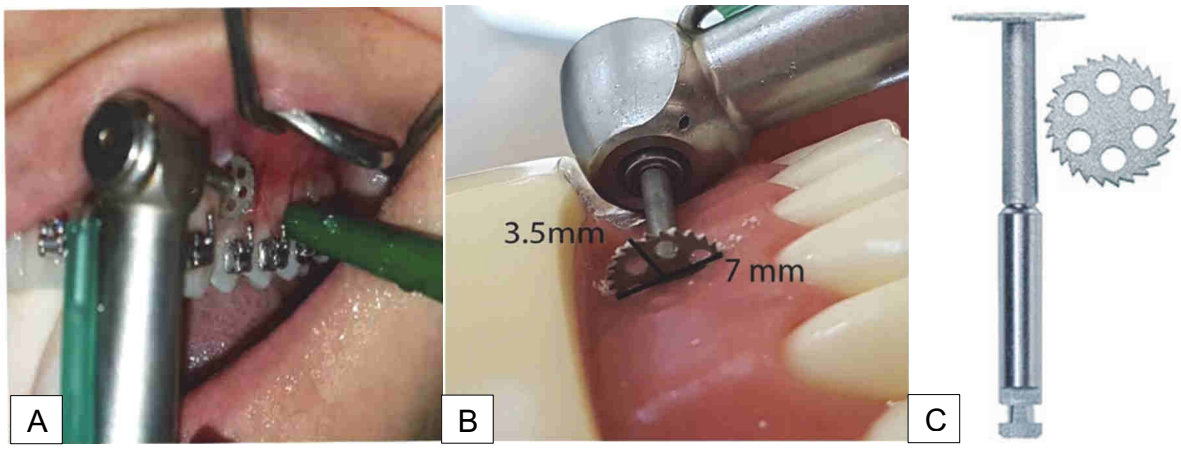



Figure 41. A : Réalisation des décortications de discision à l'aide d'un disque rotatif sur contre-angle sous irrigation abondante. B : Positionnement du disque (7 mm de diamètre) par rapport au rempart alvéolaire. L'enfoncement maximal entraîne une pénétration du disque sur 3,5 mm de profondeur. C : Disque de choix pour la discision. Images issues de Buyuk *et al*., 2018, et Yavuz *et al*., 2018 (206,207).

#### 3.3.4.2. Avantages

- Il s'agit d'une technique plus accessible d'un point de vue logistique et financier, que la MOP ou la piézocision. En effet, le disque peut être utilisé sur un contre-angle ou une pièce à main classiques et ne nécessite pas d'investissement supplémentaire pour le praticien. Cela peut diminuer le coût de l'intervention, et fait de cette technique une solution accessible à un plus grand nombre de praticiens et donc de patients.

- L'épaisseur de l'instrument de coupe est de 0,3 mm comparé à 0,6 mm pour l'insert piézo-chirurgical. Cette épaisseur réduite de moitié pourrait limiter le risque de lésion des racines ou structures anatomiques avoisinantes.

- Dans l'étude randomisée contrôlée de Yavuz *et al.*, comparant l'efficacité de cette technique à celle de la piézocision et à l'orthodontie seule, la discision raccourcit significativement la durée du traitement par rapport au groupe « orthodontie seule », et ce d'environ 55% (207). Aucune différence significative n'est mesurée en comparaison avec la piézocision.

- Il s'agit d'une technique moins chronophage que la piézocision, la coupe étant plus rapide (207). Un temps opératoire réduit de moitié est évoqué par les auteurs cependant, aucune étude ne propose de comparaison quantitative de la durée des deux protocoles opératoires.

- Aucune complication n'est décrite à ce jour.

#### 3.3.4.3. Inconvénients

- Difficulté opératoire : la discision ne présente pas les avantages de la piézochirurgie comme la sélectivité de coupe, et l'orientation du disque doit être parfaitement contrôlée ce qui peut s'avérer délicat pour certaines régions de l'arcade.

- Une seule étude randomisée contrôlée est disponible et le recul à moyen et long termes n'ont pas encore été étudiés.

#### 3.3.4.4. Indications et contre-indications

- Ce sont les mêmes que pour la piézocision.

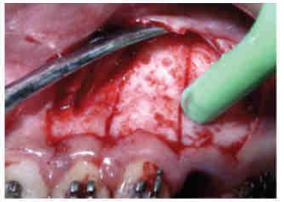
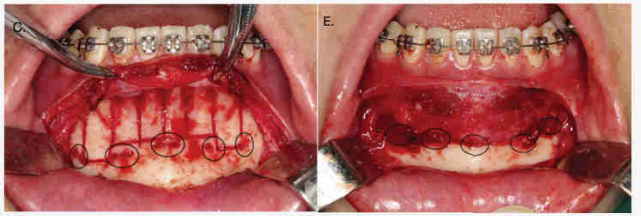
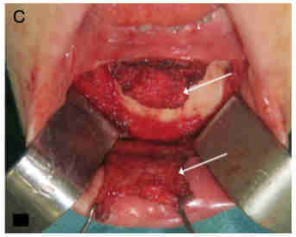
## 3.4. TECHNIQUES ALTERNATIVES NON CHIRURGICALES

Outre les thérapeutiques chirurgicales d'accélération orthodontique que nous avons passées en revue, d'autres approches ont été étudiées comme des approches pharmacologiques locales ou systémiques (208,209) comme l'administration de parathormone PTH (210), de thyroxine (23), de prostaglandines (211), de relaxine (212), d'ostéocalcine (213) ou encore de vitamine D3 (214). Mais si certaines de ces approches ont démontré une efficacité dans l'accélération du mouvement orthodontique, elles ont parfois mené à des effets indésirables comme la douleur locale (215) ou un risque de résorption radiculaire sévère (216).

Des approches physiques et mécaniques ont aussi été investiguées : la LLLT : *Low-Level Laser Therapy* ou thérapie laser à faible intensité – aussi appelée photobiomodulation

(217,218), la stimulation électrique (219,220), les champs électromagnétiques (221), les vibrations mécaniques par résonance (222) ou encore le LIPUS : *Low-Intensity Pulsed Ultrasound* ou échographie pulsée de faible intensité (223). Cependant, le niveau de preuve ainsi que le recul par rapport à ces méthodes sont insuffisants voire nuls.

## 3.5. TABLEAUX RECAPITULATIFS DES PROCEDURES CHIRURGICALES D'ACCELERATION DU DEPLACEMENT DENTAIRE :

| Intervention | Avantages | Inconvénients | Illustration |
|---|---|---|---|
| **Corticotomie alvéolaire de référence : PAOO (Wilcko, 2000)** * | - Bon niveau de preuve<br>- Réduction moyenne de la DTTO d'un facteur 2,6 (entre 1,8 et 4)<br>- Vue directe<br>- Greffe associée : augmentation du volume alvéolaire<br>- Réduction du risque de RR<br>- Réduction du risque de récidive | - Caractère invasif ++<br>- Chronophage<br>- Coût + | |
| **Technique mono-corticale (Germeç, 2006)** | - Réduction moyenne de la DTTO comparable à la technique de référence<br>- Vue directe<br>- Réduction du caractère invasif<br>- Réduction de la durée de l'intervention | - Niveau de preuve faible<br>- Caractère invasif + | |
| **Corticotomie avec lambeau de préservation parodontale (Abbas, 2016)** | - Vue directe<br>- Préservation de la gencive marginale et papillaire | - Niveau de preuve faible<br>- Difficulté opératoire<br>- Caractère invasif + |  |
| **Technique du dumpling (Ma, 2016)** | - Vue directe<br>- Préservation de la gencive marginale et papillaire<br>- Stabilité de la greffe + | - Niveau de preuve faible<br>- Difficulté opératoire<br>- Caractère invasif + |  |
| **Technique du lambeau périosté avec affaiblissement mentonnier (Saint-Surin, 2020)** | - Vue directe<br>- Préservation de la gencive marginale et papillaire<br>- Stabilité de la greffe ++ | - Niveau de preuve faible<br>- Difficulté opératoire<br>- Caractère invasif + |  |

* **Défaut gingival :** - Gencive fine - Récessions → **Greffe gingivale**

**Défaut alvéolaire :** - Déhiscences - Fenestrations - Corticale fine → **Greffe osseuse**

- **Défaut gingival + alvéolaire** Et / ou - Nécessité d'augmenter le périmètre d'arcade (dysharmonie dents-arcade) → **Greffe gingivale + osseuse**

*D'après Dounis et al. (2020)*

| Intervention | | Avantages | Inconvénients | Illustration |
|---|---|---|---|---|
| **Corticotomies Minimalement Invasives** | **Micro-ostéoperforation (Alikhani, 2013)** | - Réduction moyenne de la DTTO d'un facteur 1,5 à 2,3<br>- Très peu invasif<br>- Facilité opératoire ++<br>- Rapidité opératoire ++<br>- Pas d'effets indésirables décrits<br>- Pas de brides cicatricielles décrites<br>- Coût faible<br>- Possibilité de guide chirurgical | - Niveau de preuve faible<br>- Pas de vue directe<br>- Pas de greffe possible | |
| | **Corticision (Kim, 2016)** | - Très peu invasif<br>- Rapidité opératoire<br>- Coût faible<br>- Greffe possible<br>- Possibilité de guide chirurgical | - Niveau de preuve faible +<br>- Pas de vue directe<br>- Mailletage : contrôle de l'enfoncement délicat, inconfort, vertige<br>- Brides cicatricielles ? | |
| | **Piézocision (Dibart, 2009)** | - Bon niveau de preuve<br>- Réduction moyenne de la DTTO d'un facteur 1,5 à 3<br>- Très peu invasif<br>- Acceptation ++<br>- Facilité opératoire ++<br>- Rapidité opératoire<br>- Greffe possible<br>- Peu d'effets indésirables décrits<br>- Possibilité de guide chirurgical<br>- Avantages de la piézochirurgie : précision, facilité+sélectivité de coupe, confort opératoire praticien-patient | - Pas de vue directe<br>- Brides cicatricielles +<br>- Coût +<br>- Risque de RR et/ou de lésions radiculaires iatrogènes ? | |
| | **Technique TURC (Brugnami, 2020)** | - Moins invasif que la PAOO<br>- Permettrait de contenir/stabiliser le matériau de greffe coronairement | - Niveau de preuve très faible<br>- Pas de vue directe<br>- Difficulté opératoire<br>- Brides cicatricielles ? | |
| | **Piézopuncture (Kim, 2013)** | - Très peu invasif<br>- Facilité opératoire ++<br>- Rapidité opératoire ++<br>- Possibilité de guide chirurgical | - Niveau de preuve faible<br>- Pas de vue directe<br>- Coût +<br>- Pas de greffe possible | |
| | **Discision (Buyuk, 2018)** | - Réduction moyenne de la DTTO d'un facteur 1,8<br>- Très peu invasif<br>- Rapidité opératoire +<br>- Coût faible ++<br>- Greffe possible<br>- Peu d'effets indésirables décrits<br>- Possibilité de guide chirurgical | - Niveau de preuve faible<br>- Pas de vue directe<br>- Difficulté opératoire<br>- Brides cicatricielles ? | |

Abréviations des tableaux :

- DTTO : durée totale de traitement orthodontique actif.
- RR : résorption radiculaire.
- TURC : *Tunnel Regenerative Corticotomy* - corticotomie régénérative par tunnelisation.

Illustrations des tableaux :

- Technique PAOO : cf. Figure 10.
- Technique de corticotomie avec lambeau de préservation parodontale : cf. Figure 15.
- Technique du dumpling : cf. Figure 17.
- Technique du lambeau périosté avec affaiblissement mentonnier : cf. Figure 18.
- Technique de micro-ostéoperforation : cf. Figure 20
- Technique de corticision : cf. Figure 22.
- Technique de discision : cf. Figure 41.
- Technique de piézocision : cf. Figure 28.
- Technique de piézopuncture : cf. Figure 40.

# CONCLUSIONS

L’accélération orthodontique assistée chirurgicalement se trouve à l’heure actuelle au milieu d’une équation : comment assurer la mise en place d’un Phénomène d’Accélération Régionale (PAR) suffisant et assurant une optimisation maximale du déplacement dentaire, tout en occasionnant un dommage tissulaire et donc des suites postopératoires les plus minimes possibles ? Existe-t-il une technique qui serait un compromis entre efficacité, sécurité, confort pour le patient et proposant un rapport bénéfices/coût intéressant ?

Dans l’étude de Keim publiée en 2020 concernant les tendances diagnostiques et thérapeutiques des répondants orthodontistes aux États-Unis, ¼ des répondants orthodontistes américains a eu recours à une procédure d’accélération du déplacement dentaire et pour ces praticiens, 5 patients par an en moyenne sont concernés par une telle procédure (13).
La durée moyenne des traitements orthodontiques accélérés (toutes procédures confondues) est estimée par les praticiens à 17 mois, permettant un gain moyen estimé à 4 mois par rapport à un traitement conventionnel (13). Ce gain semble relativement faible par rapport aux résultats de la littérature évoqués dans ce travail. Cependant, les protocoles inclus dans l’étude de Keim regroupent la corticotomie conventionnelle, la micro-ostéoperforation, la piézocision mais aussi des protocoles comme la vibration (dispositif Acceledent®), technique pour laquelle une revue systématique de la littérature a conclu à une inefficacité dans l’accélération du déplacement induit (224,225). De plus, les valeurs évoquées par les praticiens sont issues d’un questionnaire qui leur a été envoyé et non de mesures rigoureuses obtenues au sein d’une étude prospective avec une analyse statistique.

Selon une étude brésilienne de la même année, si 50% des patients seraient prêts à accepter un protocole permettant de raccourcir le traitement orthodontique (la liste des protocoles proposés est identique à celle de l’étude de Keim), il s’avère que près de 25% des répondants orthodontistes brésiliens n’ont jamais entendu parler de ces techniques (226).
Si à l’heure actuelle, la corticotomie conventionnelle, première technique publiée, bénéficie du meilleur niveau de preuve et du plus important recul, l’élévation de lambeaux

et la résection osseuse étendue semblent être à l'origine de douleurs postopératoires importantes.

Dans une étude de Uribe *et al*. concernant le ressenti des patients et des orthodontistes quant à l'accélération du traitement orthodontique, il a été mis en évidence qu'une majorité d'orthodontistes seraient prêts à avoir recours régulièrement à une technique permettant de réduire la durée du traitement de 20 à 40% (3). Cependant, il apparaît également dans cette étude que très peu de praticiens ou de patients sont en faveur de solutions invasives comme les corticotomies conventionnelles. Il est intéressant de noter que la majorité des techniques mini-invasives répondraient à cette demande.

Les alternatives mini-invasives évoquées au sein de cette revue de la littérature sont nombreuses et offrent de nouvelles pistes d'investigation toujours dans l'optique de réduire au maximum la durée des traitements orthodontiques et par extension d'augmenter leur acceptation au sein de la population en allégeant largement les temps opératoire et post-opératoire.

Parmi ces techniques, la corticision, la discision, ou la piézopuncture, sont encore peu décrites dans la littérature, le recul est insuffisant, et les résultats peu concluants.

La micro-ostéoperforation ou la piézocision sont des techniques qui apparaissent cependant comme des compromis de choix, pour lesquelles des essais contrôlés randomisés concluants ainsi qu'un certain recul clinique sont disponibles et pour lesquelles aucune complication majeure n'a été décrite comme le confirme la méta-analyse de Mheissen parue en 2021 (141).

Dans l'arsenal thérapeutique disponible pour l'accélération du déplacement dentaire induit, une alternative non-chirurgicale est aussi à considérer : la thérapie laser à faible intensité (LLLT). Elle représenterait la procédure la moins invasive (227) et certaines études montrent des résultats concluants avec en moyenne une réduction de la durée totale de traitement d'un facteur 1,47 grâce à la photobiomodulation, selon une récente revue systématique avec méta-analyse (228).

Faculté
**de chirurgie dentaire**

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

# SIGNATURE DES CONCLUSIONS

Thèse en vue du Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire

Nom - prénom de l'impétrant : ABOAF Yohan

Titre de la thèse : Protocoles chirurgicaux d'accélération du déplacement orthodontique : innovations ou illusions ? Revue de la littérature

Directeur de thèse : Docteur Delphine WAGNER

VU
Strasbourg, le : 17 MARS 2021
Le Président du Jury,

Professeur O. HUCK

VU
Strasbourg, le : 18 MARS 2021
Le Doyen de la Faculté
de Chirurgie Dentaire de Strasbourg,

Professeur C. TADDEI-GROSS

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Skidmore KJ, Brook KJ, Thomson WM, Harding WJ. Factors influencing treatment time in orthodontic patients. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2006;129(2):230-8. DOI: 10.1016/j.ajodo.2005.10.003

2. Pachêco-Pereira C, Pereira JR, Dick BD, Perez A, Flores-Mir C. Factors associated with patient and parent satisfaction after orthodontic treatment: a systematic review. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2015;148(4):652-9. DOI: 10.1016/j.ajodo.2015.04.039

3. Uribe F, Padala S, Allareddy V, Nanda R. Patients', parents', and orthodontists' perceptions of the need for and costs of additional procedures to reduce treatment time. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2014;145(4 Suppl):S65-73. DOI: 10.1016/j.ajodo.2013.12.015

4. Fox N. Longer orthodontic treatment may result in greater external apical root resorption. Evid Based Dent. 2005;6(1):21. DOI: 10.1038/sj.ebd.6400304

5. Sundararaj D, Venkatachalapathy S, Tandon A, Pereira A. Critical evaluation of incidence and prevalence of white spot lesions during fixed orthodontic appliance treatment: A meta-analysis. J Int Soc Prev Community Dent. 2015;5(6):433-9. DOI: 10.4103/2231-0762.167719

6. Pinto AS, Alves LS, Maltz M, Susin C, Zenkner JEA. Does the Duration of Fixed Orthodontic Treatment Affect Caries Activity among Adolescents and Young Adults? Caries Res. 2018;52(6):463-7. DOI: 10.1159/000488209

7. Alfuriji S, Alhazmi N, Alhamlan N, Al-Ehaideb A, Alruwaithi M, Alkatheeri N, et al. The Effect of Orthodontic Therapy on Periodontal Health: A Review of the Literature. International journal of dentistry. 2014;2014:585048. DOI: 10.1155/2014/585048

8. Boke F, Gazioglu C, Akkaya S, Akkaya M. Relationship between orthodontic treatment and gingival health: A retrospective study. Eur J Dent. 2014;8(3):373-80. DOI: 10.4103/1305-7456.137651

9. Jäger F, Mah JK, Bumann A. Peridental bone changes after orthodontic tooth movement with fixed appliances: A cone-beam computed tomographic study. Angle Orthod. 2017;87(5):672-80. DOI: 10.2319/102716-774.1

10. Pinto A, Alves L, Zenkner J, Zanatta F, Maltz M. Gingival enlargement in orthodontic patients: Effect of treatment duration. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 2017;152:477-82. DOI: 10.1016/j.ajodo.2016.10.042

11. Bukhari OM, Sohrabi K, Tavares M. Factors affecting patients' adherence to orthodontic appointments. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2016;149(3):319-24. DOI: 10.1016/j.ajodo.2015.07.040

12. Melsen B. Biological reaction of alveolar bone to orthodontic tooth movement. Angle Orthod. 1999;69(2):151-8. DOI: 10.1043/0003-3219(1999)069<0151:BROABT>2.3.CO;2

13. Keim RG, Vogels Iii DS, Vogels PB. 2020 JCO Study of Orthodontic Diagnosis and

Treatment Procedures Part 1: Results and Trends. J Clin Orthod. 2020;54(10):581-610.

14. Boileau M-J. Orthodontie de l'enfant et du jeune adulte: Tome 1, Principes et moyens thérapeutiques. Elsevier Masson; 2011.

15. Le Gall M, Sastre J. Le déplacement dentaire : bases fondamentales. International Orthodontics. 2010;8(1):1-13. DOI: 10.1016/j.ortho.2009.12.007

16. Krishnan V, Davidovitch Z. Biological mechanisms of tooth movement. 2nd Edition. 2015.

17. Schwarz AM. Tissue changes incidental to orthodontic tooth movement. International Journal of Orthodontia, Oral Surgery and Radiography. 1932;18(4):331-52. DOI: 10.1016/S0099-6963(32)80074-8

18. Baron R. Histophysiologie des reactions tissulaires au cours du deplacement orthodontique. Orthopédie Dento-Faciale : Bases fondamentales. Paris: Prelat; 1975. (Chateau, M.).

19. Reitan K. The initial tissue reaction incident to orthodontic tooth movement as related to the influence of function; an experimental histologic study on animal and human material. Acta Odontol Scand Suppl. 1951;6:1-240.

20. von Böhl M, Maltha JC, Von Den Hoff JW, Kuijpers-Jagtman AM. Focal hyalinization during experimental tooth movement in beagle dogs. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2004;125(5):615-23. DOI: 10.1016/j.ajodo.2003.08.023

21. Brudvik P, Rygh P. Transition and determinants of orthodontic root resorption-repair sequence. Eur J Orthod. 1995;17(3):177-88. DOI: 10.1093/ejo/17.3.177

22. Markostamos K, Akli K. [The ideal forces for canine retraction]. Orthod Epitheor. 1989;1(4):191-201.

23. Verna C, Dalstra M, Melsen B. The rate and the type of orthodontic tooth movement is influenced by bone turnover in a rat model. Eur J Orthod. Oxford Academic; 2000;22(4):343-52. DOI: 10.1093/ejo/22.4.343

24. Reitan K. Some factors determining the evaluation of forces in orthodontics. American Journal of Orthodontics. 1957;43(1):32-45. DOI: 10.1016/0002-9416(57)90114-8

25. Ren Y, Kuijpers-Jagtman AM, Maltha JC. Immunohistochemical evaluation of osteoclast recruitment during experimental tooth movement in young and adult rats. Arch Oral Biol. 2005;50(12):1032-9. DOI: 10.1016/j.archoralbio.2005.04.005

26. Ren Y, Maltha JC, Van 't Hof MA, Kuijpers-Jagtman AM. Age effect on orthodontic tooth movement in rats. J Dent Res. 2003;82(1):38-42. DOI: 10.1177/154405910308200109

27. Stutzmann J, Petrovic A. La vitesse de renouvellement de l'os alvéolaire chez

l'adulte avant et pendant le traitement orthodontique. Rev Orthop Dento Faciale. Association de la Revue d'Orthopédie Dento-Faciale; 1980;14(4):437-56. DOI: 10.1051/odf/1980024

28. Brezniak N, Wasserstein A. Root resorption after orthodontic treatment: Part 2. Literature review. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1993;103(2):138-46. DOI: 10.1016/S0889-5406(05)81763-9

29. Proffit WR, Fields HW, Larson B, Sarver DM. Contemporary Orthodontics - 6th Edition. Elsevier Health Sciences; 2018.

30. Armbrecht EC. Hullihen, the oral surgeon. International Journal of Orthodontia and Oral Surgery. 1937;23(7):711-39. DOI: 10.1016/S1072-3498(37)80131-4

31. Farhad B, Naini S. Orthognathic Surgery: Principles, Planning and Practice. John Wiley & Sons; 2016.

32. Vargas PO, Ocampo BRY. Corticotomy: historical perspective. Revista Odontológica Mexicana. 2016;20(2):e80-90. DOI: 10.1016/j.rodmex.2016.04.012

33. Bell WH, Guerrero CA. Distraction Osteogenesis of the Facial Skeleton. PMPH USA; 2007.

34. Anthony Wolfe S. Günther Cohn-Stock, M.S., D.D.S., father of maxillary orthognathic surgery. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery. 1989;17(7):331-4. DOI: 10.1016/S1010-5182(89)80065-4

35. Kole H. Surgical operations on the alveolar ridge to correct occlusal abnormalities. Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1959;12(5):515-529 concl. DOI: 10.1016/0030-4220(59)90153-7

36. Charavet C, Lambert F, Lecloux G, Le Gall M. Traitement orthodontique accéléré par corticotomies : quelles sont les alternatives minimalement invasives ? Orthod Fr. 2019;90(1):5-12. DOI: 10.1051/orthodfr/2019002

37. Wilcko MT, Wilcko WM, inventeur. Orthodontic method and device. [En ligne]. US6109916A, 29 août 2000 [cité le 9 février 2021].

38. Generson RM, Porter JM, Zell A, Stratigos GT. Combined surgical and orthodontic management of anterior open bite using corticotomy. J Oral Surg. 1978;36(3):216-9.

39. Anholm JM, Crites DA, Hoff R, Rathbun WE. Corticotomy-facilitated orthodontics. CDA J. 1986;14(12):7-11.

40. Gantes B, Rathbun E, Anholm M. Effects on the Periodontium Following Corticotomy-Facilitated Orthodontics. Case Reports. Journal of Periodontology. 1990;61(4):234-8. DOI: https://doi.org/10.1902/jop.1990.61.4.234

41. Suya H. Corticotomy in orthodontics. Dans: Mechanical and Biological Basis in Orthodontic Therapy. Hosl E., Baldauf A. éd. Heidelberg, Germany: Huthig Buch Verlag; 1991. p. 207-26.

42. Frost H. The regional acceleratory phenomenon: a review. Henry Ford Hospital medical journal. 1983;8.

43. Shih MS, Norrdin RW. Regional acceleration of remodeling during healing of bone defects in beagles of various ages. Bone. 1985;6(5):377-9. DOI: 10.1016/8756-3282(85)90336-9

44. Yaffe A, Fine N, Binderman I. Regional accelerated phenomenon in the mandible following mucoperiosteal flap surgery. J Periodontol. 1994;65(1):79-83. DOI: 10.1902/jop.1994.65.1.79

45. Cho K-W, Cho S-W, Oh C-O, Ryu Y-K, Ohshima H, Jung H-S. The effect of cortical activation on orthodontic tooth movement. Oral Dis. 2007;13(3):314-9. DOI: 10.1111/j.1601-0825.2006.01286.x

46. Mostafa YA, Mohamed Salah Fayed M, Mehanni S, ElBokle NN, Heider AM. Comparison of corticotomy-facilitated vs standard tooth-movement techniques in dogs with miniscrews as anchor units. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2009;136(4):570-7. DOI: 10.1016/j.ajodo.2007.10.052

47. Sanjideh PA, Rossouw PE, Campbell PM, Opperman LA, Buschang PH. Tooth movements in foxhounds after one or two alveolar corticotomies. Eur J Orthod. 2010;32(1):106-13. DOI: 10.1093/ejo/cjp070

48. Fischer TJ. Orthodontic Treatment Acceleration with Corticotomy-assisted Exposure of Palatally Impacted Canines: A Preliminary Study. The Angle Orthodontist. 2007;77(3):417-20. DOI: 10.2319/0003-3219(2007)077[0417:OTAWCE]2.0.CO;2

49. Lee J-K, Chung K-R, Baek S-H. Treatment outcomes of orthodontic treatment, corticotomy-assisted orthodontic treatment, and anterior segmental osteotomy for bimaxillary dentoalveolar protrusion. Plast Reconstr Surg. 2007;120(4):1027-36. DOI: 10.1097/01.prs.0000277999.01337.8b

50. Aboul-Ela SMBE-D, El-Beialy AR, El-Sayed KMF, Selim EMN, El-Mangoury NH, Mostafa YA. Miniscrew implant-supported maxillary canine retraction with and without corticotomy-facilitated orthodontics. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2011;139(2):252-9. DOI: 10.1016/j.ajodo.2009.04.028

51. Goldie RS, King GJ. Root resorption and tooth movement in orthodontically treated, calcium-deficient, and lactating rats. Am J Orthod. 1984;85(5):424-30. DOI: 10.1016/0002-9416(84)90163-5

52. Schilling T, Müller M, Minne HW, Ziegler R. Influence of inflammation-mediated osteopenia on the regional acceleratory phenomenon and the systemic acceleratory phenomenon during healing of a bone defect in the rat. Calcif Tissue Int. 1998;63(2):160-6. DOI: 10.1007/s002239900508

53. Sebaoun J-D, Surmenian J, Ferguson DJ, Dibart S. Accélération du mouvement dentaire orthodontique suite à une décortication alvéolaire sélective : justification biologique et résultat d'une technique novatrice d'ingénierie tissulaire. International

Orthodontics. 2008;6(3):235-49. DOI: 10.1016/S1761-7227(08)75161-1

54. Iino S, Sakoda S, Ito G, Nishimori T, Ikeda T, Miyawaki S. Acceleration of orthodontic tooth movement by alveolar corticotomy in the dog. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2007;131(4):448.e1-8. DOI: 10.1016/j.ajodo.2006.08.014

55. Hajji SS. The influence of accelerated osteogenic response on mandibular de-crowding. 2000.

56. Wilcko WM, Wilcko T, Bouquot JE, Ferguson DJ. Rapid orthodontics with alveolar reshaping: two case reports of decrowding. Int J Periodontics Restorative Dent. 2001;21(1):9-19.

57. Shoreibah EA, Ibrahim SA, Attia MS, Diab MMN. Clinical and radiographic evaluation of bone grafting in corticotomy-facilitated orthodontics in adults. J Int Acad Periodontol. 2012;14(4):105-13.

58. Wilcko MT, Wilcko WM, Bissada NF. An Evidence-Based Analysis of Periodontally Accelerated Orthodontic and Osteogenic Techniques: A Synthesis of Scientific Perspectives. Seminars in Orthodontics. 2008;14(4):305-16. DOI: 10.1053/j.sodo.2008.07.007

59. Sebaoun J-D, Kantarci A, Turner JW, Carvalho RS, Van Dyke TE, Ferguson DJ. Modeling of trabecular bone and lamina dura following selective alveolar decortication in rats. J Periodontol. 2008;79(9):1679-88. DOI: 10.1902/jop.2008.080024

60. Teixeira CC, Khoo E, Tran J, Chartres I, Liu Y, Thant LM, et al. Cytokine Expression and Accelerated Tooth Movement. J Dent Res. 2010;89(10):1135-41. DOI: 10.1177/0022034510373764

61. Baloul SS, Gerstenfeld LC, Morgan EF, Carvalho RS, Van Dyke TE, Kantarci A. Mechanism of action and morphologic changes in the alveolar bone in response to selective alveolar decortication-facilitated tooth movement. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2011;139(4 Suppl):S83-101. DOI: 10.1016/j.ajodo.2010.09.026

62. Cohen G, Campbell PM, Rossouw PE, Buschang PH. Effects of increased surgical trauma on rates of tooth movement and apical root resorption in foxhound dogs. Orthod Craniofac Res. 2010;13(3):179-90. DOI: 10.1111/j.1601-6343.2010.01494.x

63. Kernitsky JR, Ohira T, Shosho D, Lim J, Bamashmous A, Dibart S. Corticotomy depth and regional acceleratory phenomenon intensity. Angle Orthod. 2020; DOI: 10.2319/041320-296.1

64. Feller L, Khammissa RAG, Siebold A, Hugo A, Lemmer J. Biological events related to corticotomy-facilitated orthodontics. J Int Med Res. 2019;47(7):2856-64. DOI: 10.1177/0300060519856456

65. Garg AK. The regional acceleratory phenomenon: an up-to-date rationale for bone decortication. Dent Implantol Update. 1997;8(8):63-4.

66. Wilcko WM, Ferguson D, Bouquot J, Wilcko T. Rapid orthodontic decrowding with alveolar augmentation: Case report. World J Orthod. 2003;4.

67. Ferguson DJ. Selective alveolar decortication for rapid surgical-orthodontic correction of skeletal malocclusion treatment. Dans: Distraction osteogenesis of the facial skeleton. 2007.

68. Wilcko M, Wilcko W. The contributions of periodontics to orthodontic therapy. Dans: Practical Advanced Periodontal Surgery, 2nd Edition. Dibart S éd. 2007. p. 23-50. (4).

69. Fernándes R, Mascaranhas A. Quality of Orthodontic Treatment Between Corticotomy and Traditional Techniques. MA, USA : Boston University; 2007.

70. Fulk L, Ferguson DJ, Wilcko WM, Wilcko MT. Lower arch de-crowding comparing corticotomy-facilitated, midline distraction and conventional orthodontic techniques. J Dent Res. 2002:90:483.

71. Skountrianos H. Maxillary arch decrowding and stability with and without corticotomy facilitated orthodontics. Thesis, St Louis University, St Louis. Am J Orthod. 2003;

72. Sebaoun J, Surmenian J, Dibart S. Traitements orthodontiques accélérés par piézocision : une alternative mini-invasive aux corticotomies alvéolaires. L'Orthodontie Française. 2011;82(4):311-9. DOI: 10.1051/ORTHODFR/2011142

73. Mertens B, Angioni C, Orti V, Canal P. Collaboration parodontie et orthodontie : intérêts des corticotomies alvéolaires et de la piézocision. Revue de la littérature. Orthod Fr. EDP Sciences; 2017;88(2):179-91. DOI: 10.1051/orthodfr/2017010

74. Sakthi SV, Vikraman B, Shobana VR, Iyer SK, Krishnaswamy NR. Corticotomy-assisted retraction: an outcome assessment. Indian J Dent Res. 2014;25(6):748-54. DOI: 10.4103/0970-9290.152191

75. Dab S, Chen K, Flores-Mir C. Short- and long-term potential effects of accelerated osteogenic orthodontic treatment: A systematic review and meta-analysis. Orthod Craniofac Res. 2019;22(2):61-8. DOI: 10.1111/ocr.12272

76. Patterson BM, Dalci O, Darendeliler MA, Papadopoulou AK. Corticotomies and Orthodontic Tooth Movement: A Systematic Review. J Oral Maxillofac Surg. 2016;74(3):453-73. DOI: 10.1016/j.joms.2015.10.011

77. Fernández-Ferrer L, Montiel-Company J-M, Candel-Martí E, Almerich-Silla J-M, Peñarrocha-Diago M, Bellot-Arcís C. Corticotomies as a surgical procedure to accelerate tooth movement during orthodontic treatment: A systematic review. Med Oral Patol Oral Cir Bucal. 2016;21(6):e703-12. DOI: 10.4317/medoral.21208

78. Hoogeveen EJ, Jansma J, Ren Y. Surgically facilitated orthodontic treatment: a systematic review. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2014;145(4 Suppl):S51-64. DOI: 10.1016/j.ajodo.2013.11.019

79. Darwiche F, Khodari E, Aljehani D, Gujar AN, Baeshen HA. Comparison of

Effectiveness of Corticotomy-assisted Accelerated Orthodontic Treatment and Conventional Orthodontic Treatment: A Systematic Review. J Contemp Dent Pract. 2020;21(6):701-9.

80. Årtun J, Urbye KS. The effect of orthodontic treatment on periodontal bone support in patients with advanced loss of marginal periodontium. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 1988;93(2):143-8. DOI: 10.1016/0889-5406(88)90292-2

81. Löst C. Depth of alveolar bone dehiscences in relation to gingival recessions. J Clin Periodontol. 1984;11(9):583-9. DOI: 10.1111/j.1600-051x.1984.tb00911.x

82. Twaddle B, Ferguson D, Wilcko W, Wilcko M. Dento-alveolar bone density changes following accelerated orthodontics. J Dent Res. 2002;(80):301.

83. Bhattacharya P, Bhattacharya H, Anjum A, Bhandari R, Agarwal DK, Gupta A, et al. Assessment of Corticotomy Facilitated Tooth Movement and Changes in Alveolar Bone Thickness - A CT Scan Study. J Clin Diagn Res. 2014;8(10):ZC26-30. DOI: 10.7860/JCDR/2014/9448.4954

84. Agrawal AA, Kolte AP, Kolte RA, Vaswani V, Shenoy U, Rathi P. Comparative CBCT analysis of the changes in buccal bone morphology after corticotomy and micro-osteoperforations assisted orthodontic treatment - Case series with a split mouth design. Saudi Dent J. 2019;31(1):58-65. DOI: 10.1016/j.sdentj.2018.10.003

85. Machado I. Root resorption with and without corticotomy-facilitated orthdontics. Saint Louis: Saint Louis University; 2002.

86. AlBarakati S, Kula K, Ghoneima A. The reliability and reproducibility of cephalometric measurements: a comparison of conventional and digital methods. Dentomaxillofac Radiol. 2012;41(1):11-7. DOI: 10.1259/dmfr/37010910

87. Timock AM, Cook V, McDonald T, Leo MC, Crowe J, Benninger BL, et al. Accuracy and reliability of buccal bone height and thickness measurements from cone-beam computed tomography imaging. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics. Mosby Inc.; 2011;140(5):734-44. DOI: 10.1016/j.ajodo.2011.06.021

88. Leung CC, Palomo L, Griffith R, Hans MG. Accuracy and reliability of cone-beam computed tomography for measuring alveolar bone height and detecting bony dehiscences and fenestrations. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2010;137(4 Suppl):S109-119. DOI: 10.1016/j.ajodo.2009.07.013

89. Apalimova A, Roselló À, Jané-Salas E, Arranz-Obispo C, Marí-Roig A, López-López J. Corticotomy in orthodontic treatment: systematic review. Heliyon. 2020;6(5):e04013. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04013

90. Ahn H-W, Lee D-Y, Park Y-G, Kim S-H, Chung K-R, Nelson G. Accelerated decompensation of mandibular incisors in surgical skeletal class III patients by using

augmented corticotomy: a preliminary study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2012;142(2):199-206. DOI: 10.1016/j.ajodo.2012.03.028

91. Coscia G, Coscia V, Peluso V, Addabbo F. Augmented corticotomy combined with accelerated orthodontic forces in class III orthognathic patients: morphologic aspects of the mandibular anterior ridge with cone-beam computed tomography. J Oral Maxillofac Surg. 2013;71(10):1760.e1-9. DOI: 10.1016/j.joms.2013.04.022

92. Sun L, Yuan L, Wang B, Zhang L, Shen G, Fang B. Changes of alveolar bone dehiscence and fenestration after augmented corticotomy-assisted orthodontic treatment: a CBCT evaluation. Prog Orthod. 2019;20(1):7. DOI: 10.1186/s40510-019-0259-z

93. Brugnami F, Caiazzo A, Signorelli L, Capri D. Regenerative Orthodontics: GBR and Corticotomy to Stretch the Limits of Orthodontic Treatment. Int J Periodontics Restorative Dent. 2021;41(1):105-11. DOI: 10.11607/prd.4562

94. Jing W, Jiao J, Xu L, Hou J-X, Li X-T, Wang X-X, et al. Periodontal soft- and hard-tissue changes after augmented corticotomy in Chinese adult patients with skeletal Angle Class III malocclusion: A non-randomized controlled trial. J Periodontol. 2020;91(11):1419-28. DOI: 10.1002/JPER.19-0522

95. Han Y, Miao LL, Jing WD, Li XT, Zhao YJ, Xu L, et al. [Digital evaluation of supracrestal gingival thickness induced by periodontal regenerative and corticotomy surgery in patients with skeletal class Ⅲ malocclusion]. Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi. 2020;55(2):73-9. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1002-0098.2020.02.001

96. Dounis T, Pitman LM. Decision Making for Soft and Hard Tissue Augmentation in Surgically Facilitated Orthodontics. Clin Adv Periodontics. 2020;10(1):38-41. DOI: 10.1002/cap.10074

97. Liem AML, Hoogeveen EJ, Jansma J, Ren Y. Surgically facilitated experimental movement of teeth: systematic review. Br J Oral Maxillofac Surg. 2015;53(6):491-506. DOI: 10.1016/j.bjoms.2015.03.009

98. Harry MR, Sims MR. Root resorption in bicuspid intrusion. A scanning electron microscope study. Angle Orthod. 1982;52(3):235-58. DOI: 10.1043/0003-3219(1982)052<0235:RRIBI>2.0.CO;2

99. McFadden WM, Engstrom C, Engstrom H, Anholm JM. A study of the relationship between incisor intrusion and root shortening. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics. 1989;96(5):390-6. DOI: 10.1016/0889-5406(89)90323-5

100. Abbas NH, Sabet NE, Hassan IT. Evaluation of corticotomy-facilitated orthodontics and piezocision in rapid canine retraction. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2016;149(4):473-80. DOI: 10.1016/j.ajodo.2015.09.029

101. Wilcko MT, Wilcko WM, Pulver JJ, Bissada NF, Bouquot JE. Accelerated osteogenic orthodontics technique: a 1-stage surgically facilitated rapid orthodontic technique with alveolar augmentation. J Oral Maxillofac Surg. 2009;67(10):2149-59. DOI:

10.1016/j.joms.2009.04.095

102. Rothe L, Bollen A-M, Little R, Herring S, Chaison J, Chen C, et al. Trabecular and cortical bone as risk factors for orthodontic relapse. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics : official publication of the American Association of Orthodontists, its constituent societies, and the American Board of Orthodontics. 2006;130:476-84. DOI: 10.1016/j.ajodo.2005.03.023

103. Makki L, Ferguson D, Wilcko M, Wilcko W, K B, R S, et al. Mandibular irregularity index stability following alveolar corticotomy and grafting: a 10-year preliminary study. Angle Orthod. Angle Orthod; 2015;85(5):743-9. DOI: 10.2319/061714-439.1

104. Ferguson DJ, Nazarov AD, Makki L, Wilcko MT, Wilcko WM. Posttreatment and retention outcomes with and without periodontally accelerated osteogenic orthodontics assessed using ABO objective grading system. APOS. Wolters Kluwer; 2016;6(4):194-9. DOI: 10.4103/2321-1407.186434

105. Amit G, Jps K, Pankaj B, Suchinder S, Parul B. Periodontally accelerated osteogenic orthodontics (PAOO) - a review. J Clin Exp Dent. 2012;4(5):e292-296. DOI: 10.4317/jced.50822

106. Al-Naoum F, Hajeer MY, Al-Jundi A. Does alveolar corticotomy accelerate orthodontic tooth movement when retracting upper canines? A split-mouth design randomized controlled trial. J Oral Maxillofac Surg. 2014;72(10):1880-9. DOI: 10.1016/j.joms.2014.05.003

107. Cassetta M, Di Carlo S, Giansanti M, Pompa V, Pompa G, Barbato E. The impact of osteotomy technique for corticotomy-assisted orthodontic treatment (CAOT) on oral health-related quality of life. Eur Rev Med Pharmacol Sci. 2012;16(12):1735-40.

108. Vannala V, Katta A, Reddy MS, Shetty SR, Shetty RM, Khazi SS. Periodontal Accelerated Osteogenic Orthodontics Technique for Rapid Orthodontic Tooth Movement: A Systematic Review. J Pharm Bioallied Sci. 2019;11(Suppl 2):S97-106. DOI: 10.4103/JPBS.JPBS_298_18

109. Zawawi KH. Patients' acceptance of corticotomy-assisted orthodontics. Patient Prefer Adherence. 2015;9:1153-8. DOI: 10.2147/PPA.S89095

110. AlHammadi HA, Wilcko MT, Ferguson DJ. Severe Mandibular Crowding Treated with Nonextraction Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics. Int J Periodontics Restorative Dent. 2019;39(5):e188-94. DOI: 10.11607/prd.3926

111. Parihar AS, Narang S, Singh N, Narang A. Periodontally accelerated osteogenic orthodontics: A perio-ortho ambidextrous perspective. J Family Med Prim Care. 2020;9(3):1752-6. DOI: 10.4103/jfmpc.jfmpc_1055_19

112. Silva-Coll J, Hernández-Orsini R, Wang C-W. Corticotomy-assisted adult rapid maxillary arch expansion and ridge augmentation: An interdisciplinary case report with 7-year follow-up. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2019;156(2):266-74. DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.02.018

113. Caccianiga G, Lo Giudice A, Paiusco A, Portelli M, Militi A, Baldoni M, et al. Maxillary Orthodontic Expansion Assisted by Unilateral Alveolar Corticotomy and Low-Level Laser Therapy: A Novel Approach for Correction of a Posterior Unilateral Cross-Bite in Adults. J Lasers Med Sci. 2019;10(3):225-9. DOI: 10.15171/jlms.2019.36

114. Muñoz F, Wilcko T, Acuña S, Gracia B, Sanhueza V, Palacios S, et al. Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics (PAOO) technique in cleft patients: A complement to orthognathic surgery in dentoalveolar expansion. A case series report. J Craniomaxillofac Surg. 2020;48(11):1028-34. DOI: 10.1016/j.jcms.2020.08.007

115. Vercellotti T, Podesta A. Orthodontic microsurgery: a new surgically guided technique for dental movement. Int J Periodontics Restorative Dent. 2007;27(4):325-31.

116. Germeç D, Giray B, Kocadereli I, Enacar A. Lower incisor retraction with a modified corticotomy. Angle Orthod. 2006;76(5):882-90. DOI: 10.1043/0003-3219(2006)076[0882:LIRWAM]2.0.CO;2

117. Jahanbakhshi MR, Motamedi AMK, Feizbakhsh M, Mogharehabed A. The effect of buccal corticotomy on accelerating orthodontic tooth movement of maxillary canine. Dent Res J (Isfahan). 2016;13(4):303-8.

118. Addanki P, Gooty JR, Palaparthy R. Clinical and Radiographic Comparative Evaluation of Buccal and Palatal Corticotomy with Buccal Corticotomy in Periodontally Accelerated Osteogenic Orthodontics with Surgical Bur. Contemp Clin Dent. 2017;8(2):321-6. DOI: 10.4103/ccd.ccd_846_16

119. Chillès J-G, Riemenschneider-Chillès S, Doustkam A-A, Chillès D. Prise en charge chirurgicale par affaiblissement labio-mentonnier et corticotomies des déséquilibres dento-parodonto-musculaires de la région incisivo-canine mandibulaire. Rev Orthop Dento Faciale. EDP Sciences; 2018;52(1):21-38. DOI: 10.1051/odf/2017047

120. Pakhare VV, Khandait CH, Shrivastav SS, Dhadse PV, Baliga VS, Seegavadi VD. Piezosurgery®-assisted periodontally accelerated osteogenic orthodontics. J Indian Soc Periodontol. 2017;21(5):422-6. DOI: 10.4103/jisp.jisp_255_17

121. Ma Z-G, Yang C, Xie Q-Y, Xi Q-Y, Ye Z-X, Ye Z-X, et al. A Novel Surgical Technique for Augmented Corticotomy-Assisted Orthodontics: Bone Grafting With Periosteum. J Oral Maxillofac Surg. 2016;74(1):170-80. DOI: 10.1016/j.joms.2015.06.147

122. Saint-Surin I, Castrot R, Vandersteen C, Oueiss A, Savoldelli C. Combined mentalis weakening and periosteal flaps in mandibular anterior alveolar corticotomy-assisted orthodontics with bone grafting. J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2020; DOI: 10.1016/j.jormas.2020.05.006

123. Murphy NC, Bissada NF, Davidovitch Z, Kucska S. Corticotomy and stem cell therapy for orthodontists and periodontists: rationale, hypotheses, and protocol. Dans: Integrated clinical orthodontics. John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, UK; 2012. p. 392-421.

124. Murphy NC. In vivo tissue engineering for orthodontists: a modest first step. Dans: Biological Mechanisms of Tooth Eruption, Resorption and Movement. Boston, Harvard Society for the Advancement of Orthodontics. 2006. p. 385-410.

125. Ruso S, Campbell PM, Rossmann J, Opperman LA, Taylor RW, Buschang PH. Bone response to buccal tooth movements-with and without flapless alveolar decortication. Eur J Orthod. 2014;36(6):613-23. DOI: 10.1093/ejo/cjt057

126. Tunçer N, Arman Ozcirpici A, Oduncuoglu B, Göçmen J, Kantarci A. Efficiency of piezosurgery technique in miniscrew supported en-masse retraction: A single-centre, randomized controlled trial. European journal of orthodontics. 2017;39. DOI: 10.1093/ejo/cjx015

127. Uribe F, Davoody L, Mehr R, Jayaratne YSN, Almas K, Sobue T, et al. Efficiency of piezotome-corticision assisted orthodontics in alleviating mandibular anterior crowding—a randomized clinical trial. European Journal of Orthodontics. 2017;39(6):595-600. DOI: 10.1093/ejo/cjw091

128. Binderman I, Gadban N, Bahar H, Herman A, Yaffe A. Commentary on: periodontally accelerated osteogenic orthodontics (PAOO) - a clinical dilemma. Int Orthod. 2010;8(3):268-77. DOI: 10.1016/j.ortho.2010.07.001

129. Fortin T, Bosson JL, Isidori M, Blanchet E. Effect of flapless surgery on pain experienced in implant placement using an image-guided system. Int J Oral Maxillofac Implants. 2006;21(2):298-304.

130. Alikhani M, Raptis M, Zoldan B, Sangsuwon C, Lee YB, Alyami B, et al. Effect of micro-osteoperforations on the rate of tooth movement. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2013;144(5):639-48. DOI: 10.1016/j.ajodo.2013.06.017

131. Alkebsi A, Al-Maaitah E, Al-Shorman H, Abu Alhaija E. Three-dimensional assessment of the effect of micro-osteoperforations on the rate of tooth movement during canine retraction in adults with Class II malocclusion: A randomized controlled clinical trial. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2018;153(6):771-85. DOI: 10.1016/j.ajodo.2017.11.026

132. Gulduren K, Tumer H, Oz U. Effects of micro-osteoperforations on intraoral miniscrew anchored maxillary molar distalization : A randomized clinical trial. J Orofac Orthop. 2020;81(2):126-41. DOI: 10.1007/s00056-019-00207-4

133. Attri S, Mittal R, Batra P, Sonar S, Sharma K, Raghavan S, et al. Comparison of rate of tooth movement and pain perception during accelerated tooth movement associated with conventional fixed appliances with micro-osteoperforations - a randomised controlled trial. J Orthod. 2018;45(4):225-33. DOI: 10.1080/14653125.2018.1528746

134. Sivarajan S, Doss JG, Papageorgiou SN, Cobourne MT, Wey MC. Mini-implant supported canine retraction with micro-osteoperforation: A split-mouth randomized clinical trial. Angle Orthod. 2019;89(2):183-9. DOI: 10.2319/011518-47.1

135. Tsai C-Y, Yang T-K, Hsieh H-Y, Yang L-Y. Comparison of the effects of micro-osteoperforation and corticision on the rate of orthodontic tooth movement in rats. Angle Orthod. 2016;86(4):558-64. DOI: 10.2319/052015-343.1

136. Cheung T, Park J, Lee D, Kim C, Olson J, Javadi S, et al. Ability of mini-implant-facilitated micro-osteoperforations to accelerate tooth movement in rats. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2016;150(6):958-67. DOI: 10.1016/j.ajodo.2016.04.030

137. Sugimori T, Yamaguchi M, Shimizu M, Kikuta J, Hikida T, Hikida M, et al. Micro-osteoperforations accelerate orthodontic tooth movement by stimulating periodontal ligament cell cycles. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2018;154(6):788-96. DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.01.023

138. Pedraza JLM, Marquezan M, Nojima LI, Nojima M da CG. Macroscopic and microscopic evaluation of flapless alveolar perforations on experimental tooth movement. Dental Press J Orthod. 2018;23(6):73-9. DOI: 10.1590/2177-6709.23.6.073-079.oar

139. Feizbakhsh M, Zandian D, Heidarpour M, Farhad SZ, Fallahi HR. The use of micro-osteoperforation concept for accelerating differential tooth movement. Journal of the World Federation of Orthodontists. Elsevier; 2018;7(2):56-60. DOI: 10.1016/j.ejwf.2018.04.002

140. Khan BN, Mustafa S, Bashir U, Durrani O. Effect of Alveocentesis on the Rate of Tooth Movement. OHDM; 2018.

141. Mheissen S, Khan H, Alsafadi AS, Almuzian M. The effectiveness of surgical adjunctive procedures in the acceleration of orthodontic tooth movement: A systematic review of systematic reviews and meta-analysis. J Orthod. 2021;1465312520988735. DOI: 10.1177/1465312520988735

142. Shahabee M, Shafaee H, Abtahi M, Rangrazi A, Bardideh E. Effect of micro-osteoperforation on the rate of orthodontic tooth movement-a systematic review and a meta-analysis. Eur J Orthod. 2020;42(2):211-21. DOI: 10.1093/ejo/cjz049

143. Aboalnaga AA, Salah Fayed MM, El-Ashmawi NA, Soliman SA. Effect of micro-osteoperforation on the rate of canine retraction: a split-mouth randomized controlled trial. Prog Orthod. 2019;20(1):21. DOI: 10.1186/s40510-019-0274-0

144. Sivarajan S, Ringgingon LP, Fayed MMS, Wey MC. The effect of micro-osteoperforations on the rate of orthodontic tooth movement: A systematic review and meta-analysis. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2020;157(3):290-304. DOI: 10.1016/j.ajodo.2019.10.009

145. Greco M, Rossini G, Rombolà A. Simplifying the approach of open bite treatment with aligners and selective micro-osteoperforations: An adult case report. Int Orthod. 2021;19(1):159-69. DOI: 10.1016/j.ortho.2020.11.005

146. McBride MD, Campbell PM, Opperman LA, Dechow PC, Buschang PH. How does the amount of surgical insult affect bone around moving teeth? Am J Orthod

Dentofacial Orthop. 2014;145(4 Suppl):S92-99. DOI: 10.1016/j.ajodo.2013.10.020

147. O'Brien K. Kevin O'Brien's Orthodontic Blog [En ligne]. 23 février 2016. Does OrthoPulse work? The results of another trial... [cité le 26 mars 2021]. Disponible: https://kevinobrienorthoblog.com/does-orthopulse-work-the-results-of-another-trial/

148. Hoffmann S, Papadopoulos N, Visel D, Visel T, Jost-Brinkmann P-G, Präger TM. Influence of piezotomy and osteoperforation of the alveolar process on the rate of orthodontic tooth movement: a systematic review. J Orofac Orthop. 2017;78(4):301-11. DOI: 10.1007/s00056-017-0085-1

149. Kim S-J, Park Y-G, Kang S-G. Effects of Corticision on paradental remodeling in orthodontic tooth movement. Angle Orthod. 2009;79(2):284-91. DOI: 10.2319/020308-60.1

150. Park YG. Corticision: A Flapless Procedure to Accelerate Tooth Movement. Front Oral Biol. 2016;18:109-17. DOI: 10.1159/000351904

151. Peron APLM, Johann ACBR, Papalexiou V, Tanaka OM, Guariza-Filho O, Ignácio SA, et al. Tissue responses resulting from tooth movement surgically assisted by corticotomy and corticision in rats. Angle Orthod. 2017;87(1):118-24. DOI: 10.2319/102915-731.1

152. Kurohama T, Hotokezaka H, Hashimoto M, Tajima T, Arita K, Kondo T, et al. Increasing the amount of corticotomy does not affect orthodontic tooth movement or root resorption, but accelerates alveolar bone resorption in rats. Eur J Orthod. 2017;39(3):277-86. DOI: 10.1093/ejo/cjw038

153. Librizzi Z, Kalajzic Z, Camacho D, Yadav S, Nanda R, Uribe F. Comparison of the effects of three surgical techniques on the rate of orthodontic tooth movement in a rat model. Angle Orthod. 2017;87(5):717-24. DOI: 10.2319/123016-940.1

154. Murphy CA, Chandhoke T, Kalajzic Z, Flynn R, Utreja A, Wadhwa S, et al. Effect of corticision and different force magnitudes on orthodontic tooth movement in a rat model. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2014;146(1):55-66. DOI: 10.1016/j.ajodo.2014.03.024

155. Murphy C, Kalajzic Z, Chandhoke T, Utreja A, Nanda R, Uribe F. The effect of corticision on root resorption with heavy and light forces. Angle Orthod. 2016;86(1):17-23. DOI: 10.2319/112514-843.1

156. Gu Q, Guo S, Wang D, Zhou T, Wang L, Wang Z, et al. Effect of corticision on orthodontic tooth movement in a rat model as assessed by RNA sequencing. J Mol Histol. 2017;48(3):199-208. DOI: 10.1007/s10735-017-9718-3

157. Mimura H. Protraction of mandibular second and third molars assisted by partial corticision and miniscrew anchorage. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2013;144(2):278-89. DOI: 10.1016/j.ajodo.2012.08.030

158. Peñarrocha-Diago M, Rambla-Ferrer J, Perez V, Pérez-Garrigues H. Benign paroxysmal vertigo secondary to placement of maxillary implants using the alveolar

expansion technique with osteotomes: a study of 4 cases. Int J Oral Maxillofac Implants. 2008;23(1):129-32.

159. Dibart S, Sebaoun JD, Surmenian J. Piezocision: a minimally invasive, periodontally accelerated orthodontic tooth movement procedure. Compend Contin Educ Dent. 2009;30(6):342-4, 346, 348-50.

160. Dibart S, Surmenian J, Sebaoun JD, Montesani L. Rapid treatment of Class II malocclusion with piezocision: two case reports. Int J Periodontics Restorative Dent. 2010;30(5):487-93.

161. Charavet C, Lecloux G, Bruwier A, Vandenberghe B, Le Gall M, Lambert F. Selective piezocision-assisted orthodontic treatment combined with minimally invasive alveolar bone regeneration: A proof-of-concept. Int Orthod. 2018;16(4):652-64. DOI: 10.1016/j.ortho.2018.09.021

162. Kim Y-S, Kim S-J, Yoon H-J, Lee PJ, Moon W, Park Y-G. Effect of piezopuncture on tooth movement and bone remodeling in dogs. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2013;144(1):23-31. DOI: 10.1016/j.ajodo.2013.01.022

163. [En ligne]. US Patent Application for Piezocision - Justia Patents SearchDisponible: https://patents.justia.com/patent/20140088597

164. Strippoli J, Durand R, Schmittbuhl M, Voyer R, Rompré P, Nishio C. Pain and quality of life in patients undergoing guided piezocorticision- assisted orthodontic treatment. J Clin Orthod. 2017;51(12):792-9.

165. Gibreal O, Hajeer MY, Brad B. Efficacy of piezocision-based flapless corticotomy in the orthodontic correction of severely crowded lower anterior teeth: a randomized controlled trial. Eur J Orthod. 2019;41(2):188-95. DOI: 10.1093/ejo/cjy042

166. Evangelista K, Vasconcelos K de F, Bumann A, Hirsch E, Nitka M, Silva MAG. Dehiscence and fenestration in patients with Class I and Class II Division 1 malocclusion assessed with cone-beam computed tomography. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2010;138(2):133.e1-7; discussion 133-135. DOI: 10.1016/j.ajodo.2010.02.021

167. Brugnami F, Caiazzo A, Dibart S. Lingual Orthodontics: Accelerated Realignment of the “Social Six” with Piezocision™. septembre 2013:608-10.

168. Charavet C, Lecloux G, Bruwier A, Rompen E, Maes N, Limme M, et al. Localized Piezoelectric Alveolar Decortication for Orthodontic Treatment in Adults: A Randomized Controlled Trial. J Dent Res. 2016;95(9):1003-9. DOI: 10.1177/0022034516645066

169. Dibart S, Yee C, Surmenian J, Sebaoun JD, Baloul S, Goguet-Surmenian E, et al. Tissue response during Piezocision-assisted tooth movement: a histological study in rats. Eur J Orthod. 2014;36(4):457-64. DOI: 10.1093/ejo/cjt079

170. Keser EI, Dibart S. Sequential piezocision: a novel approach to accelerated orthodontic treatment. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2013;144(6):879-89. DOI:

10.1016/j.ajodo.2012.12.014

171. Bakathir MA, Hassan AH, Bahammam MA. Piezocision as an adjunct to orthodontic treatment of unilateral posterior crossbite. Saudi Med J. 2017;38(4):425-30. DOI: 10.15537/smj.2017.4.16390

172. Mehr R. Efficiency of Piezotome-Corticision Assisted Orthodontics in Alleviating Mandibular Anterior Crowding - A Randomized Controlled Clinical trial. University of Connecticut School of Medicine and Dentistry; 2013.

173. Aksakalli S, Calik B, Kara B, Ezirganli S. Accelerated tooth movement with piezocision and its periodontal-transversal effects in patients with Class II malocclusion. Angle Orthod. 2016;86(1):59-65. DOI: 10.2319/012215-49.1

174. Alfawal AMH, Hajeer MY, Ajaj MA, Hamadah O, Brad B. Evaluation of piezocision and laser-assisted flapless corticotomy in the acceleration of canine retraction: a randomized controlled trial. Head Face Med. 2018;14(1):4. DOI: 10.1186/s13005-018-0161-9

175. Raj SC, Praharaj K, Barik AK, Patnaik K, Mahapatra A, Mohanty D, et al. Retraction With and Without Piezocision-Facilitated Orthodontics: A Randomized Controlled Trial. Int J Periodontics Restorative Dent. 2020;40(1):e19-26. DOI: 10.11607/prd.3968

176. Al-Imam GMF, Ajaj MA, Hajeer MY, Al-Mdalal Y, Almashaal E. Evaluation of the effectiveness of piezocision-assisted flapless corticotomy in the retraction of four upper incisors: A randomized controlled clinical trial. Dent Med Probl. 2019;56(4):385-94. DOI: 10.17219/dmp/110432

177. Mheissen S, Khan H, Samawi S. Is Piezocision effective in accelerating orthodontic tooth movement: A systematic review and meta-analysis. PLoS ONE. 2020;15(4). DOI: 10.1371/journal.pone.0231492

178. Hatrom AA, Zawawi KH, Al-Ali RM, Sabban HM, Zahid TM, Al-Turki GA, et al. Effect of piezocision corticotomy on en-masse retraction. Angle Orthod. 2020;90(5):648-54. DOI: 10.2319/092719-615.1

179. Khlef HN, Hajeer MY, Ajaj MA, Heshmeh O, Youssef N, Mahaini L. The effectiveness of traditional corticotomy vs flapless corticotomy in miniscrew-supported en-masse retraction of maxillary anterior teeth in patients with Class II Division 1 malocclusion: A single-centered, randomized controlled clinical trial. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2020;158(6):e111-20. DOI: 10.1016/j.ajodo.2020.08.008

180. Afzal E, Fida M, Malik DS, Irfan S, Gul M. Comparison between conventional and piezocision-assisted orthodontics in relieving anterior crowding: a systematic review and meta-analysis. Eur J Orthod. 2020; DOI: 10.1093/ejo/cjaa046

181. Yi J, Xiao J, Li Y, Li X, Zhao Z. Efficacy of piezocision on accelerating orthodontic tooth movement: A systematic review. Angle Orthod. 2017;87(4):491-8. DOI: 10.2319/01191-751.1

182. Alvarez MA, Mejia A, Alzate D, Rey D, Ioshida M, Aristizabal JF, et al. Buccal bone defects and transversal tooth movement of mandibular lateral segments in patients after orthodontic treatment with and without piezocision: A case-control retrospective study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2021;159(3):e233-43. DOI: 10.1016/j.ajodo.2020.08.017

183. Charavet C, Lecloux G, Jackers N, Maes N, Lambert F. Patient-reported outcomes measures (PROMs) following a piezocision-assisted versus conventional orthodontic treatments: a randomized controlled trial in adults. Clin Oral Investig. 2019;23(12):4355-63. DOI: 10.1007/s00784-019-02887-z

184. Ní Ríordáin R, Wiriyakijja P. Patient reported outcome and experience measures of oral disease in oral medicine. Br Dent J. 2017;223(9):713. DOI: 10.1038/sj.bdj.2017.889

185. Gibreal O, Hajeer MY, Brad B. Evaluation of the levels of pain and discomfort of piezocision-assisted flapless corticotomy when treating severely crowded lower anterior teeth: a single-center, randomized controlled clinical trial. BMC Oral Health. 2019;19(1):57. DOI: 10.1186/s12903-019-0758-9

186. Charavet C, Lecloux G, Vandenberghe B, Lambert F. Buccal bone regeneration combined with piezocision in adult orthodontic patients: Clinical, 3D radiographic, and patient-reported outcomes. J Stomatol Oral Maxillofac Surg. 2020; DOI: 10.1016/j.jormas.2020.10.005

187. Charavet C, Lecloux G, Jackers N, Albert A, Lambert F. Piezocision-assisted orthodontic treatment using CAD/CAM customized orthodontic appliances: a randomized controlled trial in adults. Eur J Orthod. 2019;41(5):495-501. DOI: 10.1093/ejo/cjy082

188. Cassetta M, Giansanti M, Di Mambro A, Calasso S, Barbato E. Minimally invasive corticotomy in orthodontics using a three-dimensional printed CAD/CAM surgical guide. Int J Oral Maxillofac Surg. 2016;45(9):1059-64. DOI: 10.1016/j.ijom.2016.04.017

189. Cassetta M, Pandolfi S, Giansanti M. Minimally invasive corticotomy in orthodontics: a new technique using a CAD/CAM surgical template. Int J Oral Maxillofac Surg. 2015;44(7):830-3. DOI: 10.1016/j.ijom.2015.02.020

190. Paris M, Nurdin N, Manzano G, Caroleo F, Messaoudi Y, Bischof M, et al. Development of a surgical guide for minimally invasive corticotomies with a complete digital intraoral and laboratory workflow. Int J Comput Dent. 2020;23(3):257-67.

191. Robiony M, Polini F, Costa F, Vercellotti T, Politi M. Piezoelectric bone cutting in multipiece maxillary osteotomies. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2004;62(6):759-61. DOI: 10.1016/j.joms.2004.01.010

192. Kotrikova B, Wirtz R, Krempien R, Blank J, Eggers G, Samiotis A, et al. Piezosurgery--a new safe technique in cranial osteoplasty? Int J Oral Maxillofac Surg. 2006;35(5):461-5. DOI: 10.1016/j.ijom.2005.12.006

193. Vercellotti T, Nevins ML, Kim DM, Nevins M, Wada K, Schenk RK, et al. Osseous response following resective therapy with piezosurgery. Int J Periodontics Restorative Dent. 2005;25(6):543-9.

194. Piersanti L, Dilorenzo M, Monaco G, Marchetti C. Piezosurgery or conventional rotatory instruments for inferior third molar extractions? J Oral Maxillofac Surg. 2014;72(9):1647-52. DOI: 10.1016/j.joms.2014.04.032

195. Stübinger S, Kuttenberger J, Filippi A, Sader R, Zeilhofer H-F. Intraoral piezosurgery: preliminary results of a new technique. J Oral Maxillofac Surg. 2005;63(9):1283-7. DOI: 10.1016/j.joms.2005.05.304

196. Mantovani E, Arduino PG, Schierano G, Ferrero L, Gallesio G, Mozzati M, et al. A split-mouth randomized clinical trial to evaluate the performance of piezosurgery compared with traditional technique in lower wisdom tooth removal. J Oral Maxillofac Surg. 2014;72(10):1890-7. DOI: 10.1016/j.joms.2014.05.002

197. Charavet C. Innovative Orthodontic Treatment using Piezosurgery - Doctoral Thesis. Université de Liège, Belgique; 2018.

198. Patterson BM, Dalci O, Papadopoulou AK, Madukuri S, Mahon J, Petocz P, et al. Effect of piezocision on root resorption associated with orthodontic force: A microcomputed tomography study. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2017;151(1):53-62. DOI: 10.1016/j.ajodo.2016.06.032

199. Barone A, Santini S, Marconcini S, Giacomelli L, Gherlone E, Covani U. Osteotomy and membrane elevation during the maxillary sinus augmentation procedure. A comparative study: piezoelectric device vs. conventional rotative instruments. Clin Oral Implants Res. 2008;19(5):511-5. DOI: 10.1111/j.1600-0501.2007.01498.x

200. Dibart S, Keser EI, Nelson D. Piezocision™-assisted orthodontics: Past, present, and future. 2015; DOI: 10.1053/J.SODO.2015.06.003

201. Abdul-Aziz AI, Refai WM. Three-Dimensional Prospective Evaluation of Piezocision-Assisted and Conventional Rapid Maxillary Expansion: A Controlled Clinical Trial. Open Access Maced J Med Sci. 2019;7(1):127-33. DOI: 10.3889/oamjms.2019.021

202. Ileri Z, Akin M, Erdur EA, Dagi HT, Findik D. Bacteremia after piezocision. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2014;146(4):430-6. DOI: 10.1016/j.ajodo.2014.06.009

203. Brugnami F, Caiazzo A, Mehra P. Tunnel Regenerative Corticotomy (TURC): A modified approach in surgically-assisted orthodontics. J Oral Biol Craniofac Res. 2021;11(1):63-5. DOI: 10.1016/j.jobcr.2020.11.017

204. Omidkhoda M, Radvar M, Azizi M, Hasanzadeh N. Piezopuncture-Assisted Canine Distalization in Orthodontic Patients: Two Case Reports. J Dent (Shiraz). 2018;19(1):74-82.

205. Omidkhoda M, Radvar M, Azizi M, Dehghani M. Evaluating the Efficacy of a Modified Piezo-Puncture Method on the Rate of Tooth Movement in Orthodontic Patients: A Clinical Study. Turk J Orthod. 2020;33(1):13-20. DOI:

10.5152/TurkJOrthod.2020.19013

206. Buyuk SK, Yavuz MC, Genc E, Sunar O. A novel method to accelerate orthodontic tooth movement. Saudi Med J. 2018;39(2):203-8. DOI: 10.15537/smj.2018.2.21235

207. Yavuz MC, Sunar O, Buyuk SK, Kantarcı A. Comparison of piezocision and discision methods in orthodontic treatment. Prog Orthod. 2018;19(1):44. DOI: 10.1186/s40510-018-0244-y

208. Gameiro G, Neto J, Magnani M, Nouer D. The influence of drugs and systemic factors on orthodontic tooth movement. Journal of clinical orthodontics : JCO. 2007;41:73-8; quiz 71.

209. Tyrovola JB, Spyropoulos MN. Effects of drugs and systemic factors on orthodontic treatment. Quintessence Int. 2001;32(5):365-71.

210. Lee WC. Experimental study of the effect of prostaglandin administration on tooth movement--with particular emphasis on the relationship to the method of PGE1 administration. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1990;98(3):231-41. DOI: 10.1016/s0889-5406(05)81600-2

211. Yamasaki K, Shibata Y, Fukuhara T. The effect of prostaglandins on experimental tooth movement in monkeys (Macaca fuscata). J Dent Res. 1982;61(12):1444-6. DOI: 10.1177/00220345820610121401

212. Madan MS, Liu ZJ, Gu GM, King GJ. Effects of human relaxin on orthodontic tooth movement and periodontal ligaments in rats. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2007;131(1):8.e1-8.10. DOI: 10.1016/j.ajodo.2006.06.014

213. Hashimoto F, Kobayashi Y, Mataki S, Kobayashi K, Kato Y, Sakai H. Administration of osteocalcin accelerates orthodontic tooth movement induced by a closed coil spring in rats. Eur J Orthod. 2001;23(5):535-45. DOI: 10.1093/ejo/23.5.535

214. Collins MK, Sinclair PM. The local use of vitamin D to increase the rate of orthodontic tooth movement. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1988;94(4):278-84. DOI: 10.1016/0889-5406(88)90052-2

215. Sekhavat AR, Mousavizadeh K, Pakshir HR, Aslani FS. Effect of misoprostol, a prostaglandin E1 analog, on orthodontic tooth movement in rats. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2002;122(5):542-7. DOI: 10.1067/mod.2002.126153

216. Brudvik P, Rygh P. Root resorption after local injection of prostaglandin E2 during experimental tooth movement. Eur J Orthod. 1991;13(4):255-63. DOI: 10.1093/ejo/13.4.255

217. Kawasaki K, Shimizu N. Effects of low-energy laser irradiation on bone remodeling during experimental tooth movement in rats. Lasers Surg Med. 2000;26(3):282-91. DOI: 10.1002/(sici)1096-9101(2000)26:3<282::aid-lsm6>3.0.co;2-x

218. Guram G, Reddy RK, Dharamsi AM, Syed Ismail PM, Mishra S, Prakashkumar MD. Evaluation of Low-Level Laser Therapy on Orthodontic Tooth Movement: A Randomized Control Study. Contemp Clin Dent. 2018;9(1):105-9. DOI:

10.4103/ccd.ccd_864_17

219. Davidovitch Z, Finkelson MD, Steigman S, Shanfeld JL, Montgomery PC, Korostoff E. Electric currents, bone remodeling, and orthodontic tooth movement. II. Increase in rate of tooth movement and periodontal cyclic nucleotide levels by combined force and electric current. Am J Orthod. 1980;77(1):33-47. DOI: 10.1016/0002-9416(80)90222-5

220. Davidovitch Z, Finkelson MD, Steigman S, Shanfeld JL, Montgomery PC, Korostoff E. Electric currents, bone remodeling, and orthodontic tooth movement. I. The effect of electric currents on periodontal cyclic nucleotides. Am J Orthod. 1980;77(1):14-32. DOI: 10.1016/0002-9416(80)90221-3

221. Darendeliler MA, Sinclair PM, Kusy RP. The effects of samarium-cobalt magnets and pulsed electromagnetic fields on tooth movement. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1995;107(6):578-88. DOI: 10.1016/s0889-5406(95)70100-1

222. Nishimura M, Chiba M, Ohashi T, Sato M, Shimizu Y, Igarashi K, et al. Periodontal tissue activation by vibration: intermittent stimulation by resonance vibration accelerates experimental tooth movement in rats. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2008;133(4):572-83. DOI: 10.1016/j.ajodo.2006.01.046

223. El-Bialy T, Lam B, Aldaghreer S, Sloan AJ. The effect of low intensity pulsed ultrasound in a 3D ex vivo orthodontic model. J Dent. 2011;39(10):693-9. DOI: 10.1016/j.jdent.2011.08.001

224. DiBiase AT, Woodhouse NR, Papageorgiou SN, Johnson N, Slipper C, Grant J, et al. Effect of supplemental vibrational force on orthodontically induced inflammatory root resorption: A multicenter randomized clinical trial. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2016;150(6):918-27. DOI: 10.1016/j.ajodo.2016.06.025

225. Jing D, Xiao J, Li X, Li Y, Zhao Z. The effectiveness of vibrational stimulus to accelerate orthodontic tooth movement: a systematic review. BMC Oral Health. 2017;17. DOI: 10.1186/s12903-017-0437-7

226. Conti AC de CF, Mota Rodrigues CF, Volpato GH, de Miranda Ladewig V, Almeida MR de, Almeida-Pedrin RR de. Orthodontists' and patients' perceptions regarding techniques to reduce the orthodontic treatment duration. J World Fed Orthod. 2020;9(4):155-8. DOI: 10.1016/j.ejwf.2020.10.002

227. Alfawal AMH, Hajeer MY, Ajaj MA, Hamadah O, Brad B, Latifeh Y. Evaluation of patient-centered outcomes associated with the acceleration of canine retraction by using minimally invasive surgical procedures: A randomized clinical controlled trial. Dent Med Probl. 2020;57(3):285-93. DOI: 10.17219/dmp/120181

228. Jedliński M, Romeo U, Del Vecchio A, Palaia G, Galluccio G. Comparison of the Effects of Photobiomodulation with Different Lasers on Orthodontic Movement and Reduction of the Treatment Time with Fixed Appliances in Novel Scientific Reports: A Systematic Review with Meta-Analysis. Photobiomodul Photomed Laser Surg. 2020;38(8):455-65. DOI: 10.1089/photob.2019.4779

ABOAF (Yohan) – Protocoles chirurgicaux d'accélération du déplacement orthodontique : innovations ou illusions ? Revue de la littérature.

(Thèse : 3ème cycle Sci. Odontol. : Strasbourg : 2021 ; N° : 43.22.21.26)

Résumé : La durée moyenne des traitements actifs en Orthopédie Dento-Faciale est d'environ 2 ans. Elle représente une composante essentielle dans l'acceptation de telles thérapeutiques en particulier pour les patients adultes, souvent demandeurs de traitements courts. Les techniques chirurgicales d'accélération orthodontique, par la réalisation de corticotomies, sont connues depuis le XIXème siècle, mais jusqu'à peu de temps, elles sont restées relativement invasives, souvent inconfortables pour le patient en termes de suites postopératoires, et leur mise en œuvre était chronophage et onéreuse. Elles étaient donc réservées à de rares cas, pratiquées par des chirurgiens oraux spécialisés et se heurtaient à une acceptation relativement limitée auprès des patients mais aussi à une certaine réticence des praticiens eux-mêmes
Des techniques innovantes et moins invasives ont vu le jour, impliquant un allègement peropératoire et postopératoire, une réduction du coût, et une efficacité proche voire équivalente aux corticotomies classiques. La corticision, la micro-ostéoperforation ou encore la piézocision en sont des exemples.
Notre objectif est de répondre à la question suivante : quel protocole le chirurgien oral peut-il proposer à ses confrères spécialistes orthodontistes et à leurs patients pour promouvoir le déplacement dentaire provoqué avec un rapport bénéfices/risques positif pour le patient ?

Rubrique de classement : Orthodontie-Parodontie

Mots-clés : orthodontie rapide ; corticotomie ; piézocision ; micro-ostéoperforation ; chirurgie mini-invasive.

Me SH : accelerated orthodontics; corticotomy; micro-osteoperforation ; piezocision.

Jury :

| | |
|---|---|
| Président : | - Docteur HUCK Olivier |
| Assesseurs : | - Docteur BAHI-GROSS Sophie<br>- Docteur WAGNER Delphine<br>- Docteur PEREZ Cyril |

Coordonnées de l'auteur :

Adresse postale :

Y. ABOAF

57, Rue Jean de Lafontaine 75016 PARIS

Adresse de messagerie : yohaboaf@gmail.com