



ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITE MOHAMMED V
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
RABAT



Année : 2022

Thèse N° : 2/22/CSVS

CENTRE D'ETUDES DOCTORALES DES SCIENCES
DE LA VIE ET DE LA SANTE (SVS)

Formation Doctorale : Sciences Odontologiques

Thèse de Doctorat

**Etude des Facteurs de la Résorption Radiculaire
en Orthodontie chez la Population Marocaine**

Présentée et Soutenue publiquement le : 09/ 05 /2022

Par :

Rajae ELHADDAOUI

JURY

Pr Fatima ZAOUI

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Présidente

Pr Loubna BAHJE

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Directrice de thèse

Pr Abdellah ZINEDINE

PES, Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali - El Jadida

Rapporteur

Pr Asmae BAHOU

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Rapporteur

Pr Hicham BENYAHIA

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Rapporteur

Pr Abdellatif BOUR

PES, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl - Kénitra

Examineur



ROYAUME DU MAROC
UNIVERSITE MOHAMMED V
FACULTE DE MEDECINE ET DE PHARMACIE
RABAT



Année : 2022

Thèse N° : 2/22/CSVS

CENTRE D'ETUDES DOCTORALES DES SCIENCES
DE LA VIE ET DE LA SANTE (SVS)

Formation Doctorale : Sciences Odontologiques

Thèse de Doctorat

Etude des Facteurs de la Résorption Radiculaire en Orthodontie chez la Population Marocaine

Présentée et Soutenue publiquement le : 09/ 05 /2022

Par :

Rajae ELHADDAOUI

JURY

Pr Fatima ZAOUI

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Présidente

Pr Loubna BAHJE

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Directrice de thèse

Pr Abdellah ZINEDINE

PES, Faculté des Sciences, Université Chouaib Doukkali - El Jadida

Rapporteur

Pr Asmae BAHOU

PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Rapporteur

Pr Hicham BENYAHIA

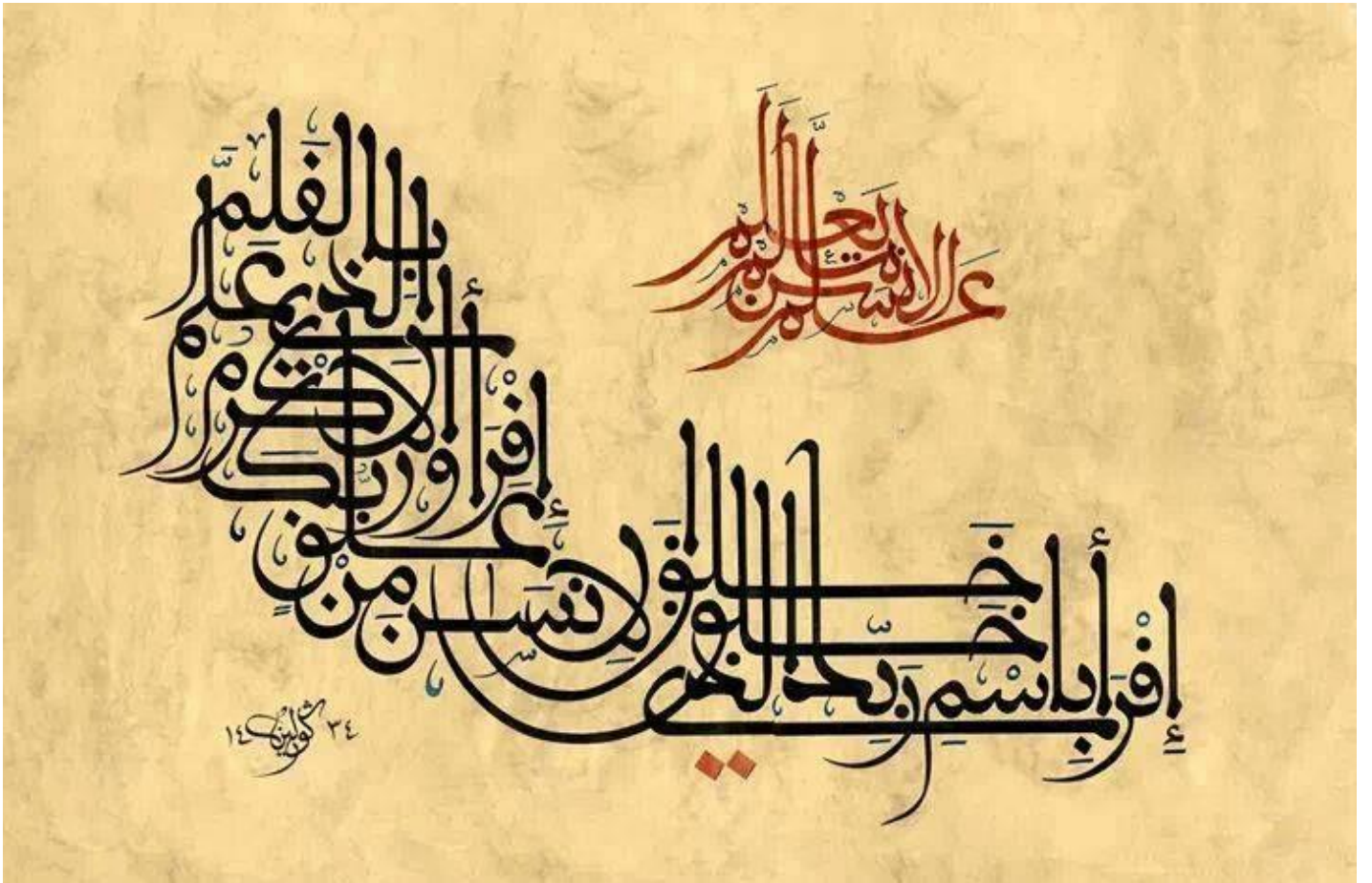
PES, Faculté de Médecine Dentaire, Université Mohammed V - Rabat

Rapporteur

Pr Abdellatif BOUR

PES, Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl - Kénitra

Examineur





DEDICACES



A ma famille

*Votre amour inconditionnel et votre confiance ont toujours
illuminé mon chemin*

Merci pour tout ce que vous m'avez donné

Merci d'exister

A mon frère Adnan

Tu es et tu seras toujours en moi...

Je me rappelle de ton conseil, tu peux être tranquille





REMERCIEMENTS

Avant d'entamer ce rapport, je tiens à remercier ma directrice de thèse,

Pr Loubna BAHIGE,

pour sa confiance, sa disponibilité sans faille et sa patience. Grâce à son sens de la rigueur et de la perfection, ce travail a pu être accompli.

Son dynamisme et son optimisme étaient pour moi une source d'inspiration et de persévérance. Je lui suis infiniment reconnaissante pour son écoute, sa compréhension et son support qui m'ont guidé depuis le début de mon parcours.


Je tiens également à exprimer ma sincère gratitude et mes profonds respects à

Madame la présidente du jury, Pr Fatima ZAOUI,

de m'avoir accueilli chaleureusement dans son équipe de recherche, pour son œil critique et pour tout le temps qu'elle m'a consacré lors des discussions constructives que nous avons échangées.

J'aimerais aussi lui dire à quel point j'ai apprécié ses qualités humaines, son soutien en toutes circonstances et ses encouragements.

Aucun mot n'égalera ma reconnaissance envers elle.



*Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres
du jury qui ont accepté d'examiner et de participer à ma
soutenance de thèse,*

*Pr Abdellatif BOUR, Pr Abdellah ZINEDINE, Pr Hicham
BENYAHIA et Pr Asmae BAHOU.*

Je suis infiniment reconnaissante à


Pr Oumkeltoum ENNIBI,

*pour son accueil chaleureux à chaque fois j'ai sollicité son aide,
son savoir-faire et ses efforts majeurs qui m'ont aidé tout au
long de mes études doctorales.*

Je tiens aussi à exprimer ma sincère reconnaissance à

Pr Majid SAKOUI,

*Chef de service d'Odontologie à l'Hôpital Militaire
d'Instruction Mohammed V,*



*pour ses encouragements permanents, sa bienveillance et ses
qualités humaines.*



Je remercie aussi

Pr Taoufiq DAKKA directeur du CEDOC,

pour tous les efforts déployés et l'organisation bien structurée qui nous a permis d'acquérir une formation de qualité, pour ses compétences et sa rigueur scientifique.

Je voudrais finalement exprimer ma reconnaissance envers mes amis et collègues qui m'ont apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.





RESUMES

RESUME

Titre: Etude des Facteurs de la Résorption Radiculaire en Orthodontie chez la Population Marocaine

Auteur: Rajae ELHADDAOUI

Introduction:

Cette étude clinique, qui est la première au Maroc, avait pour objectif d'analyser les facteurs liés à la survenue et la sévérité des résorptions radiculaires des incisives maxillaires durant le traitement orthodontique, chez un échantillon de la population marocaine traitée au Service d'Orthopédie Dento-Faciale au Centre de Consultations et de Traitements Dentaires (CCDT) de Rabat.

Matériels et méthodes:

C'est une étude de cohorte rétrospective réalisée chez 82 patients sélectionnés au hasard. On a étudié l'association entre différents facteurs et le risque de survenue et la sévérité des résorptions au niveau des incisives maxillaires. L'analyse statistique a été réalisée par le logiciel SPSS version 18.0, les tests statistiques utilisés sont: la méthode de Kaplan-Meier et le modèle de Cox uni varié et multivarié.

Résultats:

La prévalence des résorptions radiculaires dans notre échantillon était de 95%. Les résorptions modérées à sévères (RMS) présentaient 59,3%. Les facteurs significativement associés aux RMS étaient: le type de dents ($p < 0,001$), les traitements avec extractions ($p < 0,05$), la supracluse ($p < 0,05$), la béance ($p < 0,001$) et la dysmorphie radiculaire ($p < 0,05$).

Pour le traitement avec des gouttières, la prévalence des résorptions radiculaires variait de 41% jusqu'à 100% dans certaines études, prédominée par des résorptions légères (1mm à 2 mm) alors que les résorptions sévères présentaient 0,62% à 6%.

Conclusion:

Les gouttières thermoplastiques pourraient être à l'origine de résorptions radiculaires après traitement orthodontique mais qui restent moins sévères comparativement à celles rapportées avec les traitements multi-attaches fixes.

Mots-clés: résorption radiculaire, sévérité, traitement orthodontique fixe, aligneurs

ABSTRACT

Title: Study of Root Resorption Factors in Orthodontics within Moroccan Population

Author: Rajae ELHADDAOUI

Introduction

This clinical study, which is the first in Morocco, aimed to analyze the factors related to the occurrence and severity of root resorptions of upper incisors during orthodontic treatment, in a sample of the Moroccan population treated in the Dento-Facial Orthopedic Department of the Dental Consultation and Treatment Center (Centre de consultation et de traitements dentaires [CCTD]) in Rabat.

Material and methods:

This is a retrospective cohort study performed in 82 randomly selected patients. We studied the association between various factors and the risk of occurrence and severity of resorptions in the maxillary incisors. Statistical analysis was performed using SPSS software, version 18.0. Statistical tests used were: Kaplan-Meier analysis and the univariate and multivariate Cox models.

Results:

The prevalence of external apical root resorptions in our sample was 95%. Moderate to severe resorption (MSR) were 59.3%. The factors that were significantly associated with the occurrence of MSR in the maxillary incisors were: tooth type ($p < 0.001$), treatments with extraction ($p < 0.05$), overbite ($p < 0.05$), open bite ($p < 0.001$) and root malformation ($p < 0.05$).

For the orthodontic treatment with splints, the prevalence of root resorptions varied from 41% up to 100% in some studies, predominated by light resorptions (1mm to 2 mm) while severe resorptions presented 0.62% at 6 %.

Conclusion:

Thermoplastic splints could cause root resorptions after orthodontic treatment, but these remain less severe compared to those reported with fixed multi-bracket treatments.

Keywords: root resorption, severity, fixed orthodontic treatment, aligners

Structure de Recherche : Équipe de Recherche en Biomatériaux et Biomarqueurs Salivaires

ملخص

العنوان: دراسة عوامل ارتشاف الجذور عند تقويم الأسنان لدى سكان المغرب

المؤلف: رجاء الهداوي

المقدمة

هدفت هذه الدراسة السريرية، وهي الأولى في المغرب، إلى تحليل العوامل المتعلقة بحدوث وشدة ارتشاف جذور القواطع العلوية أثناء علاج تقويم الأسنان، في عينة من السكان المغاربة الذين عولجوا في قسم تقويم الأسنان والوجه في مركز فحص وعلاج الأسنان (CCTD) بالرباط.

المكونات والمواد

هذه دراسة جماعية بأثر رجعي أجريت على 82 مريضاً تم اختيارهم عشوائياً. درسنا الارتباط بين العوامل المختلفة المتعلقة بالمريض والعلاج وخطر حدوث وشدة الارتشاف في القواطع العلوية. تم إجراء التحليل الإحصائي بواسطة برنامج SPSS الإصدار 18.0، والاختبارات الإحصائية المستخدمة هي: طريقة كابلان ماير ونموذج كوكس أحادي المتغير ومتعدد المتغيرات.

النتائج

معدل انتشار ارتشاف الجذور في عينتنا يقدر بـ 95%. نسبة الارتشاف المتوسط أو الشديد (RMS) تعادل 59.3%. العوامل المرتبطة بشكل كبير بـ RMS في القواطع العلوية هي: نوع الأسنان ($P < 0.001$)، العلاجات بالقلع ($p < 0.05$)، العضة المفرطة ($p < 0.05$)، العضة المفتوحة ($p < 0.001$) وتشوه الجذر ($p < 0.05$).

بالمقارنة مع العلاج بالجبائر، تراوح معدل انتشار ارتشاف الجذور من 41% إلى 100% في بعض الدراسات، حيث تغلب الارتشافات الخفيفة (1 مم إلى 2 مم) بينما الارتشافات الشديدة تعد بين 0.62% و6%.

الخلاصة

يمكن أن تتسبب الجبائر البلاستيكية الحرارية في ارتشاف الجذور بعد العلاج التقويمي، ولكنها تظل أقل حدة مقارنة بتلك التي تم الإبلاغ عنها باستخدام العلاجات الثابتة متعددة الأقواس.

الكلمات المفتاحية: ارتشاف الجذور، الحدة، علاج تقويم الأسنان الثابت، العلاج بالجبائر



LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Le mécanisme de la résorption radiculaire selon Andreasen.	28
Figure 2 : La voie moléculaire pendant le déplacement orthodontique.....	29
Figure 3 : Résorption de surface (A) et réparation (B) selon Andreasen.	35
Figure 4 : Evolution d'une résorption radiculaire apicale externe suite à un traitement orthodontique.....	35
Figure 5 : Le phénomène d'ankylose selon Andreasen	36
Figure 6 : Classification des anomalies de la morphologie radiculaire selon Levander et Malmgren(1998).	45
Figure 7 : Stades des résorptions radiculaires apicales externes	56
Figure 8 : Méthode d'évaluation du délai de survenue des RMS	57
Figure 9 : Courbe de survenue des RMS	61
Figure 10 : Diagramme de flux pour l'identification des études incluses dans la revue systématique.....	82



LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Caractéristiques générales de la population étudiée	58
Tableau II : Comparaison de la morphologie radiculaire selon le type de dents	59
Tableau III : Prévalence des résorptions radiculaires apicales externes selon les 4 scores de sévérité.....	60
Tableau IV : Incidence des RMS selon le sexe, le type de dents, le type de traitement, le type de malocclusion, le diagnostic vertical, la présence de dysfonctions, de canine incluse et la morphologie radiculaire.	62
Tableau V : Les facteurs associés à la survenue de RMS en analyse univariée et multivariée.....	64
Tableau VI : Récapitulatif des facteurs associés de façon statistiquement significative au risque de survenue des RMS.	65
Tableau VII : Comparaison des facteurs associés à la sévérité des résorptions radiculaires entre les études précédentes et la présente étude.....	71
Tableau VIII : Évaluation du risque de biais des études incluses à l'aide de l'indice méthodologique pour les études non randomisées (MINORS).....	84
Tableau IX : Études évaluant la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières	85
Tableau X : Etudes comparant la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires entre traitement orthodontique par des gouttières et traitement multi-attache fixe.....	85



SOMMAIRE

SOMMAIRE

INTRODUCTION	21
CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE	23
1. Les résorptions radiculaires	24
1.1. Définition	24
1.2. La résorption radiculaire d'origine orthodontique	24
2. Mécanismes biologiques de la résorption radiculaire d'origine orthodontique	24
2.1. Les cellules impliquées : odontoclaste et cémentoclaste	25
2.2. Interactions cellulaires pendant le processus de résorption radiculaire d'origine orthodontique	25
2.3. Voie moléculaire et génétique de la résorption radiculaire suite à l'application d'une force orthodontique :	28
2.4. Protection de la racine	33
2.5. Processus de réparation	33
3. Les formes cliniques des résorptions radiculaires d'origine orthodontique	34
3.1. Les résorptions de surface	34
3.1.1. Externes:	34
3.1.2. Internes:	35
3.2. Les résorptions de remplacement.....	36
4. Place résorptions radiculaires d'origine orthodontique selon les différentes classifications	37
4.1. Selon STEADMAN,.....	37
4.1.1. Les causes évidentes radiologiques:.....	37
4.1.2. Les résorptions sur dents dévitalisées.....	37
4.1.3. Les résorptions radiculaires sur dents vivantes:	37
4.2. Selon BOUYSSOU et coll.	37
4.2.1. Les résorptions internes	37
4.2.2. Les résorptions externes	37
4.3. Selon SARAZIN et BASSIGNY,.....	38
4.3.1. Les résorptions apicales.....	38
4.3.2. Les résorptions latérales	38
4.4. Selon ANDREASEN,.....	38
4.4.1. Les résorptions superficielles:	38
4.4.2. Les résorptions inflammatoires:	38
4.4.3. Les résorptions substitutives:	38
4.5. Selon TRONSTAD,	39
4.5.1. Transitoire:	39
4.5.2. Progressive:	39
4.6. Selon BREZNIAK et WASSERSTEIN,	39
4.6.1. Résorption cémentaire ou de surface avec remodelage:.....	39

4.6.2. Résorption dentinaire:	39
4.6.3. Résorption radiculaire apicale circonférentielle:.....	39
4.7. Selon FUSS et TESIS,	40
4.7.1. Résorption radiculaire due à une infection pulpaire:.....	40
4.7.2. Résorption radiculaire due à une infection parodontale:.....	40
4.7.3. Résorption radiculaire d'origine orthodontique:	40
4.7.4. Résorption radiculaire due à une source externe de pression:.....	40
5. Fréquence et facteurs de risque des résorptions radiculaires d'origine orthodontique	41
5.1. Fréquence :	41
5.2. Facteurs de risque.....	41
5.2.1. Etiologie non mécanique	41
5.2.1.1 L'âge	41
5.2.1.2 Le sexe.....	42
5.2.1.3 Les prédispositions génétiques	42
5.2.1.4 Les facteurs systémiques/état de santé générale.....	43
5.2.1.5 Les facteurs médicamenteux	44
5.2.1.6 Les anomalies dentaires.....	45
5.2.1.7 L'environnement périapical.....	46
5.2.1.8 Les facteurs traumatiques et parafunctionnels.....	47
5.2.2. Etiologie mécanique	48
5.2.2.1 L'intensité de la force orthodontique:	48
5.2.2.2 Le type de forces employées: continues ou interrompues:	48
5.2.2.3 La durée d'application des forces orthodontiques:.....	49
5.2.2.4 Le type des mouvements effectués:.....	49
5.2.2.5 Les techniques utilisées et les types d'appareils.....	51

CHAPITRE II : ETUDE CLINIQUE 53

1. Introduction: type et objectifs de l'étude:.....	54
2. Matériels et méthodes:.....	54
2.1. L'échantillon:	54
2.2. Les variables:.....	55
2.3. Le moyen d'évaluation:.....	56
2.4. L'analyse statistique :.....	57
3. Résultats	58
3.1. Description de la population étudiée.....	58
3.2. Description et comparaison de la morphologie radiculaire selon le type de dents	59
3.3. Description de la prévalence des résorptions radiculaires apicales externes	60
3.4. Incidence des résorptions modérées à sévères (RMS)	61
3.4.1. Incidence globale.....	61
3.4.2. Incidence des RMS selon les différentes variables	61

3.4.3. Les facteurs associés aux RMS	64
4. Discussion.....	66
4.1. Les limites de l'étude:	66
4.1.1. Le recueil des données:	66
4.1.2. Le moyen d'évaluation des résorptions radiculaires :	66
4.2. La comparaison des résultats avec les études précédentes:.....	68
4.2.1. Sexe et âge :.....	69
4.2.2. Le type de dents:.....	69
4.2.3. La durée de traitement:.....	70
4.2.4. Les extractions.....	72
4.2.5. Le type de malocclusion:.....	72
4.2.6. Le recouvrement incisif:.....	74
4.2.7. La morphologie radiculaire:	76
CHAPITRE III : COMPARAISON TRAITEMENTS FIXES VS ALIGNEURS : REVUE	
SYSTEMATIQUE.....	78
1. Introduction:	79
2. Matériels et méthodes:.....	79
3. Résultats:	80
3.1. Résultats de la recherche bibliographique.....	80
3.2. Caractéristiques des études.....	81
3.3. Risque de biais et évaluation de la qualité des études:.....	83
4. Discussion :	90
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	85
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	101
ANNEXES.....	85



INTRODUCTION

Le déplacement dentaire orthodontique est le résultat d'une réponse biologique à une modification de l'équilibre biologique du complexe dento-facial, lors de l'application d'une force externe. Certains facteurs vont modifier la cascade de phénomènes biologiques et perturber le déplacement de la dent, soit en le ralentissant ou en l'empêchant, soit en entraînant une résorption excessive de l'os et/ou de la racine dentaire [1,2].

Les résorptions radiculaires apicales externes sont l'un des principaux effets indésirables associés au traitement orthodontique. La majorité de ces résorptions sont légères et cliniquement insignifiantes, alors que dans les cas de résorptions modérées confinées au tiers de l'apex, ou particulièrement dans les cas de résorptions sévères dépassant le tiers apical de la longueur radiculaire, la longévité du système dentaire et par conséquent, la stabilité du traitement orthodontique pourraient être compromises [1-4].

L'étiologie et le mécanisme d'action des résorptions radiculaires d'origine orthodontique ne sont pas entièrement élucidés, les données de la littérature évoquent une étiologie multifactorielle faisant appel à des facteurs biologiques individuels (âge, maladies systémiques, susceptibilité individuelle, morphologie radiculaire, facteurs génétiques, ...) ainsi qu'à des facteurs mécaniques inhérents au traitement orthodontique (durée de traitement, les extractions, le type d'appareillage, la force appliquée, l'amplitude de déplacement...) [1-6].

Les résorptions associées au traitement orthodontique sont difficilement évitables, le rôle de l'orthodontiste reste crucial pour identifier les facteurs de risque, afin d'adapter la stratégie thérapeutique en fonction de ces facteurs [1-6]. Dans ce sens, plusieurs études [4-18] à l'échelle internationale ont été réalisées, afin d'évaluer la prévalence et la sévérité des résorptions après traitement orthodontique et les facteurs de risque qui leur sont associés.

Le but de ce travail était, dans un premier temps, d'identifier les facteurs de risque associés à la survenue et la sévérité des résorptions radiculaires après traitements multi-attaches fixes, et ceci à travers notre étude réalisée au service d'Orthopédie Dento-Faciale au Centre de Consultation et de Traitements Dentaires (CCTD) de Rabat, qui a été la première au Maroc évaluant cette association. Dans un deuxième temps, nous avons mené une revue systématique afin de comparer la fréquence et la sévérité des résorptions radiculaires entre le traitement multi-attache fixe et le traitement par des aligneurs.



**CHAPITRE I :
REVUE DE LITTERATURE**

1. Les résorptions radiculaires

1.1. Définition

Pour Copeland et Green [19], une résorption radiculaire est une lésion permanente qui peut s'étendre d'une fraction de millimètre à plus de la moitié de la racine et compromettre ainsi gravement la stabilité de la dent. C'est une activité cémentolytique et éventuellement dentinolytique de la surface radiculaire, de nature irréversible.

Pour les dents permanentes, la résorption est un phénomène pathologique. En effet, malgré la présence d'inflammation, les racines sont naturellement résistantes aux phénomènes de résorptions, grâce aux couches de pré-cément et de pré-dentine qui jouent un rôle protecteur. L'action conjuguée d'un traumatisme, qui endommage l'une de ces couches, et d'une inflammation, pourra engendrer une résorption radiculaire [20].

1.2. La résorption radiculaire d'origine orthodontique

Selon Lenorcy [21], une résorption radiculaire d'origine orthodontique est un processus inflammatoire stérile complexe, survenant suite à l'application d'une force et qui fait intervenir de nombreux acteurs comme les racines dentaires, l'os, les cellules inflammatoires clastiques, la matrice environnante et des messagers biologiques.

Ces résorptions radiculaires « orthodontiques » sont donc des résorptions pathologiques, le plus souvent irréversibles, elles sont au traitement d'orthodontie, ce que les cicatrices sont aux interventions chirurgicales [21].

2. Mécanismes biologiques de la résorption radiculaire d'origine orthodontique

La résorption radiculaire des dents permanentes est un phénomène complexe, dont de nombreux aspects restent encore mal élucidés [22].

Les cellules clastiques, c'est-à-dire ostéoclastes (pour l'os), cémentoclastes (pour le cément) et odontoclastes (pour la dentine), ont des fonctions et des structures semblables. Il en est de même pour les ostéoblastes, cémentoblastes, et odontoblastes [2,23,24].

2.1. Les cellules impliquées : odontoclaste et cémentoclaste

Il est connu que la surface de la dent est protégée de la résorption par des barrières physiques telles que des couches non minéralisées de matrices extracellulaires et des fibres parodontales. Jusqu'ici, il est admis que la résorption radiculaire de la dent permanente a lieu dans des sites où ces barrières sont détruites, comme conséquence d'une inflammation, d'un traumatisme ou d'un stress mécanique, comme dans le cas de la force orthodontique [22,23].

Toutefois, les résorptions osseuses et dentaires sont similaires par le fait qu'elles impliquent la décalcification de cristaux minéraux dans un microenvironnement et une dégradation de matrices organiques, proches dans leurs constitutions, par des protéinases. On considère que les cellules multinucléés responsables de la destruction des tissus durs, odontoclastes/cémentoclastes, ont une ultrastructure et des caractéristiques histochimiques analogues à celles de l'ostéoclaste [22,23].

Le processus de cytodifférenciation des odontoclastes/cémentoclastes, durant la phase initiale de résorption, commence par l'apparition de cellules mononucléées TRAP-positives (tartrate resistant acide: phosphatase résistante à l'acide tartrique), présumées être des précurseurs odontoclastiques, aux abords des vaisseaux sanguins du tissu conjonctif, pulpaire ou desmodontal. Ensuite, elles entrent en contact avec la surface dentaire, dentine pour les odontoclastes, ou ciment pour les cémentoclastes, par élongation de leur processus cellulaire. Après attachement à la surface dentaire, elles fusionnent avec leurs voisines pour former des cellules multinucléés [22,23].

2.2. Les interactions cellulaires pendant le processus de résorption radiculaire d'origine orthodontique

Tout comme la résorption osseuse, la résorption dentaire implique une dissolution des cristaux d'hydroxyapatite et une dégradation protéolytique de la matrice organique [1,2,22-26].

Lors d'un traitement orthodontique, des forces sont appliquées sur les dents et créent, au niveau des racines, de l'os, et du ligament, des zones de pression. D'après Homann et coll. [23], les zones où la pression hydrostatique est supérieure à 0,0047 Mpa (pression des capillaires), correspondent aux zones de résorption.

Selon Reitan [2], si la pression est excessive, il peut y avoir une lésion du ligament alvéolo-dentaire (LAD) avec un trouble circulatoire qui entraîne une nécrose aseptique par coagulation, créant une zone dite hyaline (Fig.1).

D'après Brudvik et Rygh [27,28], la hyalinisation comprend 3 phases :

- La dégénérescence.
- L'élimination des produits du catabolisme.
- La réorganisation.

Des cellules pionnières apparaissent au bord de cette zone acellulaire puis l'envahissent, détruisant le collagène du LAD, il s'en suit une invasion vasculaire accompagnée de cellules phagocytaires [24].

Des substances provenant du LAD nécrosé et des vaisseaux endommagés pourraient contaminer le ciment et le rendre attractif pour les cellules responsables des phénomènes de résorption.

Cette zone hyaline serait donc à l'origine du phénomène de résorption.

Les cémentoclastes, cellules directement responsables de la résorption radiculaire, ne sont capables d'agir que sur du tissu minéralisé, car elles ne s'activent qu'à son contact direct. Or, la surface radiculaire est recouverte d'éléments organiques protecteurs, comme les fibres de collagène les plus matures, les fibroblastes, les cémentoblastes, les cellules endothéliales, et la couche cémentoïde [2,22-24].

L'élimination de la zone hyaline entraîne une altération de la couche cémentoïde, permettant alors la résorption de la matrice minérale par les cellules clastiques, en commençant par la périphérie de la zone nécrotique [1,20,24-26].

Les cellules mononuclées non clastiques seraient les premières à intervenir au niveau de la zone hyaline pour l'éliminer. Elles commenceraient également à détruire la couche cémentoïde ainsi que le ciment minéralisé acellulaire. Les cémentoblastes sont impliquées dans l'élimination de la couche cémentoïde et les fibroblastes desmodontaux, qui présentent une activité collagénase importante, pourraient aussi participer à l'élimination du tissu cémentoïde [1-3,24-26,28-30].

Les cellules mononuclées, les pseudo-macrophages phagocyteraient le tissu nécrosé.

Les cellules fibroblastiques élimineraient le pré-ciment par phagocytose et activité collagénolytique [3,27-29].

Enfin, les cellules multinuclées à activité clastique, les cémentoclastes, présentant un bord strié, signe de leur activation, arriveraient en dernier, une fois la matrice organique et une partie de la zone nécrotique aient été éliminées. Ils peuvent ainsi entrer en contact par leur rebord strié avec la phase minérale du ciment ou de la dentine, plus particulièrement dans des lacunes de résorption, ou lacunes de Howship [3,29].

Comme les ostéoclastes, les cémentoclastes sont des cellules polarisées, possédant des protéines contractiles qui permettent de former la « sealing-zone » et ainsi l'isolation de la zone extracellulaire sous le cémentoclaste, qui délimite sa surface d'action. L'activité enzymatique de l'ostéoclaste et le cémentoclaste est également très proche, dans la lacune de résorption [3,29].

Le microenvironnement, situé entre la bordure en brosse des cémentoclastes et la surface à résorber est acide, à l'instar des ostéoclastes, l'acidification de cet espace est également due à l'activité de la pompe à protons qui libère dans ce milieu des ions H⁺. Cette acidification permet la dissolution des cristaux d'apatite et l'exposition de la matrice organique cémentaire [1-3,24-26,28-30].

La dégradation protéolytique de la matrice organique fait intervenir des collagénases, des protéases (cathepsine K) et des métalloprotéinases matricielles sécrétées par les odontoclastes.

Les facteurs de régulation de l'activité cémentoclastique sont encore peu connus, il semblerait que 1-25(OH)₂ vitamine D₃ et l'interleukine 1 IL1 stimulent les mécanismes de résorption. Par contre, la parathormone, qui stimule la résorption osseuse, ne semble pas avoir d'effet sur le recrutement des cémentoclastes [1-3,24-26,28-31].

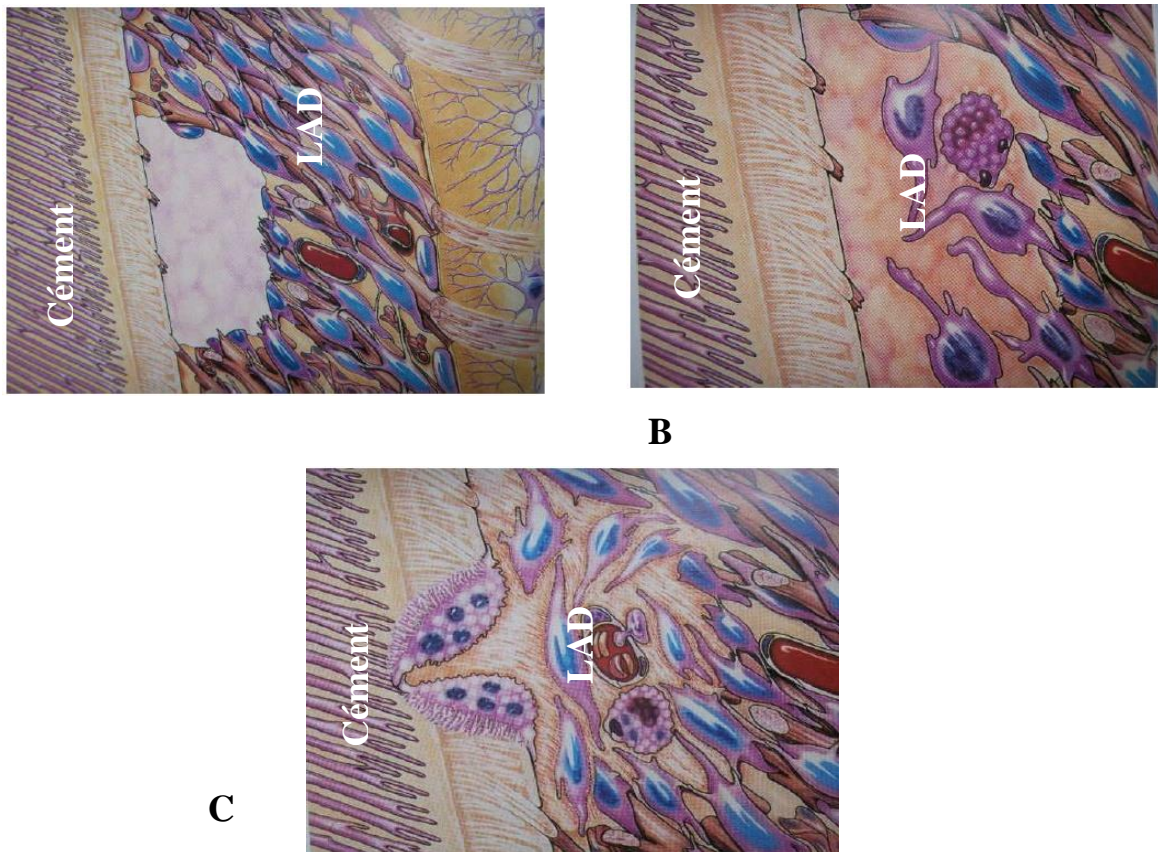


Figure 1 : Le mécanisme de la résorption radiculaire selon Andreasen [30].

- A: Traumatisme d'une surface restreinte du LAD et formation de la zone hyaline (H).
 B: Un nouveau tissu conjonctif repeuple le site lésé.
 C: Les cellules clastiques résorbent superficiellement la surface radiculaire endommagée.

2.3. Voie moléculaire et génétique de la résorption radiculaire suite à l'application d'une force orthodontique :

L'application de la force orthodontique entraîne une cascade d'événements dans la région de compression et de tension conduisant au mouvement dentaire. La figure 2 décrit les voies moléculaires au cours du déplacement orthodontique. En effet, cela passe par deux voies :

- 1) activation du contrôle des ostéoclastes par la voie de modulation de l'inflammation IL-1B /l'ATP/P2RX7/.
- 2) voie de contrôle de l'activation des ostéoclastes RANK/RANKL/OPG [32].

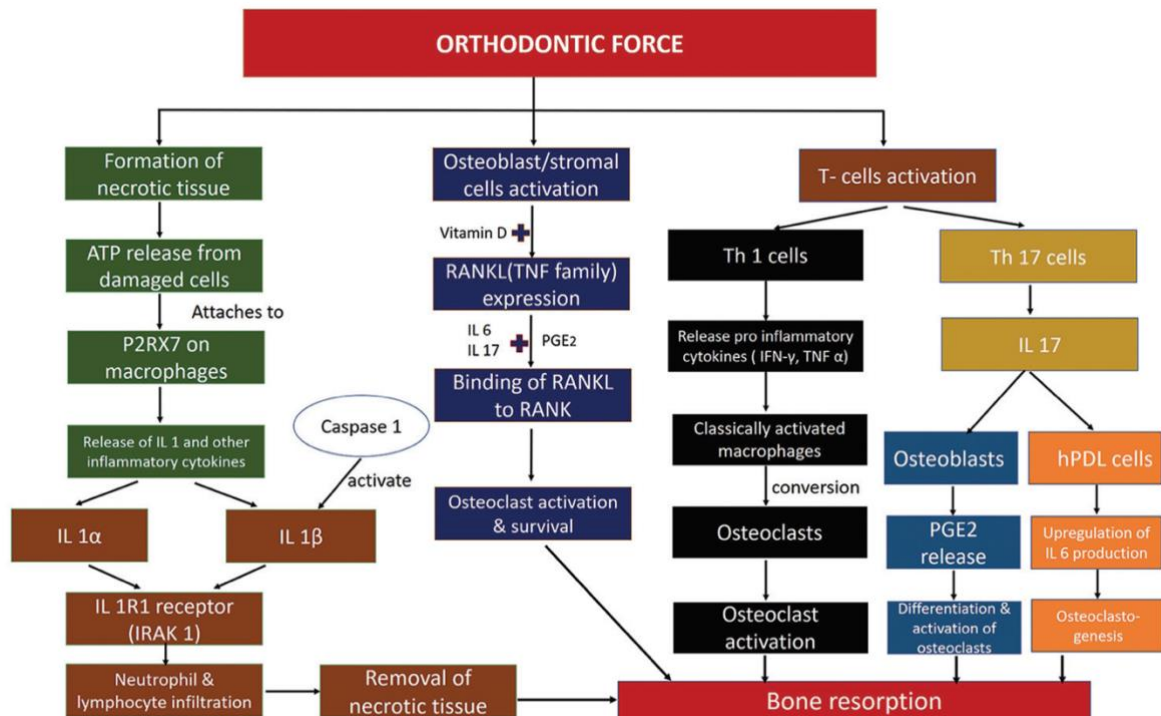


Figure 2 : La voie moléculaire pendant le déplacement orthodontique [32].

La section suivante décrit les divers médiateurs du mouvement dentaire et leurs polymorphismes génétiques associés, responsables de la résorption radiculaire.

La familles des Interleukines 1

IL1 α et IL1 β sont codés par des gènes distincts mais se lient au même récepteur IL 1R1. Le précurseur d'IL1 α est constitutivement présent, pleinement actif et est libéré par des cellules nécrotiques pendant les phases précoces de l'inflammation. Cependant, IL1 β est inactif et est clivé par la caspase 1 pour libérer la cytokine active dans l'espace extracellulaire. L'antagoniste de récepteur de l'interleukine, IL1ra est une cytokine naturelle qui inhibe l'activité de l'IL1 en se liant aux récepteurs de IL1R1 avec une affinité élevée empêchant ainsi le signal de transduction [32].

IL-1 β est une puissante cytokine impliquée dans la résorption osseuse et joue un rôle clé dans les voies complexes menant à la résorption radiculaire. Le polymorphisme de IL-1B (+3954) chez les sujets traités orthodontiquement joue un rôle dans la genèse des résorptions radiculaires au cours du traitement orthodontique et l'allèle IL-1B est un facteur de risque de ces résorptions [32].

Le polymorphisme du gène IL-1B, rs1143634 (C3954T) a été associé aux résorptions radiculaire dans plusieurs populations géographiques de patients [33-34]. De plus, ce polymorphisme était impliqué dans environ 15 % de la variation des résorptions radicaire des incisives centrales maxillaires des patients orthodontiques [33]. Pourtant, certaines études basées sur des patients n'ont pas prouvé cette association [32].

IL-1ra pourrait affecter la résorption osseuse pendant le traitement orthodontique en empêchant IL-1 de stimuler les ostéoclastes et de conduire ainsi à la résorption radicaire. Les polymorphismes du gène IL-1RN ont été corrélés à une forte expression d'IL-1ra et donc, à des résorptions radicaire apicales externes [32].

Les rôles de l'IL1 β dépendent principalement de la liaison au récepteur 1 de l'IL-1 (IL1R1). L'activation d'IL1R1 conduit au recrutement de molécules adaptatrices comme IRAK1, avec activation ultérieure de la signalisation des voies de transduction. L'hyperphosphorylation d'IRAK1, déclenche l'activation de la voie de transduction du signal, et plus tard, son ubiquitination et la dégradation du protéasome éteignent la signalisation [32,35]. Le gène IRAK1 est situé sur le chromosome X à la position q28. Le polymorphisme IRAK1 (rs1509703) a été associé à des résorptions radicaire apicales externes [32].

L'interleukine 6:

L'IL-6 agit comme une cytokine multifonctionnelle avec des effets à la fois inflammatoires et anti-inflammatoires. L'IL-6 et ses récepteurs activent deux voies de signalisation principalement: la kinase JAK, la voie de transduction du signal et d'activation transcriptionnelle (JAK/STAT) et la voie des protéines kinases activant les mitogènes (MAPK). L'IL-6 a été observée avec des taux augmentés dans le liquide gingival et le ligament parodontal chez les patients orthodontiques [32]. Il a été discerné que l'IL-6 jouerait un rôle dans la régulation locale du remodelage osseux et de l'inflammation aiguë au début du traitement orthodontique[32]. De plus, Guo et coll. [36] ont mené une étude où IL-6 SNP (rs1800796) avec le génotype GC s'est avéré être en rapport avec une plus grande résorption radicaire que le génotype CC.

L'interleukine 17:

L'interleukine pro-inflammatoire (IL-17A) serait impliquée dans la stimulation de l'odontoclastogenèse et influencerait l'expression de l'ARNm de RANKL à partir des cellules pulpaire dentaires humaines *in vitro* [32]. Ainsi, Hayashi et coll.[37] ont suggéré que les cellules T-helper 17 pourraient aggraver le processus de résorption radiculaire inflammatoire induite par le déplacement orthodontique.

Le Récepteur purinergique P2X, canal ionique dépendant du ligand 7 (P2RX7):

P2RX7 est exprimé dans les ostéoblastes et les ostéoclastes et semble avoir un effet pro-ostéogénique, activant la fonction ostéoblastique et induisant l'apoptose des ostéoclastes. Il stimulerait également la libération des cytokines inflammatoires telles que l'IL-1B par les cellules immunitaires en agissant via la voie de modulation de l'inflammation ATP/P2RX7/IL-1B [32].

Linhartova et coll.[38] dans une étude récente, ont révélé que la variabilité du gène P2RX7 et la durée du traitement, pourraient être des facteurs importants contribuant à l'étiopathogénie des résorptions radiculaires après traitement orthodontique.

Gène du récepteur de la vitamine D:

La vitamine D est responsable de la régulation de certains gènes niveau de la transcription, via l'interaction avec le récepteur de la vitamine D et influencerait ainsi les réponses immunitaires de l'hôte et certains aspects du développement osseux, de la croissance et l'homéostasie. La vitamine D stimulerait l'ostéoclastogenèse en agissant par l'intermédiaire de son récepteur nucléaire, dans les cellules ostéoblastes/stromales immatures, par la voie réglementaire RANKL/OPG [Figure 2]. En outre, la vitamine D pourrait améliorer l'expression de l'IL-1 β via un mécanisme transcriptionnel direct au cours du processus inflammatoire [32].

Des polymorphismes dans le gène du récepteur de la vitamine D ont été associés à la densité minérale osseuse, le turn-over osseux et les maladies dans lesquelles la perte minérale est un signe cardinal [32]. Une étude de Fontana et coll [39], dans la population brésilienne a montré que le polymorphisme du récepteur de la vitamine D TaqI (rs 731236) serait associé aux résorptions radiculaires post-orthodontiques.

Gène de l'ostéopontine (OPN):

L'ostéopontine est une glycoprotéine phosphorylée acide contenant un motif Arg-Gly-Asp (RGD), qui peut interagir avec divers récepteurs comprenant α v- β 3 et d'autres intégrines, permettant ainsi à l'odontoclaste d'adhérer à la surface radiculaire au début de la résorption pathologique. L'OPN jouerait un rôle dans l'activation de l'odontoclaste au cours du processus de résorption radiculaire [32]. Iglesias-Linares et coll. [40] ont montré que le gène OPN (rs9138; 3'UTR et rs 11730582; 5' près de la région) seraient des déterminants d'une prédisposition génétique aux résorptions radiculaires secondaires au traitement orthodontique.

RANK/RANKL/OPG:

Les ostéoblastes et les cellules souches stromales expriment l'activateur de récepteur du NF-kappa B ligand (RANKL), qui se lie à son récepteur, activateur du facteur nucléaire-kappa B (RANK, codé par le gène TNFRSF11A), à la surface des ostéoclastes et leurs précurseurs. L'ostéoprotégérine (OPG, codée par le gène TNFRSF11B) est sécrétée par les ostéoblastes et les cellules souches stromales et protégerait d'une résorption osseuse excessive en se liant à RANKL et en l'empêchant de se lier à RANK [32].

L'étude de Hartsfield et coll.[41] a évalué l'association entre le polymorphisme nucléotidique simple (SNP) rs2073618 du gène TNFRSF11B (OPG) et les résorptions radiculaires chez les patients traités orthodontiquement et a montré que le polymorphisme de l'OPG serait impliqué dans environ 8 % de la variation totale des résorptions radiculaires post-orthodontiques.

Protéines Wnt:

Les voies de signalisation Wnt sont un groupe de voies de transduction de signal, constituées de protéines qui transmettent des signaux à une cellule par les récepteurs de surface cellulaire. OPG/RANKL régule la formation osseuse, et des études dans la littérature suggèrent que les perturbations de l'OPG/RANKL contribuent à des phénotypes de faible masse osseuse chez l'homme et la résorption radiculaire également [32]. La voie OPG/RANKL, à son tour, est médiée par la signalisation Wnt; un stimulus Wnt positif permet simultanément de réduire à la baisse RANKL et augmenter à la hausse l'OPG, améliorant ainsi la formation et inhibant la résorption osseuse [32]. Lim et coll. [42] ont montré que la réduction génétique de la signalisation Wnt dans l'environnement du complexe parodontal serait suffisante pour provoquer spontanément des résorptions radiculaires.

2.4. Protection de la racine

La racine est plus résistante aux résorptions que l'os alvéolaire. D'une part parce que les mécanismes de régulation du processus de résorption sont différents entre l'os et le ciment, d'autre part parce que la racine est recouverte d'une couche cémentoïde, se résorbant moins bien que la matrice ostéoïde sous l'effet de la collagénase [2,24,30].

Selon Andreasen [30], le ligament intact ainsi que la surface radiculaire contiennent un taux d'anticollagénases supérieur à l'os. Ainsi, lorsque le ligament est lésé, ce taux diminue aussi bien que la résistance à la résorption. La région apicale présente une plus grande susceptibilité à la résorption, en raison d'une densité plus faible de fibres de Sharpey dans la région apicale (cément cellulaire), alors que ces fibres sont plus lâches dans la région coronaire (cément acellulaire) [2,24,30].

Enfin, les cémentoblastes, fibroblastes, ostéoblastes, cellules endothéliales et cellules périvasculaires forment une véritable couche de protection de la racine. Certaines pourraient posséder des propriétés anticollagéniques [2,24,30].

2.5. Processus de réparation

L'augmentation des lacunes de résorptions radiculaires permet de diminuer la pression exercée au niveau de l'apex, ce qui autorise l'initiation du processus de réparation cémentaire [21].

Plusieurs mécanismes vont se mettre en place:

- Activation des précurseurs des cémentoblastes.
- Inhibition des cellules clastiques et de leurs précurseurs.
- Activation des fibroblastes du LAD.
- Équilibration de l'activité cellulaire qui tend vers la cémentogénèse.

Ce processus de réparation est régulé par de nombreux médiateurs participant au phénomène d'apposition/résorption. Parmi ceux-ci, on peut citer :

- Les cytokines IL1, IL6.
- Les prostaglandines Pgs.
- Les leucotriènes Lts.
- Les inositol phosphates.
- Les RANKL (produits par les ostéoblastes et les fibroblastes).
- M-CSF.

Au début de la phase de réparation, le LAD faisant face aux lacunes de résorption est résorbé

puis reconstitué par les fibroblastes qui synthétisent les fibres de collagène. Celle-ci s'ancrent dans la première couche de ciment néoformé et au bout de quelques jours, elles seront incorporées dans la nouvelle couche cémentaire [2,21,43,44].

Le ciment de réparation a tendance à progresser du centre vers l'extérieur de la lésion. Il n'est pas différent du ciment qui recouvre physiologiquement le tiers apical de la racine.

Les fibres parodontales vont pénétrer toutes les lacunes pour assurer une réparation rapide.

Les particules minérales utilisées pour la réparation proviendraient du ciment résorbé précédemment.

Le ciment de réparation est de type cellulaire, et seule une fine couche de ciment acellulaire se trouverait sur moins de 1% de la surface de réparation [2,21,43,44].

Pour Breznlak et Wasserstein [45], le processus de réparation commence 2 semaines après l'arrêt des forces, le ciment résorbé est généralement restauré comme l'os lors du remodelage osseux, cependant lorsque l'agression de la surface radiculaire entraîne de larges défauts au niveau de l'apex, en l'isolant progressivement du reste de la surface radiculaire, cette zone de ciment, et éventuellement de dentine, est isolée, puis résorbée et ne sera pas réparée.

3. Les formes cliniques des résorptions radiculaires d'origine orthodontique

3.1. Les résorptions de surface

Elles se créent après un dommage léger sur la surface radiculaire. La réparation se fait spontanément et rapidement (entre deux semaines et 1 mois) (Fig.3).

C'est une résorption transitoire et auto-limitante, pouvant entraîner la formation de petite lacunes visibles à la radiographie, situées soit latéralement soit apicalement, provoquant dans ce cas, un léger raccourcissement de la racine [10,22,30].

3.1.1. Externes:

Dans le cadre du traitement orthodontique, la résorption et l'inflammation sont stériles, et se développent de la même façon que certains types de résorptions actives. La résorption touche d'abord la surface radiculaire, puis progresse de façon plus ou moins importante. La lésion progresse tant que les facteurs d'activation des mécanismes de résorption, c'est-à-dire les contraintes orthodontiques, persistent. Elle peut réduire la longueur radiculaire de façon considérable, au point de compromettre le rapport couronne-racine [10,22,30,46,47] (Fig.3).

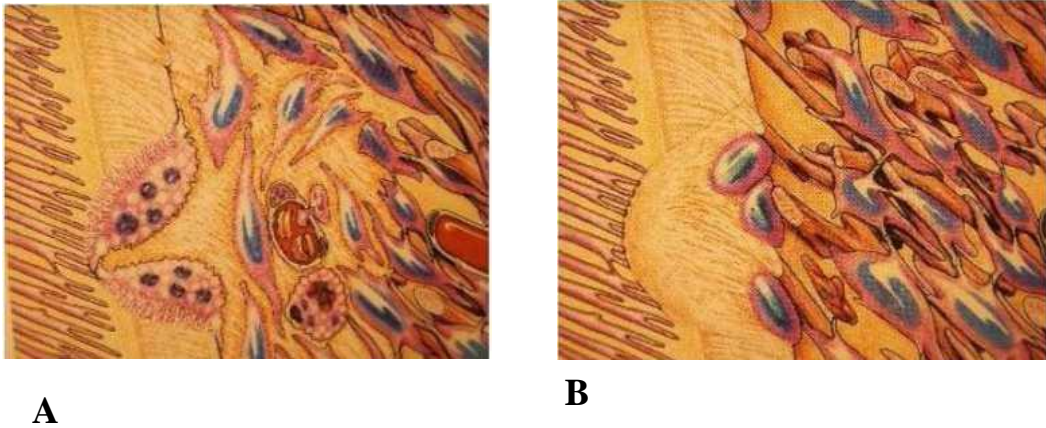


Figure 3 : Résorption de surface (A) et réparation (B) selon Andreasen [30].

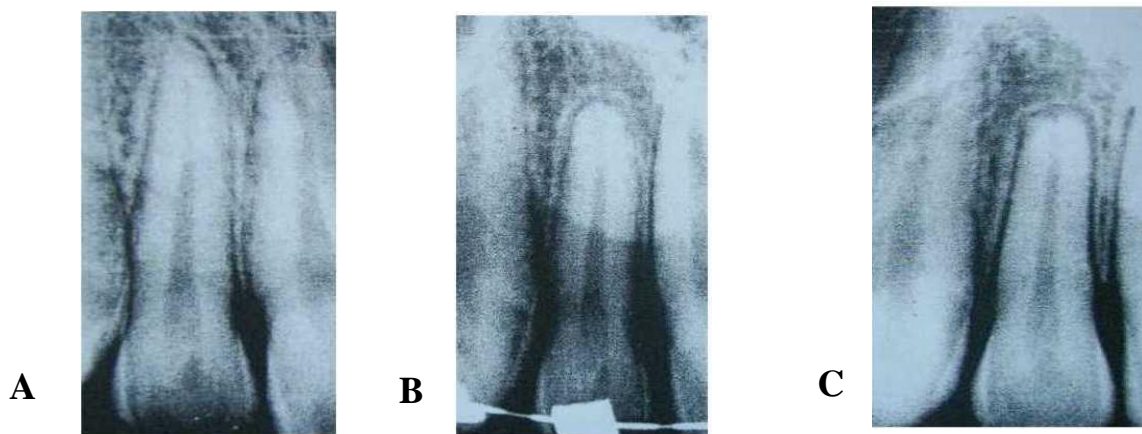


Figure 4 : Evolution d'une résorption radiculaire apicale externe suite à un traitement orthodontique

3.1.2. Internes:

Lorsque la résorption touche la jonction cémento-dentinaire, notamment au niveau apical, la pré-dentine est affectée et une résorption interne pourrait survenir. La pulpe est alors touchée [10,22,30].

3.2. Les résorptions de remplacement

Lorsque la résorption endommage une grande surface laissant de vastes zones dentinaires sans protection, celles-ci se retrouvent en contact direct avec l'os. A la radiographie, la lamina dura et le ligament disparaissent, et la perte de substance radiculaire est progressivement remplacée par de l'os: c'est l'ankylose (Fig .5). Il n'y a pas de traitement possible [10,22,30].

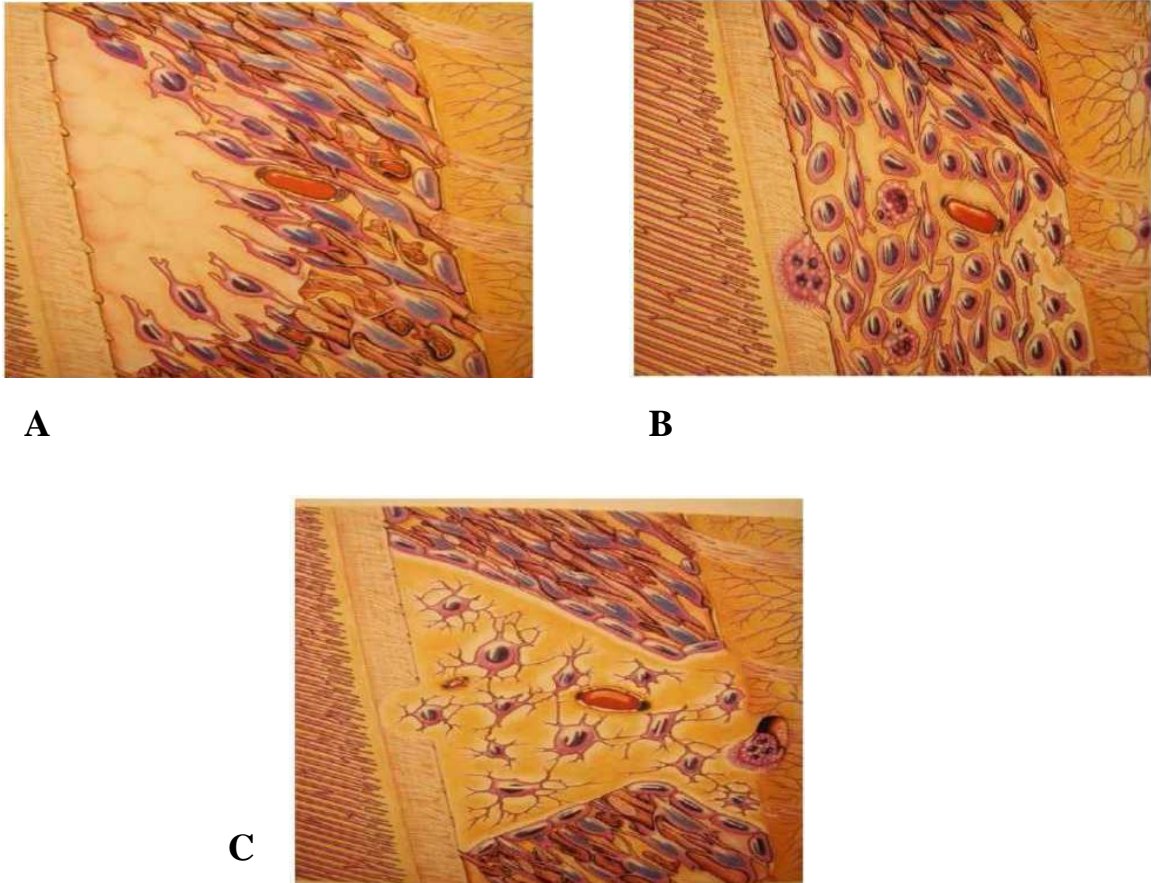


Figure 5 : Le phénomène d'ankylose selon Andreasen [30].

A: Néoformation tissulaire: Un nouveau tissu conjonctif, provenant de la moelle osseuse ou de la portion alvéolaire du LAD, repeuple le site lésé.

B: Résorption: Les ostéoclastes attaquent la surface radiculaire.

C: Ankylose: Le tissu cicatriciel pontre le ligament et l'os immature.

4. Place des résorptions radiculaires d'origine orthodontique selon les différentes classifications

4.1. Selon STEADMAN,

Il classe les facteurs étiologiques des résorptions radiculaires en 3 groupes principaux:

4.1.1. Les causes évidentes radiologiques:

- *Kystes.
- *Granulomes.
- *Dents incluses.

4.1.2. Les résorptions sur dents dévitalisées.

4.1.3. Les résorptions radiculaires sur dents vivantes:

- *Non soumises à un traitement orthodontique.
- *D'origine orthodontique [52].

4.2. Selon BOUYSSOU et coll.

Cette classification distingue 2 types de résorptions:

4.2.1. Les résorptions internes

- * Appelées aussi intra-dentaires ou térébrantes.
- * Elles sont d'origine pulpaire et évoluent de manière centrifuge.
- * Elles ne sont pas en rapport direct avec le traitement orthodontique et sont plus rares.

4.2.2. Les résorptions externes

- * Egalement appelées amputantes.
- * Elles commencent au niveau du cément et progressent vers la dentine. La racine change de forme et se retrouve progressivement amputée.
- * Le traitement orthodontique en est l'une des causes [53].

4.3. Selon SARAZIN et BASSIGNY,

Cette classification est basée sur la localisation de la résorption.

4.3.1. Les résorptions apicales

- * Ce sont les plus fréquentes durant un traitement orthodontique, l'apex étant le plus soumis aux forces de déplacement.
- * Elles sont visibles radiographiquement, et considérées comme irréversibles.

4.3.2. Les résorptions latérales

- * Elles sont plus rares que les précédentes, et sont beaucoup moins visibles à la radiographie.
- * Elles sont par contre considérées comme réversibles [54,55].

4.4. Selon ANDREASEN,

Il distingue trois sortes de résorptions radiculaires externes:

4.4.1. Les résorptions superficielles:

Des surfaces réduites sont touchées, leur répartition se fait spontanément à partir des zones adjacentes encore saines du ligament.

4.4.2. Les résorptions inflammatoires:

Elles se propagent à travers les tubuli dentinaires et atteignent le tissu pulpaire infecté et nécrosé. Elles ne s'arrêtent que lorsque les facteurs d'activation disparaissent.

4.4.3. Les résorptions substitutives:

L'os remplace le tissu dentaire résorbé. C'est l'ankylose [56].

4.5. Selon TRONSTAD,

Il classe la résorption inflammatoire en 2 catégories:

4.5.1. Transitoire:

Généralement invisible à la radiographie, elle apparaît lorsque le stimulus pathogène est minime et de courte durée.

4.5.2. Progressive:

Elle est plus importante et survient lorsque le stimulus pathogène agit de façon continue sur une plus longue période [57].

ANDREASEN et TRONSTAD placent les résorptions d'origine orthodontique entre les résorptions superficielles et les résorptions inflammatoires transitoires [56,57].

4.6. Selon BREZNIAK et WASSERSTEIN,

Pour eux, le terme le plus approprié pour parler du processus de résorption engendré par le traitement orthodontique est « *orthodontically induced inflammatory root résorption (OIIRR)* ». En effet, l'application de forces orthodontiques induit un phénomène qui comprend toutes les caractéristiques de l'inflammation. Cette inflammation est essentielle au mouvement orthodontique, mais est également la principale composante du processus de résorption radiculaire.

Ils ont établi 3 degrés de sévérité des OIIRR:

4.6.1. Résorption cémentaire ou de surface avec remodelage:

Seules les couches cémentaires sont résorbées et sont ensuite totalement régénérées ou remodelées.

4.6.2. Résorption dentinaire:

Le ciment et la couche externe de la dentine sont résorbés et normalement réparés par de la matrice cémentaire. La racine sera relativement identique à sa forme initiale.

4.6.3. Résorption radiculaire apicale circonférentielle:

Résorption totale des composants des tissus durs apicaux, le raccourcissement radiculaire est évident. Différents degrés de sévérité de la résorption sont possibles [45].

4.7. Selon FUSS et TESIS,

Les résorptions sont classées selon leur étiologie en 5 groupes:

4.7.1. Résorption radiculaire due à une infection pulpaire:

Entraîne une résorption radiculaire externe.

4.7.2. Résorption radiculaire due à une infection parodontale:

- Elle est due à:
 - * *une agression physique.*
 - * *une agression traumatique orthodontique (exemple : bague mal ajustée).*
 - * *une agression chimique (exemple : blanchiment).*
- Elle entraîne des résorptions cervicales.

4.7.3. Résorption radiculaire d'origine orthodontique:

Entraîne des résorptions apicales pathologiques.

4.7.4. Résorption radiculaire due à une source externe de pression:

- * *tumorale.*
- * *dentaire (exemple: canine maxillaire incluse) [49].*

En résumé: Les résorptions radiculaires d'origine orthodontique sont dans la plupart des cas:

- Situées dans la zone apicale. Les résorptions cervicales ou latérales étant rares après traitement orthodontique.
- Des résorptions externes. Les résorptions internes sont moins fréquentes après traitement orthodontique.
- Des résorptions inflammatoires. Les résorptions non inflammatoires de type ankylose avec envahissement secondaire par l'os, sont rares en orthodontie et sont rencontrées lors de la mise en place des dents incluses.
- Des résorptions transitoires de surface qui cessent après l'arrêt des forces, les résorptions progressives sont plus rares après traitement orthodontique et leur pronostic reste réservé [1,45-51]

5. Fréquence et facteurs de risque des résorptions radiculaires d'origine orthodontique

5.1. Fréquence :

Les résorptions radiculaires sont considérées comme le coût biologique de la thérapeutique orthodontique, avec une fréquence de 78% à 90%. La fréquence des résorptions sévères varie de 2% à 19%, selon la taille de l'échantillon, la méthode d'évaluation utilisée et le groupe de dents étudiées [5-7,9,11,21,46,58,59].

Selon les données de plusieurs études [5-7,9,11,21,46,58,59], les dents de l'arcade maxillaires sont plus sensibles aux résorptions radiculaires que leurs homologues mandibulaires. De façon générale, les dents antérieures expriment plus de résorptions que les dents postérieures [9,21,46,59].

Les incisives maxillaires représentent le groupe de dents où la fréquence des résorptions radiculaires est la plus élevée, vu que le degré de résorption est corrélé à la distance parcourue par l'apex lors des mouvements de rétraction et de torque. Après les incisives maxillaires, les dents les plus touchées par ces résorptions et par ordre décroissant, sont les incisives mandibulaires, les canines maxillaires, les premières molaires maxillaires au niveau de la racine distale, la deuxième prémolaire mandibulaire et enfin la deuxième prémolaire maxillaire [9,21,46].

5.2. Facteurs de risque

5.2.1. Etiologie non mécanique

5.2.1.1 L'âge

Chez les sujets avec un âge avancé, plusieurs facteurs prédisposeraient au risque de résorption radiculaire après traitement orthodontique: zones de hyalinisation plus larges avec un temps d'élimination plus long que chez le sujet jeune, l'absence de barrières de protection comme le pré-cément et la pré-dentine au niveau de l'apex et une capacité de réparation tissulaire relativement réduite [9,58,59]. D'après les auteurs de ces études, les patients commençant leur traitement orthodontique plus tôt auraient moins de résorptions, ceci serait dû à une meilleure réponse tissulaire, et également une meilleure adaptation musculaire face aux changements occlusaux [9,58,59].

Dans l'étude de Sameshima et Sinclair [7], les adultes présentaient plus de résorptions que les enfants ou les adolescents, uniquement au niveau des incisives mandibulaires.

Par contre, selon d'autres études [4-6,11,60] l'âge ne s'est pas révélé comme un facteur de risque des résorptions radiculaires après traitement orthodontique.

Pour Mirabella et Artun[9], l'âge en lui-même ne serait pas un facteur de risque, mais les résorptions développées chez l'adulte après traitement orthodontique seraient plus sévères que chez le sujet jeune.

5.2.1.2 Le sexe

De nombreux auteurs n'ont pas trouvé d'association entre le sexe et la survenue de résorptions radiculaires après traitement orthodontique [4-7,11,16,17,61].

Kjaer [62] a observé une plus grande susceptibilité aux résorptions chez les femmes. Cependant, son étude a été menée sur des patients présentant des anomalies telles que le taurodontisme ou les agénésies, que l'on retrouve plus fréquemment chez les patients de sexe féminin [50].

Par ailleurs, Baumrind et coll. [10] ont observé plus de résorptions chez les hommes.

5.2.1.3 Les prédispositions génétiques

Des études génétiques précédentes [32,36-38,40-42], réalisées sur des souris majoritairement, ont montré que certains polymorphismes génétiques pourraient influencer la voie moléculaire de la résorption radiculaire, ce qui suppose que certains génotypes seraient beaucoup plus susceptibles aux résorptions radiculaires que d'autres.

Par ailleurs, chez les humains, Aminoshariae et coll. [63] ont montré, à travers leur revue systématique, que l'association entre polymorphisme génétique et susceptibilité aux résorptions radiculaires apicales externes, n'était pas clairement établie.

Concernant les patients apparentés, Harris et coll. [64] ont montré que les patients issus d'une même famille manifesteraient le même degré de résorption, alors qu'entre différentes familles, les résultats étaient totalement variables. Même si les caractères génétiques familiaux tels que la malocclusion pourraient influencer la similitude des résultats, ils n'agiraient pas directement sur la susceptibilité aux résorptions radiculaires.

5.2.1.4 Les facteurs systémiques/état de santé générale

a) Hyperparathyroïdisme:

L'hyperparathyroïdisme additionné à une hypocalcémie, entraîneraient une augmentation des résorptions radiculaires et osseuses. Les hormones parathyroïdiennes augmentent le nombre d'ostéoclastes présents dans le ligament, tandis que le calcium joue un rôle important dans la médiation des effets des stimuli extérieurs sur leurs cellules cibles [65,66].

Dans une étude de Verna et coll. [67] les résultats sont différents. Lorsque le turnover osseux augmente suite à des injections d'hormones parathyroïdiennes, moins de résorptions radiculaires ont été observées.

D'après Poumpros et coll. [68], les résultats dépendraient de la dose d'hormone injectée. Dans leur étude, ils ont observé les effets d'injection de la thyroxine sur les rats, ils ont constaté que le groupe ayant reçu des injections a développé moins de résorptions que le groupe qui n'en a pas reçu. D'après leurs résultats, la thyroxine diminuerait la fréquence des résorptions radiculaires, et la thyroïde jouerait un rôle important dans le métabolisme osseux.

b) Asthme/allergies

L'inflammation est une phase intégrante de la réponse tissulaire après l'application d'une force et ceci au cours des premiers stades du déplacement dentaire. La présence de leucocytes dans le sang périphérique provenant des organes malades, suppose une possible association entre résorption radiculaire et conditions pathologiques y compris l'allergie et l'asthme qui impliquent le système immunitaire [14].

Mac Nab et al. [69] ont tenté de savoir si les patients asthmatiques étaient plus susceptibles (incidence et sévérité) aux résorptions radiculaires par rapport aux sujets sains, cette étude a montré une incidence plus forte des résorptions au niveau des molaires maxillaires chez les patients asthmatiques; ce résultat ne rapportait cependant que des résorptions de faible intensité.

Owman-Moll et Kurol [70] ont étudié l'influence d'un terrain allergique comme facteur prédisposant des résorptions. Bien que le résultat de leur étude n'ait pas été statistiquement significatif, il semblerait que les sujets allergiques ont un risque accru face aux résorptions radiculaires.

Ultérieurement, plusieurs études [14,16,71] ont montré que l'allergie et l'asthme étaient des facteurs de risque des résorptions radiculaires après traitement orthodontique, d'une part à cause

de la présence de médiateurs inflammatoires en proportion élevée dans la circulation générale, et d'autre part à cause de l'état parodontal affaibli par la persistance d'inflammation tout au long du traitement.

c) Obésité/malnutrition

Ces pathologies sembleraient présenter un facteur de risque aux résorptions radiculaires après traitement orthodontique [50,65,66].

d) Problèmes hormonaux

Ils ne causeraient pas mais influenceraient le phénomène de résorption [50,65,66].

e) Diabète

Le diabète aurait également une influence sur les résorptions radiculaires [50,65,66].

f) Grossesse

La grossesse pourrait éventuellement être considérée comme un facteur de risque des résorptions radiculaires, dans la mesure où l'on rencontre chez la femme enceinte une concentration élevée de prostaglandines [50,66].

5.2.1.5 Les facteurs médicamenteux

Certains patients traités orthodontiquement ont des antécédents de traitement par chimiothérapie anticancéreuse, différentes études [65,72,73] ont préalablement révélé une incidence élevée d'anomalies dentaires (microdonties, apex béants, opacité d'émail) chez ces patients. Nawrocki et coll. [72] ont rapporté 36 % d'hypoplasies et 50 % d'anomalies radiculaires chez 64 enfants traités par chimiothérapie anticancéreuse. Ils décrivent également le risque élevé d'anomalies majeures de type agénésies chez les enfants ayant reçu des traitements anti-cancéreux précoces (avant 4-5 ans). Un antécédent de traitement par chimiothérapie anticancéreuse représenterait donc un réel risque d'apparition de résorptions radiculaires au cours d'un traitement orthodontique, vu la fréquence élevée d'anomalies radiculaires et des agénésies, considérées déjà comme des facteurs de risque des résorptions radiculaires [65,72,73].

5.2.1.6 Les anomalies dentaires

Les anomalies dentaires sont souvent dépistées lors de l'éruption des dents permanentes. Mais c'est à l'occasion d'un bilan radiologique qu'elles sont le plus souvent découvertes. Le cliché panoramique permet un bilan commode de première intention, éventuellement complété par des clichés endo-buccaux ou par des techniques d'imagerie sectionnelle [21].

Levander et Malmgren [1,11] distinguent 4 types de morphologies radiculaires anormales: la racine courte, l'apex émoussé, l'apex coudé et l'apex grêle en forme de pipette (Fig.6).

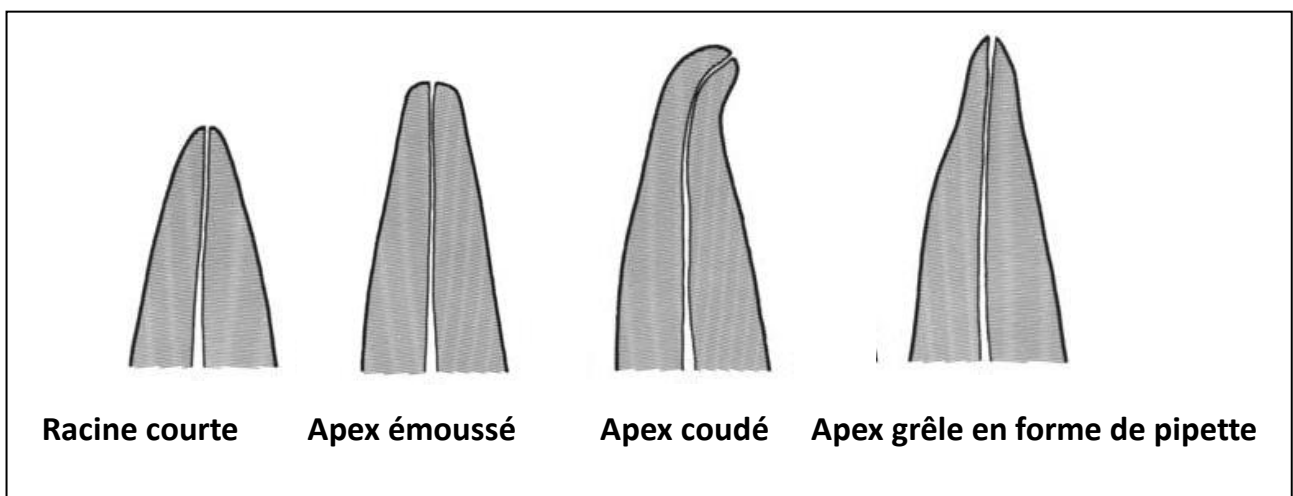


Figure 6 : Classification des anomalies de la morphologie radiculaire selon Levander et Malmgren(1998)[11].

Lorsque l'on regarde les travaux s'intéressant à l'étude de la morphologie radiculaire et son association avec le risque de résorptions radiculaires lors du traitement orthodontique, les résultats sont variables: il apparaît que les dents présentant une anatomie radiculaire anormale particulièrement les racines avec un apex grêle présentent un risque plus élevé de résorptions après traitement orthodontique [16,21]. Cependant, Dans d'autres études [7,16,50], ce sont les racines coudées qui présentent une grande susceptibilité aux résorptions après traitement orthodontique.

D'autres anomalies dentaires (taurodontisme, invaginations dentaires...) ont également été mises en évidence comme facteurs de risque des résorptions radiculaires. De même, les dents enclavées peuvent subir une résorption radiculaire par prolifération de leur membrane cystique ou du tissu conjonctif du follicule dentaire, et les dents incluses peuvent entraîner la résorption de la racine des dents adjacentes [50,65,66].

Une étude de Levander et coll. [11] a mis en évidence une relation entre les agénésies et la survenue de résorptions radiculaires: les patients ayant plus de quatre dents agénésiées présentaient un risque significativement plus élevé de développer des résorptions radiculaires que ceux qui avaient une agénésie d'une à trois dents.

5.2.1.7 L'environnement périapical

a) Le degré de maturité de l'apex:

L'étude menée par Linge et Linge [5] a montré que les traitements commencés après 11 ans, en tenant compte du stade d'édification radiculaire, entraîneraient plus de résorptions que ceux commencés avant cet âge. En revanche, si un traitement orthodontique est initié alors que la maturation dentaire n'est pas achevée, les racines tendent à atteindre une longueur inférieure à celle qu'elles auraient potentiellement pu obtenir.

Dans le même cadre, Mavragani et coll. [58], Tieu LD et coll. [4] et Maués CP et coll. [18] ont montré que les dents immatures, sous l'influence de forces orthodontiques, n'atteignaient pas leur longueur normale; mais restaient tout de même plus longues que les dents matures ayant subies des résorptions. Il serait donc préférable de commencer le traitement orthodontique à un âge où les apex ne sont pas encore totalement fermés, période durant laquelle les dents immatures seraient plus résistantes aux résorptions. L'hypothèse avancée pour expliquer ce phénomène, est d'une part, en présence d'un apex béant, les changements histophysiologiques de la pulpe seraient moins marqués, ce qui pourrait conférer à la racine une meilleure tolérance biologique durant le traitement, d'autre part, les extrémités apicales des dents immatures, de structure encore acalcique, seraient plus résistantes à une éventuelle destruction ostéoclastique [18].

b) les dents dévitalisées:

Drysdale et coll. [74] ont réalisé une revue de littérature sur le déplacement orthodontique des dents traitées endodontiquement. Ils ont rapporté que les dents dévitalisées avec un ligament alvéolo-dentaire sain ne présentaient pas plus de risque de résorption radiculaire que les dents vivantes chez le même patient. Par ailleurs, Esteves T et coll. [58] ont comparé le degré de résorption radiculaire après traitement orthodontique entre des incisives dévitalisées et leurs controlatérales à pulpe vivante, leurs résultats ont montré que les dents dévitalisées présentaient plus de résorptions sévères que leurs homologues à pulpe vivante, cependant cette différence n'était pas statistiquement significative. Les mêmes résultats ont été ultérieurement prouvés par Llamas-Carreras et coll. [76,77].

c) la densité de l'os alvéolaire:

Les données concernant le rapport entre la densité de l'os alvéolaire et la survenue de résorptions radiculaires sont controversées [50]. Selon Reitan [2] et Rygh [24], le risque de résorptions augmentait avec la densité de l'os alvéolaire. En effet, l'os moins dense présente plus d'espaces spongieux, les cellules de résorptions y seraient moins nombreuses. D'après les mêmes auteurs [2,24], une force lourde et continue appliquée sur un os alvéolaire de faible densité causerait le même degré de résorption qu'une force légère et continue appliquée sur un os alvéolaire de densité élevée.

Cependant, Roberts-Harry et coll. [78] ont constaté que la densité de l'os alvéolaire déterminerait l'amplitude du déplacement dentaire mais elle n'était pas associée à l'extension de la résorption radiculaire.

5.2.1.8 Les facteurs traumatiques et parafunctionnels**a) Les traumatismes:**

Malmgren et coll. [79] ont étudié la fréquence des résorptions radiculaires après traitement orthodontique, au niveau des incisives maxillaires ayant subi un traumatisme. Une analyse inter-individuelle a montré que la différence entre les dents ayant subi des traumatismes mineurs ou modérés et les dents des patients contrôles n'était pas significative. Les mêmes résultats ont été ultérieurement rapportés par Brin et coll. [13] et Nishioka et coll. [14].

Cependant, les études de Linge et Linge [5] ainsi que celle de Mavragani et coll. [12] et de Nanekrunsan et coll. [16] ont montré une association très significative entre les résorptions radiculaires apicales et les antécédents de traumatismes dentaires de plus d'un an avant le début du traitement orthodontique. Ces résorptions post-traumatiques sembleraient être la conséquence d'un long processus de cicatrisation où le ligament parodontal a été lésé, ce qui augmenterait encore plus la susceptibilité aux résorptions radiculaires après traitement orthodontique [77].

b) Les parafunctions/traumatismes occlusaux

L'étude de Linge et Linge [5] a mis également en évidence une association entre les résorptions radiculaires et les parafunctions (succion du pouce ou dysfonctions linguales ou labiales), bien que cette association n'était pas significative dans plusieurs études ultérieures [12,14,16].

Enfin, Graber et Vanarsdall [80] ont étudié l'association entre les traumatismes occlusaux survenant au cours du traitement orthodontique et le risque de résorptions radiculaires. En effet,

lorsqu'une occlusion fonctionnelle non traumatique est rétablie, on observe un arrêt du processus de résorption voire une réparation.

5.2.2. Etiologie mécanique

5.2.2.1 L'intensité de la force orthodontique:

Selon Brezniak N et coll. [81], il n'existe pas de différence dans la sévérité des résorptions radiculaires à l'usage des forces légères ou lourdes. Cependant, d'après Maltha et coll. [82], l'intensité des forces utilisées en orthodontie serait l'un des principaux facteurs étiologiques des résorptions radiculaires; la distribution des lacunes de résorption serait directement liée à l'intensité de la force utilisée, ces lacunes se développent plus rapidement en cas de forces lourdes. Partant du même constat, Graber et Vanarsdall [80] et Chan et coll. [83] ont souligné à diverses reprises l'importance de l'utilisation de forces dites « légères » afin d'augmenter l'activité cellulaire dans les tissus environnants tout en réduisant le risque de résorption radiculaire. La force optimale favorable au déplacement dentaire sans causer de résorption radiculaire devrait être située entre 7 et 26 g/cm² [80,83].

Toutefois, Ren et coll. [84] ont conclu, à partir de leur revue systématique, qu'il n'existait pas un consensus concernant le niveau de force qui soit le plus optimal à la mécanique orthodontique, la force optimale diffère selon la dent, le type de mouvement (ingression, torque...etc), les caractéristiques de l'individu et le type d'appareillage...etc.

Ultérieurement, Roscore et coll. [85] ont montré qu'il existait une corrélation positive entre des niveaux de force élevés et l'augmentation du degré de résorption radiculaire, particulièrement si ces forces sont appliquées pendant une longue durée.

5.2.2.2 Le type de forces employées: continues ou interrompues:

Une étude de Weiland [86] a montré que les arcades appareillées avec des arcs en nickel titane se trouvaient dans une position significativement plus éloignée de leur position initiale et avaient subi un mouvement de version significativement plus important, sur une période de 12 semaines, que les arcades appareillées avec des arcs en acier. Ce même auteur a montré aussi que les dents soumises à des forces continues (arcs en NiTi) présentaient significativement plus de résorptions et des lacunes de résorptions plus larges et plus profondes que les dentures soumises à des forces intermittentes (arcs en acier).

De plus, Roscore et coll. [85], ont montré que les intervalles de repos entre les activations (3 à

5 semaines) seraient bénéfiques au processus de réparation cémentaire. Cependant, des intervalles de repos trop longs entre deux activations des arcs en acier, pourraient laisser place à un mouvement dentaire contraire à celui de l'arc sous l'effet de la musculature buccale, ce qui augmenterait le risque de résorptions radiculaires, en accroissant fortement le mouvement de va-et-vient (jiggling) parcouru par la racine [85].

5.2.2.3 La durée d'application des forces orthodontiques:

Une étude de Kurol, Owman-Moll et Lundgren [87] a mis en évidence une fréquence des résorptions six fois plus importante chez les patients ayant reçu un traitement orthodontique. D'après ces auteurs, la durée du traitement aurait plus d'impact sur le risque de survenue et la sévérité des résorptions radiculaires que l'amplitude des forces utilisées.

Ce résultat a été confirmé par la méta-analyse de Segal Gr et coll. [88] et la revue de littérature de Long D Tieu et coll. [4] qui mettent en avant la durée du traitement ainsi que la distance totale parcourue par l'apex comme principaux facteurs des résorptions radiculaires.

Selon Levander et Malmgren [1] 34% des dents présentaient des résorptions à 9 mois de traitement, alors qu'à 19 mois, cette fréquence s'élevait à 56%.

De plus, Apajalahti et Peltola [89] ont estimé de 18 mois la durée moyenne de traitement des patients qui n'ont pas manifesté des résorptions, tandis que cette durée était de 28 mois pour les patients présentant des résorptions sévères.

5.2.2.4 Le type des mouvements effectués:

a) Le mouvement de version:

Pour Graber et Vanarsdall [80], le mouvement de version entraîne une concentration des zones de pression dans des zones spécifiques du ligament alvéolo-dentaire, essentiellement à proximité de la crête alvéolaire et au niveau apical. Si les forces exercées sont trop fortes, une pression considérable est exercée au niveau apical, ce qui favoriserait l'apparition des résorptions radiculaires.

b) Le mouvement de torque:

Le mouvement de torque correspond à un déplacement de l'apex, le centre de rotation de la dent étant situé dans la région coronaire. Durant la phase initiale du mouvement, la zone de pression maximale se trouve dans le tiers moyen radiculaire, une zone où le ligament alvéolo-dentaire est le plus étroit. Au fur et à mesure de la résorption osseuse dans cette zone médiane, une pression de plus en plus forte se manifeste dans la région apicale [65].

Avec des forces trop importantes, des résorptions radiculaires ont été observées au niveau du tiers moyen de la dent puis au niveau du tiers apical. Le maximum de la résorption apicale a été observé dans un mouvement de torque radiculo-lingual [65].

c) Le mouvement d'ingression:

C'est un mouvement vertical, dans le sens des forces occlusales, qui aboutit à une réimplantation de la dent dans l'alvéole. C'est donc un mouvement à risque [65].

Le mouvement d'ingression nécessite un contrôle extrêmement rigoureux de l'intensité de la force employée, car elle est concentrée dans une zone très localisée de l'apex [65]. Les études cliniques donnent des résultats contradictoires pour l'établissement d'une association entre le mouvement d'ingression et la sévérité des résorptions radiculaires. Une étude de Costopoulos et Nanda [90] a montré que les résorptions étaient significativement plus importantes dans les groupes traités orthodontiquement que dans les groupes témoins, bien qu'aucune association statistiquement significative n'a pu être établie entre la résorption radiculaire et le mouvement d'ingression. Cependant, Selon Martins et coll [91], l'utilisation d'une mécanique d'ingression augmenterait le risque des résorptions chez les patients avec supraclusion incisive.

d) Le mouvement d'égression:

C'est un mouvement vertical dans le sens de l'éruption de la dent. Horiuchi et coll. [92], ont observé une augmentation de la fréquence des résorptions radiculaires même lors du mouvement d'égression. Cependant, ces résorptions seraient moins sévères que lors de l'utilisation des forces intrusives.

Par ailleurs, Han et coll. [93] ont comparé l'application de forces continues intrusives et extrusives sur des prémolaires droites et gauches maxillaires d'un même individu. L'étude a été menée sur 9 patients dont les prémolaires ont été ensuite extraites puis observées directement au microscope. Les résultats ont montré que l'ingression des prémolaires a entraîné environ quatre fois plus de résorptions radiculaires que leur égression, la profondeur ainsi que l'étendue des lacunes étaient, elles aussi, beaucoup plus importantes.

e) Le mouvement de rotation:

Ce mouvement consiste à appliquer un couple de forces, défini comme deux forces de même intensité, parallèles entre elles et de sens opposés. Il en résulte une rotation pure de la dent autour de son grand axe. Le mouvement de rotation produit des lésions superficielles des tissus parodontaux, particulièrement au niveau des dents monoradiculées [50]. Selon Jimenez-Pellegrin et coll. [94], la section horizontale de la racine des dents monoradiculées présentait des courbures proéminentes localisées dans le tiers moyen, qui seraient susceptibles de générer des zones de pression lors de la rotation de ces dents. Les zones de résorptions au cours de ce mouvement sont constamment situées à la limite entre les faces vestibulaires et distales, ainsi qu'entre les faces mésiales et linguales [50,94].

5.2.2.5 Les techniques utilisées et les types d'appareils

Une étude menée par Beck et Harris [95] n'a pas révélé une différence significative quant à la fréquence et la sévérité des résorptions radiculaires entre les techniques de Tweed et de Begg.

Par contre, Mavragani et coll. [12] ont mis en évidence des résorptions de forme plus sévère chez les patients traités avec la technique Edgewise standard, que chez ceux traités avec la technique d'arc droit. Ils en ont conclu que cela était dû à un contrôle plus efficace des forces générées dans la technique d'arc droit, qui limiterait le facteur opérateur. Cependant, Nishioka et coll. [14] n'ont pas trouvé de différence statistiquement significative concernant la prévalence et la sévérité des résorptions entre les deux techniques, et les mêmes résultats ont été rapportés par Nanekrungsan et coll. [16].

Concernant le matériau des brackets, Lopatiene K et coll. [50] ont montré que les brackets en céramique causaient plus de résorptions que les brackets métalliques, une constatation qui, serait plus imputable à la durée de traitement généralement plus longue avec des brackets en céramique comparativement aux brackets métalliques, qu'à la nature du matériau lui-même.

A l'usage des brackets auto-ligaturants, Savoldi et coll [96] ont évalué les brackets du système Damon quant au risque de survenue des résorptions radiculaires, leurs résultats ont montré que ces dernières seraient très légères et localisées uniquement au niveau des incisives mandibulaires. Dans une étude précédente, Scott et coll. [97] ont comparé les brackets auto-ligaturants du même système, avec les brackets conventionnels, pour évaluer le risque des résorptions au niveau des incisives mandibulaires, les résultats n'ont pas montré de différence statistiquement significative de la sévérité des résorptions à l'usage des deux types de brackets.

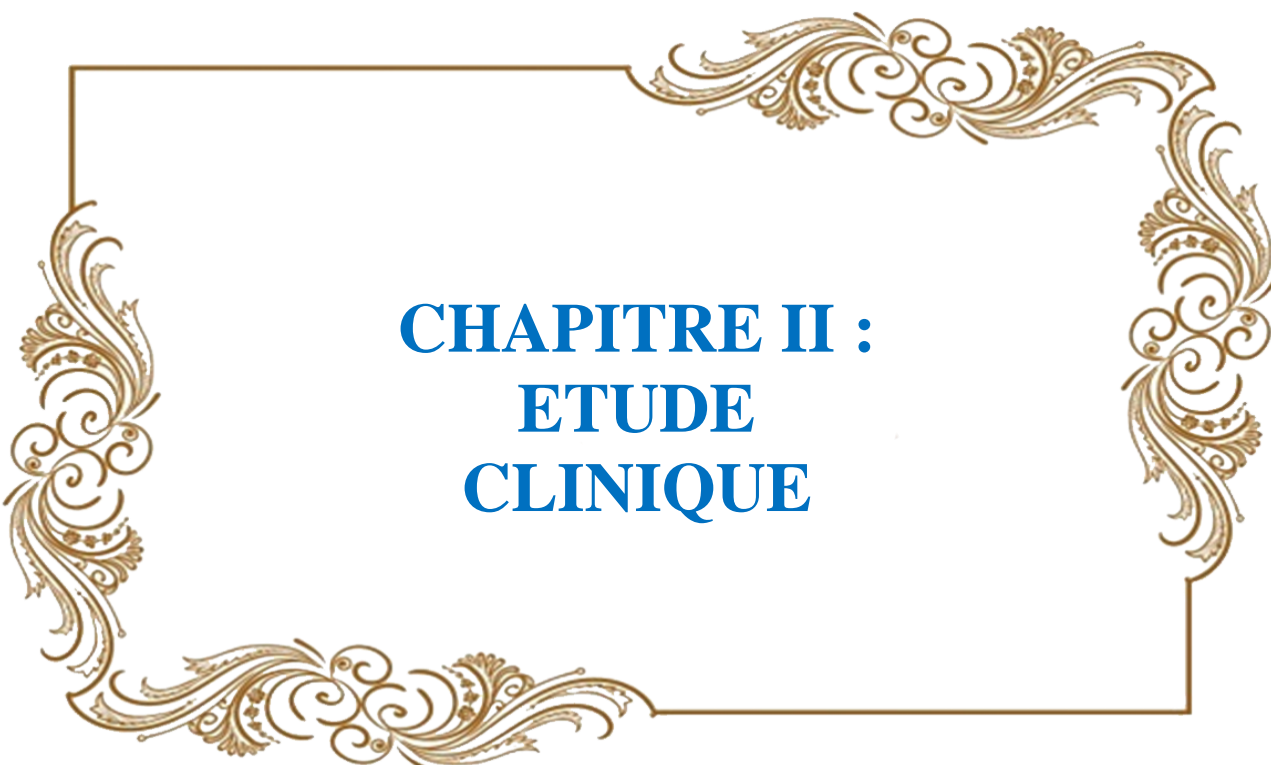
Dans le même objectif de comparaison des deux systèmes, Yi et coll [98] ont montré dans leur méta-analyse que la quantité de résorption radiculaire au niveau des incisives maxillaires était significativement plus faible à l'usage des brackets auto-ligaturants que les brackets conventionnels. Aucune différence n'a été notée pour les autres incisives en comparant les deux systèmes. Les auteurs ont conclu donc que les systèmes auto-ligaturants ne seraient pas en mesure de surpasser les systèmes conventionnels en termes de réduction du risque de résorptions sauf quand il s'agirait de l'incisive centrale, un résultat qu'il faudrait encore confirmer par des études à haut niveau de preuves.

Dans une étude tridimensionnelle ultérieure, Aras et coll [99] ont comparé le degré de résorption radiculaire entre les deux systèmes en utilisant l'imagerie Cône Beam, leurs résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre l'incisive centrale et l'incisive latérale en comparant le volume de résorption, cependant, le groupe traité avec des brackets conventionnels présentait une prévalence significativement élevée de lésions palatines et proximales obliques. Les auteurs sont parvenus à la conclusion que les données actuelles ne pourraient pas suggérer la supériorité d'un système en considérant le modèle et la quantité des résorptions radiculaires et que l'incidence élevée de résorptions palatines et proximales obliques retrouvées à l'usage des brackets conventionnels devrait faire l'objet de recherches approfondies afin d'en identifier les causes.

Par ailleurs, les travaux de Mavragani et coll. [12] ont montré que l'utilisation d'arcs rectangulaires et d'élastiques de Classe II augmentait le risque des résorptions radiculaires.

Une autre étude de Linge et Linge [5] a montré que les patients traités par des activateurs n'ont pas développé plus de résorptions que le groupe contrôle. Cependant, les patients traités par un appareillage fixe, des élastiques de classe II et des arcs rectangulaires torqués, ont eu plus de résorptions. Ces appareillages ont été considérés eux-mêmes comme des facteurs de risque des résorptions. Ce résultat doit toutefois être relativisé, car l'amplitude des déplacements radiculaires est différente selon les deux types de thérapeutiques, étant donné que les appareils amovibles déplacent peu les racines dentaires.

Enfin, une étude menée par Alwali et coll. [100] n'a pas mis en évidence une différence statistiquement significative entre le degré de résorption radiculaire observé chez les patients traités par force extra-orale cervicale et les patients traités par des élastiques ou des barres palatines de Goshgarian. Cependant, des résorptions plus sévères ont été observées dans le groupe « forces extra-orales » que dans le groupe témoin; ce paramètre a été considéré comme un facteur de risque des résorptions radiculaires.



**CHAPITRE II :
ETUDE
CLINIQUE**

1. Introduction: type et objectifs de l'étude:

Il s'agit d'une étude de cohorte rétrospective, réalisée au Service d'Orthopédie Dento-Faciale, au Centre de Consultation et de Traitements Dentaires (CCTD) de Rabat.

Les objectifs de notre étude étaient de:

1. Décrire les caractéristiques de la population orthodontique traitée au sein de notre service, qui sont: l'âge, le sexe, la durée de traitement, le type de traitement (avec ou sans extractions), le type de malocclusion (classe I DDM, Classe II, Classe III), le diagnostic occlusal vertical (normal, supraclusion, béance), la déglutition dysfonctionnelle, l'inclusion canine et la morphologie radiculaire (normale, anomalie radiculaire).
2. Décrire l'incidence et la sévérité des résorptions radiculaires apicales externes après traitement orthodontique au niveau des incisives maxillaires.
3. Analyser la contribution des facteurs de risque généraux et thérapeutiques, représentés par les caractéristiques préalablement citées ci-dessus, dans la survenue des résorptions modérées à sévères (RMS).

2. Matériels et méthodes:

2.1. L'échantillon:

Les dossiers de 350 patients ont été consultés, il s'agit des sujets ayant achevé leur traitement orthodontique au Centre de Consultation et de Traitements Dentaires (CCTD) de Rabat. L'étude a concerné 318 dents chez 82 patients sélectionnés au hasard, ayant satisfait les critères d'inclusion et d'exclusion suivants :

a) Les critères d'inclusion:

- * Âge ≥ 12 ans.
- * Durée minimale du traitement multi-attache de 12 mois.
- * Un bilan radiologique complet avant, au cours, et à la fin de traitement.

b) Les critères d'exclusion:

- * Les patients présentant des maladies systémiques: diabète, arthrose, hypothyroïdie...
- * Les cas de fentes labio-alvéolo-palatines.
- * Les antécédents de traumatisme antérieur.
- * Les parodontopathies.
- * Les incisives immatures,
- * Les dents traitées endodontiquement.
- * Les cas de bruxisme.
- * Les cas orthodontico-chirurgicaux.

2.2. Les variables:

Les dossiers retenus ont été examinés afin de relever les facteurs dont on a étudié l'association avec la survenue de RMS, à savoir :

- * L'âge.
- * Le sexe.
- * La durée de traitement.
- * Le type de traitement: avec ou sans extractions.
- * Le type de malocclusion selon la classification d'Angle: classe I DDM, classe II, classe III.
- * Le recouvrement occlusal vertical: normal, supraclusie, béance.
- * La déglutition dysfonctionnelle.
- * L'inclusion canine.
- * La morphologie radiculaire: normale, anomalie radiculaire.

2.3. Le moyen d'évaluation:

La radiographie panoramique du début de traitement a été utilisée pour l'étude des anomalies de la morphologie radiculaire et la présence éventuelle de canines incluses.

La morphologie radiculaire a été évaluée en se basant sur la classification de Levander et Malmgren (1998) [11] qui définit 4 types d'anomalies radiculaires, qui sont:

- * La racine courte.
- * L'apex émoussé.
- * L'apex coudé.
- * L'apex grêle en forme de pipette.

Les radiographies panoramiques demandées au cours et à la fin du traitement orthodontique ont été examinées pour l'évaluation des résorptions radiculaires apicales externes au niveau des incisives maxillaires, en se référant aux scores de la classification de Levander et Malmgren (1998) [11] (Fig.7).

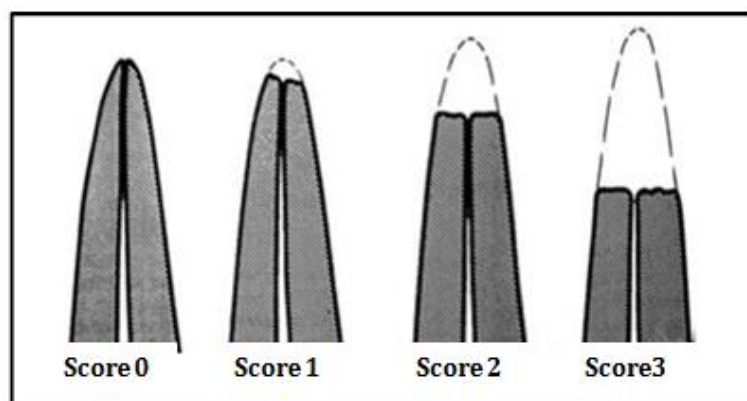


Figure 7 : Stades des résorptions radiculaires apicales externes

- * **Score 0:** contour radiculaire régulier.
- * **Score 1:** résorption légère, le contour de l'apex est diffus/émoussé (<2mm).
- * **Score 2:** résorption modérée (>2mm), le contour de l'apex est discontinu (1/2 cercle)
- * la résorption est confinée au 1/3 apical.
- * **Score 3:** résorption sévère, le contour de l'apex est très irrégulier, la résorption dépasse le 1/3 de l'apex.

Pour les dents présentant des résorptions radiculaires apicales externes, elles ont été divisées en 2 sous- groupes selon la sévérité des résorptions: les résorptions légères (RL), et les résorptions modérées à sévères (RMS).

Le but était de déterminer, de manière rétrospective, le délai de survenue des RMS.

Pour cela :

- ❖ Le délai d'évaluation des RL s'étendait de la date du début de traitement à la date de fin de traitement.
- ❖ Le délai d'évaluation des RMS s'étendait de la date du début de traitement à la date de la radiographie panoramique où ses résorptions étaient visibles +/- 6 mois (Fig.8).

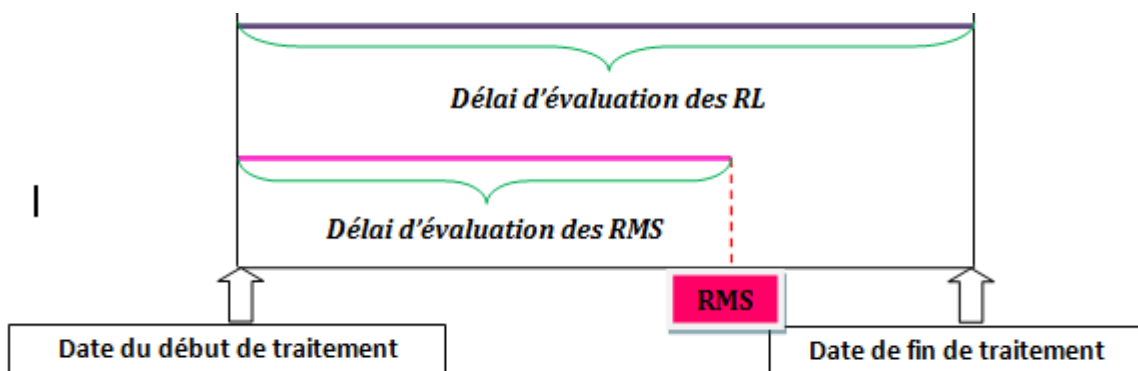


Figure 8 : Méthode d'évaluation du délai de survenue des RMS

2.4. L'analyse statistique :

a) Descriptive :

Pour décrire les caractéristiques de l'échantillon, les variables quantitatives sont exprimées en moyenne \pm écart-type et les variables qualitatives sont exprimées en effectif et pourcentage.

b) Analytique:

La comparaison des variables quantitatives a été réalisée par le test t de Student et la comparaison des variables qualitatives a été réalisée par le test de Khi-deux. Le seuil de significativité pour les deux tests a été fixé à 5% ($p < 0.05$).

L'étude de la survenue des RMS a été réalisée par la méthode de Kaplan-Meier. Nous avons comparé le groupe avec RMS et le groupe avec RL concernant les différentes caractéristiques par le test de Log Rank. L'étude des facteurs associés aux RMS a été réalisée par le modèle de Cox univarié et multivarié. Le modèle multivarié a été constitué par les variables qui étaient associées de façon statistiquement significative, ou avec un $p < 0,30$ en analyse univariée. Le degré de significativité a été fixé à 0.05.

3. Résultats

3.1. Description de la population étudiée

Le tableau I décrit les caractéristiques de la population étudiée:

Tableau I : Caractéristiques générales de la population étudiée

Variables	Valeur
Age (années)*	16,8±4,3
Sexe ¶	
Masculin	29(28)
Féminin	236(72)
Type de dents¶	
Centrale	164(50)
Latérale	164(50)
Durée de traitement (mois)*	30,7±10,7
Type de traitement¶	
Sans extractions	156(47,6)
Avec extractions	172(52,4)
Type de malocclusions¶	
Classe I DDM	188(64,4)
Classe II	88(30,1)
Classe III	16(5,5)
Recouvrement vertical¶	
Normal	96(29,3)
Supraclusie	152(46,3)
Béance	80(24,4)
Dysfonctions¶	
Non	159(50)
Déglutition dysfonctionnelle	159(50)
Canine incluse ¶	
Non	288(87,8)
Oui	40(12,2)
Morphologie radiculaire ¶	
Normale	160(50,3)
Anomalie radiculaire	158(49,7)

*Exprimé en moyenne ±écart-type

¶ Exprimé en effectif et pourcentage

Le sexe féminin était prédominant dans notre échantillon (72%) par rapport au sexe masculin (28%), l'âge variait de 12 à 27 ans, avec une moyenne de $16,8 \pm 4,3$ et la durée moyenne de traitement était de $30,7 \pm 10,7$ mois. Les traitements avec extractions étaient réalisées presque de la même fréquence que les traitements sans extractions (52.4% et 47.6% respectivement).

La classe I DDM était plus fréquente (64,4%), suivie de la classe II (30.1%), la classe III ne représentait que 5,5% des malocclusions. La supracluse était prédominante avec une fréquence de 46.3%, alors que les cas de béance représentaient 24.4%. Les cas de déglutition dysfonctionnelle représentaient 50%, et l'inclusion canine été notée dans 12.2%. La fréquence des racines avec anomalies radiculaires était presque égale à celle des racines sans anomalies radiculaires (49.7% et 50.3% respectivement).

3.2. Description et comparaison de la morphologie radiculaire selon le type de dents

Tableau II : Comparaison de la morphologie radiculaire selon le type de dents

	Morphologie radiculaire					<i>p</i>
	Normale	Racine courte	Apex émoussé	Apex coudé	Apex grêle	
Dent						
<i>Centrale</i>	96(60)	10(6,3)	33(20,6)	8(5)	13(8,1)	p<0.001
<i>Latérale</i>	64(40,5)	35(22,2)	5(3,2)	38(24,1)	19(12)	

En comparant les deux incisives (tableau II), la présence d'anomalies radiculaires était plus prédominante pour l'incisive latérale, essentiellement par la fréquence importante des racines courtes (22.2%), des apex coudés (24.1%) et grêles (12%), comparativement à l'incisive centrale (6.3%, 5% et 8.1% respectivement). Cette différence était statistiquement significative ($p<0.001$).

3.3. Description de la prévalence des résorptions radiculaires apicales externes

Le tableau III décrit la prévalence des résorptions radiculaires apicales externes selon leurs degrés de sévérité.

Tableau III : Prévalence des résorptions radiculaires apicales externes selon les 4 scores de sévérité.

Stade de résorption	Valeur Effectif (%)
Score 0: Absence de résorption (<i>score0</i>)	16(5)
Score1: Résorption légère (<i>score 1</i>)	113 (35,7)
Score 2: Résorption modérée (<i>score2</i>)	128 (40,3)
Score 3: Résorption sévère (<i>score 3</i>)	61(19)

La prévalence des résorptions radiculaires apicales externes dans notre échantillon était de 95%. 35,7% étaient des résorptions légères (score 1), 40,3% étaient des résorptions modérées (score 2), alors que les résorptions sévères (score 3) représentaient 19% (tableau III). Les résorptions modérées à sévères étaient donc de 59,3%.

3.4. Incidence des résorptions modérées à sévères (RMS)

3.4.1. Incidence globale

A 18 mois; l'incidence des RMS a été estimée à 10%, à 24 mois, cette incidence était de 31%, alors que 70% des RMS ont survenu à partir de 36 mois (Fig.9).

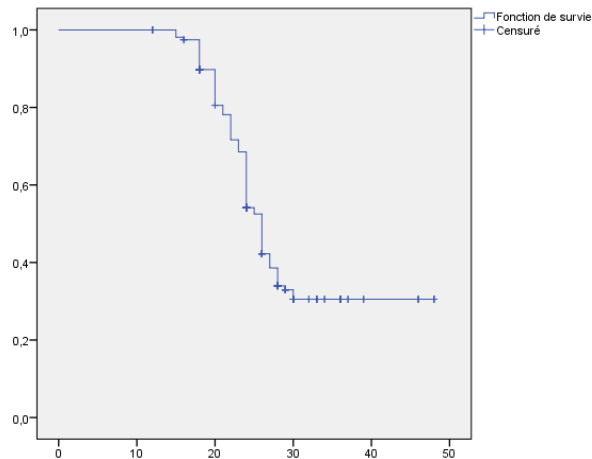


Figure 9 : Courbe de survie des RMS

3.4.2. Incidence des RMS selon les différentes variables

D'une manière générale, et pour toutes les variables, l'incidence des RMS augmentait avec la durée de traitement, en allant de 18 mois à 24 mois, puis à 36 mois. L'incidence des RMS augmentait de façon plus marquée entre 24 mois et 36 mois (12 mois d'intervalle) qu'entre 18 mois et 24 mois (6mois d'intervalle) (Tableau IV).

Tableau IV : Incidence des RMS selon le sexe, le type de dents, le type de traitement, le type de malocclusion, le diagnostic vertical, la présence de dysfonctions, de canine incluse et la morphologie radiculaire.

Variables	Incidence à 18 mois (%)	Incidence à 24 mois (%)	Incidence à 36 mois (%)
Sexe			
Masculin	15	37,7	75,2
Féminin	8,4	29	67,4
Type de dents			
Centrale	2,6	16,5	56,2
Latérale	6	46	82
Type de traitement			
Sans extractions	4	24	54
Avec extractions	2	38	80
Type de malocclusions			
Classe I DDM	2,8	28	67,6
Classe II	5,8	34,8	78
Classe III	18,7	32	50
Diagnostic vertical			
Normal	6	14	44
Supraclusie	3	35	76
Béance	16	49	80
Dysfonctions			
Non	9	22,4	61,2
Déglutition dysfonctionnelle	2,5	40	77,4
Canine incluse			
Non	3	34,4	71,6
Oui	5	12,5	55
Morphologie radiculaire			
Normale	0,6	22,3	68,6
Dysmorphie radiculaire	4,5	40,5	71,6

A 36 mois, l'incidence des RMS était plus importante chez le sexe masculin (75,2%), comparativement au sexe féminin (67.4%). Selon le type de dents, l'incidence des RMS était plus élevée pour l'incisive latérale (82,5%).

Pour les autres variables, l'incidence des RMS était également plus importante dans les cas avec extractions (80%), les malocclusions de classe II (78%), les cas de supraclusion (76%) et de béance (80%), les cas de déglutition dysfonctionnelle (77.4%) et de dysmorphie radiculaire (71.6%).

3.4.3. Les facteurs associés aux RMS

Tableau V : Les facteurs associés à la survenue de RMS en analyse univariée et multivariée.

Variables indépendantes	Analyse univariée			Analyse multivariée		
	HR	IC 95%	p	HR	IC 95%	p
Age	1	0,97-1,04	0,76			
Sexe						
Masculin	1			1		
Féminin	0,76	0,56 – 1,03	0,08	0,8	0,56-1,13	0,2
Type de dents						
Centrale	1			1		
Latérale	2,7	2,00-3,65	<0,001	3,2	2,3-4,5	<0,001**
Durée/traitement	1	0,97-1	0,35			
Type de traitement						
Sans extractions	1			1		
Avec extractions	1,8	1,79-1,32	<0,001	1,64	1,16-2,33	0,005*
Type/malocclusion						
Classe I DDM	1			1		
Classe II	1,33	0,97-1,84	0,07	1,13	0,8-1,6	0,4
Classe III	0,7	0,33-1,42	0,31	0,6	0,28-1,35	0,2
Diagnostic vertical						
Normal	1			1		
Supraclusie	2	1,32-2,86	<0,001	2,17	1,33-3,53	0,002*
Béance	2,77	1,80-4,26	<0,001	3,12	1,66-5,86	<0,001**
Dysfonctions						
Non	1			1		
Déglutition dysfonctionnelle	1,56	1,16-2,08	0,04	1,09	0,72-1,64	0,67
Canine incluse						
Non	1			1		
Oui	0,63	0,4-1,02	0,061	0,53	0,2-1,4	0,72
Morphologie radiculaire						
Normale	1			1		
Dysmorphie radiculaire	1,32	1,00-1,76	0,04	1,5	1,09-2,07	0,01*

** : p <0,001, * : p <0,05

En évaluant la contribution de chaque facteur indépendamment des autres par analyse univariée, les facteurs significativement associés au risque de survenue des RMS étaient: le type de dents avec un risque plus élevé pour l'incisive latérale ($p < 0.001$), les traitements avec extractions ($p < 0.001$), la supraclusion ($p < 0.001$) et la béance ($p < 0.001$), la déglutition dysfonctionnelle ($p < 0.05$) et la morphologie radiculaire anormale ($p < 0.05$).

L'analyse multivariée vise à étudier la contribution de tous les facteurs simultanément. Les variables introduites dans le modèle multivarié étaient associées de façon statistiquement significative ou avec un $p < 0,30$ en analyse univariée.

En analyse multivariée (Tableau V) et en ajustant sur toutes les variables, les facteurs qui étaient associés de façon statistiquement significative au risque de survenue des RMS étaient: le type de dents avec un risque plus élevé pour l'incisive latérale (HR=3.2 IC 95% [2,3-4,5] $p < 0.001$), les traitements avec extractions (HR=1.64 IC 95% [1.16-2.33] $p < 0.05$), la présence de supraclusion (HR=2.17 IC95% [1,33-3,53] $p < 0.05$) ou de béance (HR=3.12 IC 95% [1,66-5,86] $p < 0.001$) et la dysmorphie radiculaire (HR=1.5 IC 95% [1,09-2,07] $p < 0.05$) (Tableau VI).

Tableau VI : Récapitulatif des facteurs associés de façon statistiquement significative au risque de survenue des RMS.

Variabes	HR	IC 95%	p
L'incisive latérale	3.2	2.3-4.5	<0.001
Les traitements			
avec extractions	1.64	1.16-2.33	0.005
La supraclusion	2.17	1.33-3.53	0.002
La béance	3.12	1.66-5.86	<0.001
Les anomalies radiculaires	1.5	1.09-2.07	0.01

Dans notre étude, le risque de survenue des RMS augmentait de:

- 3 fois plus pour l'incisive latérale (IC 95% [2,3-4,5] $p < 0.001$).
- 1.64 fois plus dans les cas avec extractions (IC 95% [1.16-2.33] $p < 0.05$).
- 2 fois plus dans les cas de supraclusion (IC95% [1,33-3,53] $p < 0.05$).
- 3 fois plus dans les cas de béance (IC 95% [1,66-5,86] $p < 0.001$).
- 1.5 fois plus dans les cas avec anomalies radiculaires (IC 95% [1,09-2,07] $p < 0.05$).

4. Discussion

4.1. Les limites de l'étude:

Dans la réalisation du présent travail, nous avons été confrontés à certaines limites, relatives au caractère rétrospectif de l'étude. Ces limites étaient principalement en rapport avec le recueil des données et l'outil utilisé pour l'évaluation des résorptions radiculaires.

4.1.1. Le recueil des données:

Le recueil des données étudiées est réalisé en se référant aux dossiers cliniques des patients traités au sein de notre service, certaines variables, comme celles introduites dans l'étude (l'âge, le sexe, la durée de traitement globale, le type de malocclusion...etc) étaient facilement recueillies, puisqu'elles font partie des fiches diagnostiques et thérapeutiques des dossiers cliniques. Cependant, certaines données, principalement thérapeutiques, ne figuraient pas dans ces fiches. Ces données sont en rapport avec:

- * Le type de brackets utilisés.
- * La technique utilisée: edgwise standard ou arc droit.
- * La séquence d'arcs utilisée.
- * La mécanique utilisée lors des différentes phases de traitement particulièrement lors de la rétraction incisive.
- * L'utilisation ou non des élastiques intermaxillaires.

La difficulté de recueillir ces données avec précision chez tous les patients, particulièrement ceux qui sont très anciens, nous a contrarié à étudier l'influence des facteurs mécaniques dans la survenue des résorptions radiculaires après traitement orthodontique dans notre échantillon.

4.1.2. Le moyen d'évaluation des résorptions radiculaires :

Notre étude, étant rétrospective, le seul moyen à notre disposition pour l'étude des résorptions radiculaires était la radiographie panoramique, qui fait partie du bilan radiologique standard prescrit au début, au cours et à la fin de traitement. Cette technique présente certains inconvénients:

- * Distorsion et erreurs de superpositions entre les radiographies, particulièrement dans la région incisive, qui fait l'objet de notre étude.

- * Evaluation non mesuratrice de la longueur radiculaire: l'évaluation de la résorption radiculaire se fait en se basant sur des scores ou des degrés de sévérité, comme les scores de Levander et Malmgren [11], souvent utilisés avec cette technique, qui traduisent le changement du contour radiculaire parallèlement à la progression du processus de résorption.

Dans ce sens, d'autres techniques, qui permettent une mensuration en millimètres du raccourcissement de la longueur radiculaire, pourraient être utilisées, comme:

- * **La téléradiographie de profil:** la standardisation et l'agrandissement théoriquement nul que présente cette radiographie permettent aussi bien la mensuration en millimètres de la longueur radiculaire, ainsi que la superposition de deux téléradiographies du début et de fin de traitement. Cependant, cette technique serait limitée à l'étude de l'incisive centrale maxillaire et/ ou mandibulaire uniquement, et en l'absence d'encombrement important diminuant la netteté de l'extrémité apicale [21].
- * **Le bilan rétro-alvéolaire en technique des plans parallèles:** cette technique ne présente pas de distorsion avec un faible taux d'agrandissement, permettant une évaluation plus précise du changement du contour radiculaire au niveau du tiers apical, avec une mensuration en millimètres plus aisée de la longueur radiculaire [4,15,16]. Cependant, c'est une technique qui nécessite une irradiation supplémentaire, en effet, un bilan radiologique rétro-alvéolaire complet réalisé régulièrement, en moyenne tous les 6 à 9 mois, ne fait pas toujours partie du dossier clinique du patient. Par ailleurs, ce bilan est le plus souvent réalisé dans le cadre d'études prospectives.
- * **Etude tridimensionnelle des résorptions:** par utilisation du Dentascan ou l'imagerie Cône Beam, qui montrent avec précision le degré de résorption des racines en termes de largeur et de profondeur et les faces qui sont plus affectées [4,15,16].

Cette différence de la méthode d'évaluation, selon l'outil radiologique utilisé pour l'étude de la résorption radiculaire, ne semblait pas être un facteur limitant les possibilités de comparaison de nos résultats avec ceux des autres études. En effet, dans notre étude, nous avons opté pour des scores de la classification de Levander et Malmgren (1998) [11], dans une étude précédente [101], la même méthode a été utilisée; les résultats en termes de prévalence et de sévérité des résorptions, étaient similaires à d'autres études [7,8] ayant utilisé la radiographie péri-apicale.

4.2. La comparaison des résultats avec les études précédentes:

Notre étude a concerné les incisives maxillaires, considérées comme étant les dents les plus susceptibles aux résorptions radiculaires après traitement orthodontique. Lupi et coll. [102] ont rapporté une fréquence des résorptions radiculaires après traitement orthodontique de 73% au niveau des incisives maxillaires, alors qu'elle n'était que de 34.7% au niveau des autres dents.

La fréquence des résorptions radiculaires dans notre échantillon était de 95%, dont 19% étaient des résorptions sévères. Les données de la littérature confirmaient ce constat en rapportant une fréquence des résorptions au niveau des incisives maxillaires de 73% à 98%, dont 2 à 17.2% étaient des résorptions sévères [1,66,102].

Nous avons cerné notre étude aux résorptions modérées à sévères qui représentent 59.5% dans notre échantillon. En termes d'incidence, 10% de ces RMS survenaient à 18 mois, 31% à 24 mois, alors que 70% des RMS survenaient à partir de 36 mois. D'autres études précédentes [10,16,20] étaient en accord avec ce constat, en estimant que la sévérité des résorptions augmentait après 18 mois de traitement, le risque le plus élevé des RMS a été enregistré après 33 mois à 38 mois de traitement.

Plusieurs études précédentes ont étudié la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique et les facteurs qui lui sont associées, la comparaison des résultats de ces études avec ceux de la présente étude a été présentée dans le tableau VII.

4.2.1. Sexe et âge :

Notre étude a montré que l'incidence des RMS était plus élevée chez les hommes (75.2% à 36 mois) que chez les femmes (67.4% à 36 mois), bien que cette différence n'était pas statistiquement significative. Comme dans la plupart des études précédentes [4-7,11,12,16,60], le sexe ne semblerait pas être un facteur de risque associé à la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique.

De même que la plupart des études antérieures [4-6,10,11,60], l'âge au début du traitement n'était pas également associé au risque de survenue des résorptions modérées à sévères ($p>0.05$), d'autres études [7,12,16] ont prouvé une association significative avec une susceptibilité plus élevée aux résorptions chez le sujet adulte, qui pourrait être expliquée par les changements physiologiques au niveau du ligament parodontal qui devient moins vascularisé et plus dense.

Cependant, Mavragani et coll. [58], ainsi que Maués et coll. [18] ont montré que l'âge chronologique ne serait pas un facteur associé à la sévérité des résorptions, mais plutôt le degré de maturité de l'apex. En effet, les dents immatures, bien qu'elles n'atteignent leur longueur radiculaire normale, continuent leur édification radiculaire avec une résistance biologique au processus de résorption, les dents ayant achevé leur édification radiculaires exprimeraient donc plus de résorptions sévères que les dents à apex béant. Par contre, des sujets à différentes tranches d'âge mais avec le même de degré de maturité de l'apex, pourraient ne pas avoir de différence concernant la sévérité de la résorption radiculaire.

4.2.2. Le type de dents:

A l'instar des études précédentes [7,9], l'incisive latérale était plus touchée par les résorptions modérées à sévères, avec 3 fois plus de risque que l'incisive centrale (HR=3.2 IC 95% [2,3-4,5] $p<0.001$). Ceci serait expliqué par la prédominance élevée et statistiquement significative ($p<0.001$) d'anomalies radiculaires, essentiellement des racines courtes et des apex coudés ou grêles au niveau de l'incisive latérale comparativement à l'incisive centrale (Tableau II), or, comme la présente étude, toutes les études précédentes [7,9,11,15,16,60] avaient montré une susceptibilité plus élevée aux résorptions sévères dans les cas d'anomalies radiculaires.

4.2.3. La durée de traitement:

A l'instar de la grande majorité des études précédentes [4,6,10,11,13,15,16], notre étude a montré que la sévérité des résorptions augmentait avec la durée de traitement, bien que cette association n'était pas statistiquement significative en analyse multivariée.

D'après Baumrind et coll. [10], chaque année de traitement multi-attaches augmenterait de 0.38 mm la quantité de résorption au niveau de l'extrémité apicale. Cependant, selon Mavragani et coll. [12] et Mirabella et coll. [9], la durée de traitement n'était pas un facteur associé au risque de survenue des résorptions sévères après traitement orthodontique.

Long D Tieu et coll. [4], à partir de leur revue systématique, ont montré que même lorsque les deux facteurs sont associés, l'association entre la durée de traitement et la sévérité des résorptions est le plus souvent faible ou modérée.

Tableau VII : Comparaison des facteurs associés à la sévérité des résorptions radiculaires entre les études précédentes et la présente étude.

Auteurs	Sexe	Age	Durée	Extractions	malocclusion	Supraclusie	Béance	Déglutition Dysfonctionnelle	Morphologie radiculaire
Linge 1991 [5]	Non	Non	-	-	-	Non	Oui	Oui	-
Mirabella 1995 [9]	-	-	Non	-	Non	Non	Oui	-	racines courtes++
Baumrind 1996 [10]	Hommes ++	Non	Oui	Non	Non	Non	-	-	-
Levander (1998) [11]	Non	Non	Oui	-	-	-	-	-	Apex émoussés ++
Mavragani (2000) [12]	Non	Oui	Non	-	-	Non	-	Non	Non
Sameshima (2001)[7,8]	Non	Adulte>jeune	-	-	-	Non	-	-	Apex coudés/pointus++
Brin (2003)[13]	-	-	Oui	-	Classe II Div1>classe I	-	-	-	-
Nishioka (2006) [14]	-	-	-	Non	-	-	-	Non	Oui: anomalie radiculaire
Mohandesan (2007) [15]	Femmes ++	-	Oui	Oui	-	-	-	-	-
Ruo-ping (2010) [6]	Non	-	Oui	Oui	-	-	-	-	-
Nanekrungsan (2012) [16]	Non	Adulte>jeune	Oui	Oui	Non	Non	-	Non	apex pointus/coudés++
Motokawa (2013) [17]	Non	Non	Non	Non	Non	-	-	-	Oui: anomalie radiculaire
Long D Tieu (2014) [4]	Non	Non	Oui	Oui	-	-	-	-	-
Maués (2015) [18]	Non	-	Oui	Oui	Classe II overjet>5mm	Non	Non	-	Non
Lee et Lee (2016) [103]	Non	Adulte>jeune	Oui	Oui	-	-	-	-	-
Linkous (2020) [104]	Non	Non	Non	Oui	-	-	-	-	-
Présente étude	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Racines courtes+++

Dans ce sens, du moment que le plus grand nombre des études s'intéressait à l'étude des résorptions radiculaires au niveau des incisives maxillaires, Segal et coll. [88], ont stipulé qu'il serait plus pertinent de déterminer la durée du traitement actif au niveau du bloc incisif et d'étudier son association au risque de survenue de résorptions modérées ou sévères au niveau de ce groupe de dents, en effet, l'appareillage pourrait être en place sans être réellement actif au niveau des incisives, d'autre part, la durée de traitement globale pourrait être rallongée à tort, en raison des manques de rendez-vous, ou la variation, selon les cliniciens, de l'intervalle de temps entre les activations.

La durée du traitement pourrait être aussi rallongée selon le matériau des brackets utilisés, pour cela, Lopatiene et coll. [50] ont montré que les brackets en céramique causaient plus de résorptions que les brackets métalliques, une constatation qui serait imputable à la durée de traitement généralement plus longue avec des brackets en céramique, comparativement aux brackets métalliques.

4.2.4. Les extractions

Dans notre étude, on a constaté que les cas avec extractions de prémolaires présentaient plus de RMS que les cas sans extractions (HR=1.64 IC 95% [1.16-2.33] p<0.05) p<0.001). Ces résultats confirmaient ceux des études précédentes [4,6,15,16]. Cependant Baumrind et coll. [10] ainsi que Nishioka et coll. [14] n'ont pas mis en évidence une association statistiquement significative entre les extractions et la sévérité des résorptions.

L'extraction de prémolaires augmenterait l'amplitude de déplacement au niveau des incisives dans les cas de proalvéolie avec repositionnement. D'après Liou E. et coll. [105] et Tieu LD et coll. [4], c'est la quantité du déplacement antéro-postérieur de l'apex qui serait associée à la sévérité des résorptions, selon les mêmes auteurs, ce risque augmentait dans les cas de repositionnement incisif avec un over-jet>5mm. Dans une étude plus récente de Kreich et coll. [106], le traitement avec extractions de prémolaires, était parmi tous les autres facteurs de risque, le seul associé à la sévérité des résorptions après traitement orthodontique.

4.2.5. Le type de malocclusion:

Dans notre étude, bien que l'incidence des résorptions modérées à sévères était plus élevée dans les cas de classe II et classe III occlusales comparativement aux cas de classe I DDM, à 18 mois et à 24 mois. Le type de malocclusion au début de traitement n'était pas un facteur associé à la sévérité des résorptions à la fin de traitement en analyse multivariée.

Les données de la littérature concernant l'influence du type de malocclusion sur la sévérité des résorptions sont controversées:

a) Classe II d'Angle:

Kaley et coll. [107] ont estimé que les malocclusions de classe II division 1 pourraient augmenter jusqu'à 20 fois le risque de résorptions sévères au niveau des incisives maxillaires, si leurs racines ont été forcées contre la corticale. Ces résorptions sont plus susceptibles de se produire dans les cas de camouflages orthodontiques des grands décalages squelettiques de classes II qui relèvent de la chirurgie orthognatique. En effet, ces grands décalages squelettiques impliquent des déplacements apicaux importants qui préparent au développement des résorptions. En accord avec ce constat, Nanekrunsan et coll. [16] ont montré que la sévérité des résorptions augmentait dans les cas de classe II division 1 où l'over-jet était supérieur à 5 mm, le même résultat a été ultérieurement prouvé par Maués et coll. [18].

Par ailleurs, Linge et Linge [5], ont montré que l'over-jet pourrait être considéré comme un facteur de risque associé à la sévérité des résorptions dans les cas de classe II division 1, mais qui reste dépendant du traitement préconisé pour le corriger, dans ce sens, les résultats de leur étude ont montré que les patients traités par activateurs n'ont pas développé plus de résorptions que le groupe contrôle. Cependant, les patients traités par un appareillage multi-attache fixe, des élastiques de classe II et des arcs rectangulaires entraînant un torque actif, ont eu plus de résorptions en termes de prévalence et de sévérité. Ces appareillages ont été considérés eux-mêmes comme des facteurs de risque et non pas le type de malocclusion.

Toutefois, Tieu LD et coll. [4], dans leur revue systématique, ont conclu que quel que soit la thérapeutique utilisée pour le traitement de la classe II division 1 et le surplomb incisif qui lui est associée: activateurs, appareillages fixes, élastiques de classe II, technique edgewise ou arc droit, minivis...approximativement le même risque et la même sévérité des résorptions des incisives maxillaires ont été rapportés. D'autre part, ces thérapeutiques pourraient produire le même degré de résorption quel que soit le type de malocclusion.

D'après ces résultats, il semblerait que l'étiologie des résorptions radiculaires après traitement orthodontique est complexe et que plusieurs facteurs relatifs au sujet lui-même et à la thérapeutique, contribuent de manière synergique à leur genèse.

b) Classe III d'Angle:

Dans l'étude de Kaley et coll. [107], les patients en classe III d'Angle avaient plus de résorptions après traitement orthodontique que le groupe contrôle. L'hypothèse avancée pour expliquer ce résultat concernait l'inclinaison des incisives maxillaires pendant le traitement orthodontique qui subissent un mouvement de vestibulo-version pour établir la clé incisive, ce qui pourrait entraîner une pression des apex radiculaires contre la corticale osseuse palatine. Or, cette configuration a été considérée comme une situation à risque.

Contrairement à eux, Horiuchi A et coll. [92], n'ont pas établi une association entre la classe III occlusale et le risque de résorptions sévères.

4.2.6. Le recouvrement incisif:

a) La supraclusie

Contrairement à la plupart des études [5,7,9,10,12,16] qui ont évalué la supraclusie, et qui n'ont pas rapporté d'association statistiquement significative entre ce facteur et la sévérité des résorptions au niveau des incisives maxillaires, les résultats de notre étude ont montré que plus de RMS survenaient dans les cas présentant un recouvrement exagéré que dans les cas avec recouvrement normal (HR=2.17 IC95% [1,33-3,53] $p < 0.05$), la sévérité des résorptions dans notre échantillon augmentait de 2 fois dans les cas de supraclusie au début de traitement, comparativement aux cas avec recouvrement normal. Ce résultat pourrait être expliqué par l'utilisation de forces d'ingression, qui d'après Han et coll. [93], augmenteraient 4 fois plus la superficie de la zone résorbée au niveau de l'apex, aggravant ainsi la sévérité des résorptions.

De même, Martins et coll. [91] ont montré que les patients avec supraclusie incisive traités par une mécanique d'ingression combinée à la rétraction incisive, avaient plus de risque de résorptions sévères que ceux traités sans avoir recours à une mécanique d'ingression. Une mécanique d'ingression, associée au torque incisif, sont souvent nécessaires pour la levée de la supraclusie et la rétraction des incisives maxillaires, or ce sont deux mouvements à risque, qui augmenteraient le risque de résorption sévères au niveau de ces dents.

Ce résultat a été démontré dans l'étude prospective de Linkous et coll. [104], dont le but était d'étudier les mouvements orthodontiques susceptibles de causer plus de résorptions radiculaires apicales au niveau de chaque incisive. L'analyse de régression linéaire multiple a produit des modèles fortement prédictifs ($R^2 = 77\% - 86\%$). Toutes les directions de mouvements testées des incisives (antéro-postérieure, mésio-distale, verticale d'ingression ou d'égression,

torque) augmenteraient le risque de résorptions selon un mode dose-réponse. Cependant, le mouvement d'ingression était le plus dommageable pour les racines.

Dans le même sens et afin d'étudier l'impact du mouvement d'ingression, Belliri-Pereira et coll. [108] dans leur méta-analyse ont quantifié le degré de résorption radiculaire suite au mouvement d'ingression orthodontique et les facteurs thérapeutiques qui y contribuent.

L'analyse quantitative menée à partir de 7 études, a montré que, après un mouvement d'ingression antérieure, une moyenne de 0,72 mm de résorption radiculaire externe (IC 95% :0,16-1,28) ($p<0,01$) pourrait être attendue au niveau de chaque incisive maxillaire. Un résultat qui coordonne avec des méta-analyses précédentes [109,110] qui reportaient une moyenne de 0,80 à 0,86 mm de résorption au niveau de la zone incisive.

Concernant la mécanique utilisée, les résultats ont montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre l'utilisation d'arcs continus ou avec des boucles et des mini-vis, bien qu'une légère augmentation de la quantité de résorption ait été notée avec l'utilisation de mini-vis en ancrage direct avec des chaînettes. Ceci a été expliqué par l'utilisation de la même force d'intrusion qui allait de 40 à 60 g quel que soit la mécanique déployée [108].

Par ailleurs, la durée d'intrusion, qui ne dépassait pas 12 mois selon les différentes études, n'avait pas d'incidence significative sur le degré de résorption. Une donnée à prendre avec précaution selon les auteurs puisque les études introduites dans l'analyse quantitative n'ont évalué que la durée durant laquelle l'intrusion a été réalisée et qui ne représente qu'une partie de la durée globale du traitement, or si l'incidence de cette dernière a été évaluée, probablement l'amplitude et la sévérité des résorptions augmenteraient avec la durée du traitement, comme ce qui a été relevé dans notre étude.

b) La béance

Les résultats de notre étude ont également montré que les cas de béance antérieure présentaient plus de RMS que les cas avec recouvrement normal (HR=3.12 IC 95% [1,66-5,86] $p<0.001$). Plusieurs études [5,9,111,112] ont préalablement relaté une association statistiquement significative entre la béance antérieure et la sévérité des résorptions au niveau des incisives maxillaires. Différents arguments ont été évoqués pour expliquer ce résultat, Linge et Linge [5] et Harris et coll. [111], ont mis en cause le mouvement de va et vient (jiggling) causé par la force orthodontique pour déplacer la dent dans le sens de la fermeture de la béance et la pression de la langue en direction opposée. D'autre part, Tanaka et coll. [113] ainsi que Sringskarnboriboon et coll. [114] ont montré que la réduction de la fonction occlusale dans les

cas de béance, préluait à l'atrophie du ligament parodontal qui devient hypofonctionnel, avec une faible résistance aux stimuli externes, augmentant ainsi le risque de résorptions sévères.

4.2.7. La morphologie radiculaire:

Les résorptions radiculaires après traitement orthodontique, étant le plus souvent situées dans l'extrémité apicale, toute dysmorphie radiculaire au niveau de cette zone augmenterait la susceptibilité de la racine aux résorptions. Les résultats de notre étude ont montré que le risque de survenue des RMS était plus important dans les cas avec anomalies radiculaires (HR=1.5 IC 95% [1,09-2,07] $p < 0.05$). Ce résultat est en accord avec celui de plusieurs études précédentes [7,9,11,15,16,60]. Nigul et coll. [115] ont estimé ce risque à 3, et dans d'autres études [7,16], la sévérité des résorptions augmentait dans le cas des racines coudées ou grêles. Les racines coudées nécessitent plus de force pour les déplacer ou les torquer, alors qu'en cas de racines grêles ou courtes, la force de tipping ou de torque est distribuée sur une surface étroite de l'apex, ce qui augmenterait les zones de pression au niveau de cette zone [7,16]. Par ailleurs, Sameshima et coll. [7] estimaient que les apex émoussés avaient moins de risque de résorptions sévères comparativement aux racines courtes, coudées ou grêles.

Les études qui se sont focalisées sur les résorptions radiculaires induites par les traitements orthodontiques fixes et les facteurs qui leur sont associées sont nombreuses avec des méthodologies différentes et des résultats variables qui limitent les possibilités de comparaison entre les études et la déduction de directives qui guideraient notre pratique clinique. Raison pour laquelle les auteurs actuellement s'intéressent plus à la réalisation de revues systématiques et de méta-analyses afin d'évaluer la méthodologie des études incluses et le niveau de preuve des conclusions émises.

Dans ce sens, Deng et coll. [110] ont mené leur méta-analyse qui évaluait la résorption radiculaire après traitement orthodontique en introduisant les études utilisant l'imagerie Cône Beam comme outil d'évaluation. Les résultats de l'analyse quantitative ont montré que la longueur radiculaire après traitement orthodontique était constamment et significativement plus courte que la longueur avant traitement (MD = 0.80, 95% CI 0.56, 1.03, $P < 0.00001$).

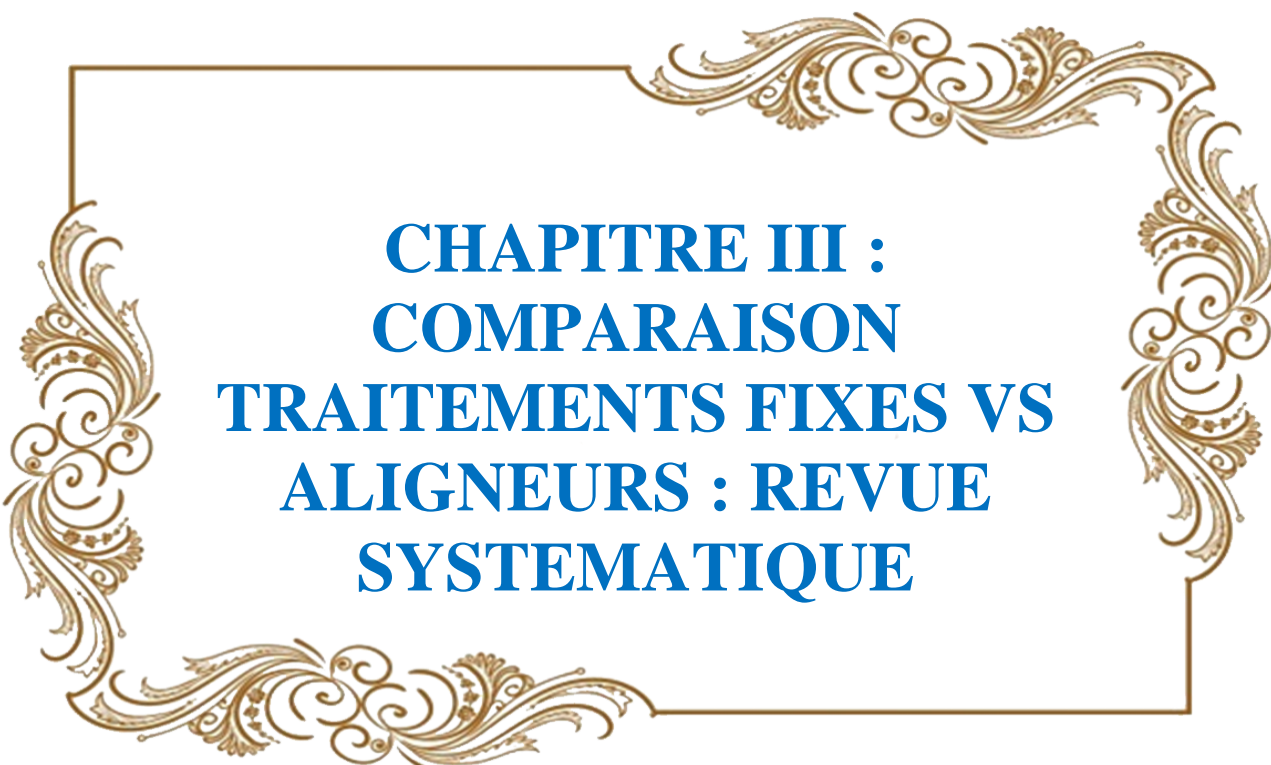
Les dents les plus touchées par les résorptions étaient les incisives latérales maxillaires suivies des incisives centrales maxillaires ensuite les incisives centrales mandibulaires et enfin les canines maxillaires. L'analyse a également montré que le groupe avec extractions présentait plus de résorptions. Les auteurs ont conclu que les études utilisant l'imagerie Cône Beam étaient plus précises en termes d'évaluation mais moins rigoureuses de point de vue méthodologique

par la prédominance des facteurs de confusion.

La même constatation a été ultérieurement émise par Currell et coll. [116] dans leur revue systématique qui a mis le point sur le faible niveau de preuve des études préalablement publiées qui évaluaient la résorption radiculaire suite aux traitements multi-attaches fixes. D'après les auteurs, les principaux points faibles de point de vue méthodologique étaient l'absence de groupe contrôle, une stratégie de randomisation inappropriée et des examens inadéquats avant et après traitement.

Récemment et d'un autre côté, Yassir et coll. [117] ont évalué le niveau de preuve de toutes les revues systématiques préalablement réalisées jusqu'au là pour étudier les résorptions radiculaires suite au traitement orthodontique. 20 revues systématiques, qui présentaient un niveau de preuve qualifié de modéré à élevé ont été retenues et leurs conclusions ont attribué les résorptions radiculaires après traitement orthodontique fixe à l'usage des forces lourdes, des forces d'intrusion et des mouvements de torque. Une longue durée de traitement et particulièrement les traitements avec extractions qui nécessitent des déplacements apicaux importants des incisives maxillaires étaient également des facteurs les plus incriminés dans la survenue et la sévérité des résorptions. Cependant, il n'y avait pas suffisamment de preuves concernant la plupart des autres facteurs relatifs au traitement et au patient.

Les auteurs ont conclu que à la lumière du nombre limité des études avec un haut niveau de preuves, les données actuelles suggèrent que l'influence du traitement orthodontique fixe sur la survenue des résorptions radiculaires a été démontrée, bien que la relation cause à effet entre la biomécanique orthodontique et le phénomène de résorption n'est pas encore entièrement élucidée. La meilleure attitude préventive serait d'éviter les forces lourdes et continues et les déplacements apicaux importants sur une longue durée de traitement. Avec toutes ces précautions et en cas de survenue des résorptions au cours du traitement orthodontique, toutes les études recommandent la suspension temporaire du traitement avec le suivi régulier du patient [117].



**CHAPITRE III :
COMPARAISON
TRAITEMENTS FIXES VS
ALIGNEURS : REVUE
SYSTEMATIQUE**

1. Introduction:

A l'instar de la présente étude, la plupart des études précédentes [4-18] ont évalué l'incidence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des appareillages fixes et les facteurs qui leur sont associées. Quant au traitement orthodontique par des gouttières thermoplastiques ou aligneurs, peu d'études [118-121] se sont intéressées à l'évaluation de cette association. La plupart des travaux étaient des revues de littérature [122-131] ou des rapports de cas [132-136], qui évaluaient l'efficacité et les bénéfices en termes d'esthétique et de confort de ces gouttières orthodontiques dans le traitement des malocclusions par rapport aux techniques fixes. Ce qui nous a amené à réaliser une revue systématique, dont le but était d'évaluer d'une part l'association entre le traitement orthodontique par des gouttières et le risque de survenue des résorptions radiculaires, et d'autre part de comparer l'incidence et la sévérité de ces résorptions avec celles générées par des appareillages multi-attaches fixes.

2. Matériels et méthodes:

La recherche électronique des articles faisant l'objet de la présente revue systématique s'est effectuée à travers les bases de données MEDLINE, PUBMED, EMBASE, EBSCO HOST, COCHRANE LIBRARY et SCIENCE DIRECT. Nous avons limité notre recherche aux articles en français et en anglais. Nous avons utilisé les mots clés présents dans le MeSH pour les articles en anglais, selon l'équation de recherche [root resorption AND orthodontic aligners]. Pour les articles en français, nous avons utilisé l'équation [résorption radiculaire et gouttière orthodontique]. Une première sélection des articles a été basée sur la lecture du titre et de l'abstract. Nous avons également effectué une recherche manuelle pour identifier d'autres articles pouvant être inclus dans la revue systématique.

Les critères d'inclusion et d'exclusion

Les critères d'inclusion:

Nous avons inclus les études répondant à la fois à tous les critères ci-dessous:

- les études publiées jusqu'à décembre 2021;
- les études réalisées sur les humains, les essais contrôlés randomisés et non randomisés, les études cas témoins, les études de cohorte, et les études prospectives et rétrospectives;
- les études concernant le traitement orthodontique chez l'adulte ;
- les études évaluant l'incidence et/ou la prévalence et la sévérité des résorptions associées aux gouttières orthodontiques uniquement ou en comparaison avec le traitement multi-attache fixe.

Les critères d'exclusion:

Nous avons exclu toutes les publications portant sur :

- les études sur les animaux;
- les rapports de cas;
- les revues de littérature;
- les études avec questionnaires;
- les études évaluant les résorptions associées aux traitements multi-attache seulement;
- les études comparatives entre le traitement multi-attache fixe et le traitement par des gouttières, qui n'évaluaient pas la résorption radiculaire à la fin du traitement.

3. Résultats:

3.1. Résultats de la recherche bibliographique

En se basant sur les mots clés, 93 articles en totalité étaient éligibles à notre recherche. A la lecture des titres et des abstracts et en considérant les critères d'inclusion et d'exclusion, 48 références étaient exclues parce qu'il s'agissait d'articles d'opinion, des rapports de cas, des études intéressant les appareillages fixes uniquement, et des revues de littérature. Huit références, après évaluation du texte intégral, ont été retenues pour la présente revue systématique (fig.10).

3.2. Caractéristiques des études

Les caractéristiques des études incluses dans la présente revue systématique sont détaillées dans les tableaux IX et X. 4 études ont évalué la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières uniquement et 4 études ont comparé ces deux paramètres entre le traitement orthodontique par des gouttières et le traitement orthodontique multi-attache fixe.

4 études étaient des évaluations prospectives ou rétrospectives, 2 autres étaient des études de cohorte et 2 études étaient des essais randomisés dont un essai contrôlé randomisé prospectif à bouche fendue et un essai randomisé en deux groupes parallèles.

La plupart des études ont évalué les résorptions radiculaires au niveau des dents antérieures particulièrement les incisives maxillaires et mandibulaires, deux études ont étendu l'évaluation aux premières prémolaires et molaires et une seule étude a pris comme échantillon les premières prémolaires maxillaires uniquement.

Pour quantifier la résorption radiculaire, la plupart des études ont utilisé la différence en millimètres de la longueur radiculaire entre le début et la fin de traitement, deux études ont utilisé le ratio racine-couronne et une seule étude a utilisé le volume radiculaire en mm³ et en %. La plupart des mesures ont été effectuées sur les images CBCT, deux études ont utilisé la radiographie panoramique et une seule étude s'est basée sur les mesures réalisées à partir des radiographies péri-apicales.

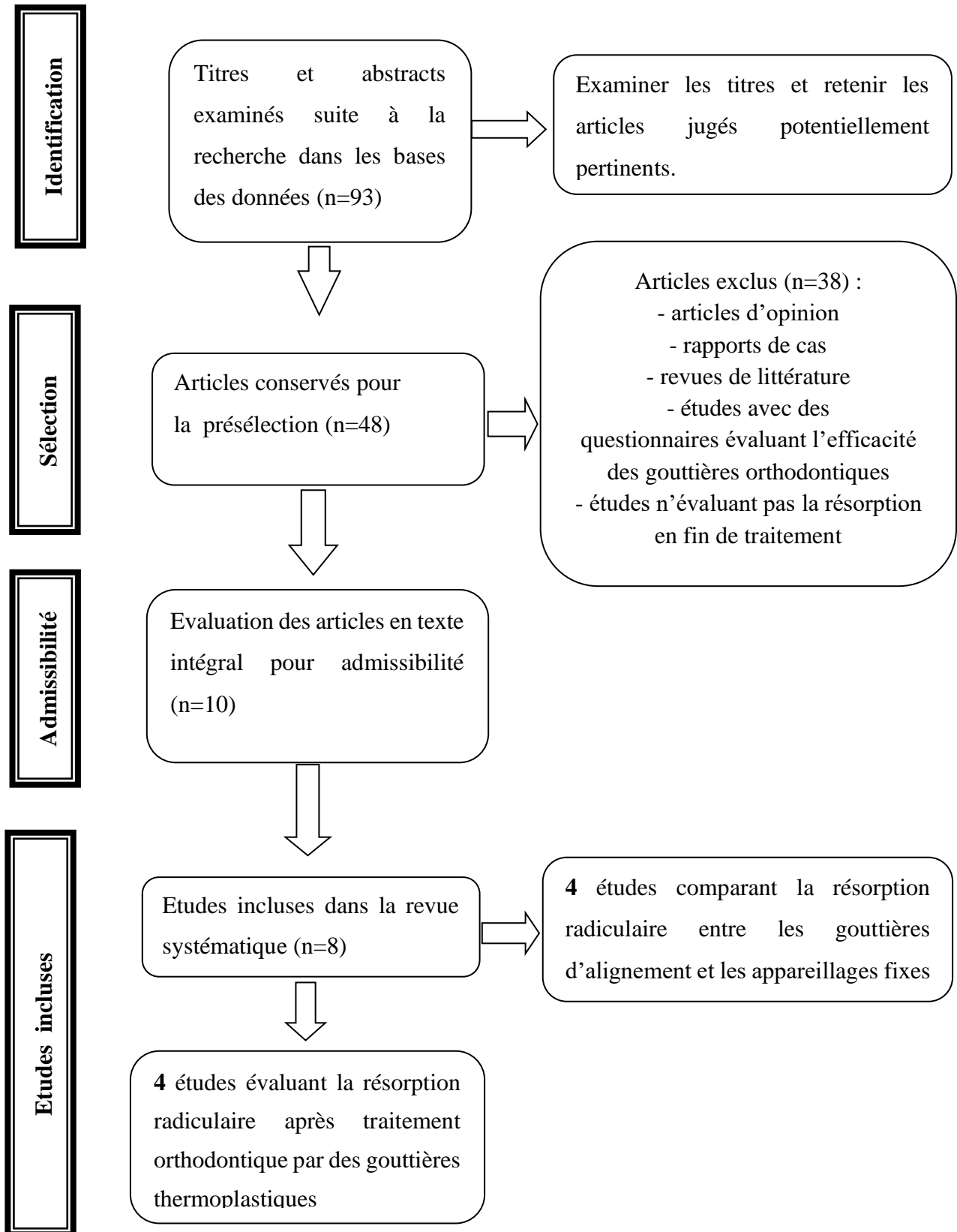


















































Figure 10 : Diagramme de flux pour l'identification des études incluses dans la revue systématique

3.3. Risque de biais et évaluation de la qualité des études:

Les résultats de notre recherche ont montré que deux essais randomisés uniquement ont répondu à nos critères d'inclusion et d'exclusion. Afin de vérifier la validité des études non randomisées éligibles à notre recherche, nous avons utilisé l'indice méthodologique pour les études non randomisées (MINORS) afin d'évaluer le risque de biais [143]. Cela consistait à examiner l'exactitude des objectifs, l'adéquation de la dissimulation de l'affectation des sujets aux groupes de l'étude, la mise en aveugle des patients, les collecteurs des données, l'évaluation des résultats, l'étendue de la perte de suivi (c'est-à-dire la proportion de patients chez qui les évaluateurs n'ont pas été en mesure de déterminer les résultats) et le calcul prospectif de la taille de l'échantillon. Nous avons inclus huit événements dans l'évaluation du risque de biais et un taux d'événements plus élevé nous permet de donner une estimation plus précise de l'influence des déterminants étudiés. L'événement est noté 0 s'il n'est pas signalé; 1 lorsqu'il est signalé mais insuffisant; et 2 lorsqu'il est signalé et adéquat.

L'évaluation de la qualité des études non randomisées incluses dans la présente revue systématique est présentée dans le tableau VIII.

Tableau VIII : Évaluation du risque de biais des études incluses à l'aide de l'indice méthodologique pour les études non randomisées (MINORS)

MINORS	Année	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
Auteurs										
Krieger et coll	2013									12
Gay et coll	2017									13
Farouk et coll	2018									15
Liu et coll	2021									16
Elissa et coll	2018									15
Li et coll	2020									15

Les éléments de 1 à 8 représentent :

- 1: un objectif clairement énoncé
- 2: inclusion de patients consécutifs
- 3: collecte prospective des données
- 4: critères d'évaluation appropriés au but de l'étude
- 5: appréciation impartiale du critère d'évaluation de l'étude
- 6: période de suivi appropriée au but de l'étude
- 7: perte de suivi inférieure à 5 %
- 8: calcul prospectif de la taille de l'étude

Un élément noté 0 signifie qu'il n'a pas été mentionné (rouge), 1 signifie qu'il a été signalé mais il est inadéquat (jaune) et 2 signifie qu'il a été rapporté et est adéquat (bleu). Le total des scores était de 16 pour les études auto-contrôlées.

Tableau IX : Études évaluant la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières

Etude	Type d'étude	Population	Intervention	Outil d'évaluation	Comparaison	Résultats
Krieger (2013)[118]	Etude rétrospective	100 patients 1600 dents Classe I encombrement antérieur <8mm Age: 17-75 ans	Gouttières Invisalign® TTT sans extractions Durée: 19,8 mois	Radiographie panoramique Dents antérieures sup et inf Les 1ères molaires sup et inf	Ratio racine-couronne entre début et fin de traitement	Résorptions/fin de traitement: 46 % des dents Sévérité: réduction de la longueur radiculaire Légères < 10%: 27,75% Modérées 10% à 20%:11,94% Sévères >20%: 6,31%
Gay (2017)[137]	Etude prospective	100 patients 1083 dents Classe I encombrement <6mm Age: 32,8±12,7 ans	Gouttières Invisalign® TTT sans extractions Durée:14 mois	Radiographie panoramique Dents antérieures sup et inf 1ères PM sup Les 1ères molaires	Ratio racine-couronne entre début et fin de traitement	Résorptions /fin de traitement: 41,81% des dents Sévérité: réduction de la longueur radiculaire Légères < 10%: 25,94% Modérées 10% à 20%: 12,8% Sévères >: 20%: 3,69%
Farouk (2018) [138]	Etude rétrospective	15 patients Classe I Encombrement 3-5mm Age:26±11 ans	Gouttières Invisalign Smart Track® TTT sans extractions Durée: 12 mois	Imagerie Cône Beam Incisives maxillaires	Différence en mm de la longueur radiculaire entre début (T1) et fin de traitement (T2)	Diminution significative de la longueur radiculaire entre T1 et T2 Sévérité: 12: 0.36±0.32 mm 11: 0.51±0.43 mm 21: 0.45±0.36 mm 22: 0.44±0.3 mm

Liu (2021)[139]	Etude rétrospective	40 patients Classe II 320 incisives	Gouttières Invisalign® TTTavec/sans extractions entre 2015 et 2019	Imagerie Cône Beam Analyse des Incisives	Volume radiculaire en mm ³ et en % entre début et fin de traitement	Résorptions /fin de TTT: 100% des dents Réduction significative du volume radiculaire (11,48 ± 6,70 mm ³) Sévérité: réduction de la longueur radiculaire Légères < 10%: 70,93% Modérées 10% à 20%:28,43% Sévères >20%: 0,62% Facteurs de risque : régression linéaire multiple -position sagittale des racines en fin de TTT: en contact des corticales/ en dehors de la corticale vestibulaire Type de dents: les incisives maxillaires Type de traitement: avec extractions Type de mouvement: intrusion/extrusion
-----------------	---------------------	---	---	---	---	--

Tableau X : Etudes comparant la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires entre le traitement orthodontique par des gouttières et le traitement multi-attache fixe

Etude	Type d'étude	Population	Intervention	Outil d'évaluation	Comparaison	Résultats
Barbagallo (2008) [119]	Essai clinique contrôlé randomisé prospectif Conception à bouche fendue	27 patients 54 premières prémolaires Age moyen: 15 ans Plan de TTT: extraction bilatérale des 1ères PM	Patients répartis au hasard dans 3 groupes de 9 patients: G1: gouttières ClearSmile [®] d'un côté- aucun mouvement de l'autre côté=côté contrôle G2: gouttières ClearSmile [®] d'un côté-force lourde 225g ressort cantilever TMA (0,017x0,025) G3: gouttières ClearSmile [®] d'un côté-force légère 25g ressort cantilever TMA (0,017x0,025) Durée de TTT: 8 semaines (56±1 jours)	Micro-tomodensitométrie sur les 1ères PM sup extraites ensuite	Quantité de résorption radiculaire entre les dents traitées par des gouttières et celles traitées par des forces orthodontiques conventionnelles légères et lourdes et le groupe contrôle de dents non déplacées	Les dents du groupe contrôle ont exprimé le minimum de résorptions Les dents ayant subi des forces légères: 5 fois plus de résorption/dents du groupe contrôle (p<0,001) Les dents déplacées par des gouttières: 6 fois plus de résorptions/dents du groupe contrôle (p<0,001) Les dents ayant subi des forces lourdes: 9 fois plus de résorptions/ dents du groupe contrôle (p<0,001) Pas de différence statistiquement significative entre les dents déplacées par des gouttières et celles déplacées par des forces légères (p=0,94)

Comparaison Traitements fixes Vs Aligneurs : revue systématique

<p>Elissa (2018) [140]</p>	<p>Etude de cohorte prospective</p>	<p>33 patients Classe I avec encombrement 4-6mm Age:18,35±2,83ans</p>	<p>Répartition en 3 groupes: G1:Gouttières Smart Track® G2: Brackets pré-informés Damon® G3: Brackets préinformés 3M® TTT sans extractions Même durée de TTT</p>	<p>Imagerie Cône Beam Les incisives maxillaires</p>	<p>Différence en mm de la longueur radiculaire entre début (T1) et fin de TTT (T2)</p>	<p>Diminution significative de la longueur radiculaire entre T1 et T2 pour les 3 groupes Sévérité: G1: 0-1,4mm G2 :0,1-2,3mm G3 :0-2,5mm Les appareillages fixes induisent plus de résorptions (p<0,05)</p>
<p>Li (2020) [141]</p>	<p>Etude de cohorte rétrospective</p>	<p>70 patients 373 racines Age moyen: 23,61±7,03 ans Même difficulté de TTT</p>	<p>35 patients: gouttières Invisalign® Durée: 21,54±5,55 mois Extraction: 54%</p> <p>35 patients : TTT fixe 3M Unitek Durée: 23,31±6,25 mois Extraction: 40%</p>	<p>Imagerie Cône Beam Toutes les dents antérieures</p>	<p>Différence en mm de la longueur radiculaire entre début et fin de TTT dans les deux groupes</p>	<p>Prévalence des résorptions: Gouttières: 56,3% TTT fixe: 82,1% (p<0,001) Sévérité: Gouttières: 0,13±0,47mm TTT fixe: 1,12±1,34 mm (p<0,001) Résorptions sévères: TTT fixe/canines (1.53 ± 1.92 mm) et incisives latérales sup (1.31 ± 1.33 mm) (p<0,001) Résorptions légères: gouttières/canines (- 0.06 ± 0.47 mm) et incisives latérales inf (0.04 ± 0.48 mm) (p<0,001)</p>

Comparaison Traitements fixes Vs Aligneurs : revue systématique

<p>Toyokawa-Sperandio (2021) [142]</p>	<p>Essai clinique randomisé en deux groupes parallèles</p>	<p>40 patients 320 incisives Classe I d'Angle Encombrement moyen</p>	<p>Randomisation en deux groupes 20 patients /160 incisives: Age: 23,6±5,65 ans Gouttières Invisalign® 20 patients /160 incisives: Age:20,56±4,51 ans TTT fixe:3M Unitek Durée: 6mois TTT sans extractions</p>	<p>Radiographies périapicales Technique des plans parallèles Incisives maxillaires et mandibulaires</p>	<p>Différence en mm de la longueur radulaire entre début (T0) et fin de TTT (T1) dans les deux groupes</p>	<p>Emoussement de l'apex dans les deux groupes La résorption atteignait 2,88% de la longueur radulaire/97,12% restait intacte Aucun groupe ne présentait une résorption > 1mm Diminution significative (<0,001) de la longueur radulaire (T1-T0) dans les deux groupes: Gouttières: -0,52 à -0,85 mm TTT fixe: -0,52 à -0,88 mm Comparaison inter-groupes: 21 uniquement présente une différence significative: Gouttières: -0,52±0,57 mm TTT fixe: -0,86 ±0,60 mm Aucune différence significative pour les autres dents (0,03 à 0,35 mm)</p>
--	--	--	--	---	--	---

4. Discussion :

Lors de la réalisation de notre revue systématique, nous avons fixé les critères d'inclusion aux essais contrôlés randomisés et non randomisés, les études cas témoins, les études de cohorte et les études prospectives et rétrospectives qu'elles soient publiées en français ou en anglais, afin d'augmenter le niveau de preuve scientifique quant à l'existence d'une éventuelle association entre le traitement orthodontique par des gouttières et le risque de survenue des résorptions radiculaires.

Nous avons retenu dans ce sens, huit études qui répondaient à ces critères d'inclusion.

Prévalence et sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières:

Krieger et coll. [118], Gay et coll. [137] et Liu et coll. [139] ont évalué la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières thermoplastiques (Invisalign®). Bien que l'étude de Krieger et coll. [118] était rétrospective et celle de Gay et coll. [137] était prospective, les deux études avaient plusieurs points communs dans la méthodologie (caractéristiques de l'échantillon, modalités de traitement, outil d'évaluation). Les résultats des deux études se concordaient en termes de prévalence des résorptions (46% et 41,81% respectivement) et aussi leurs sévérité où on a noté la prédominance des résorptions légères (27,75% et 25,94% respectivement) et modérées (11,94% et 12,8% respectivement), alors que les résorptions sévères étaient minoritaires (6,31% et 3,69% respectivement).

Par ailleurs, dans l'étude de Liu et coll. [139], toutes les incisives maxillaires et mandibulaires ont présenté des résorptions à la fin de traitement, une prévalence nettement supérieure à celles rapportées par Gay et coll. [137] (41,81%) et Krieger et coll. [118] (46%), elle est supérieure aussi à celle rapportée par Chang et Liu [144] (48,28%) et Li et coll. [141] (56,3%). Toutefois, la prévalence des résorptions sévères dans l'étude de Liu et coll. [139] était plus faible (0,62%) que celles rapportées par Krieger et coll. [118] et Gay et coll. [137] (6,31% et 3,69% respectivement).

Ces différences de prévalence et de sévérité pourraient être expliquées par plusieurs facteurs:

Caractéristiques de l'échantillon: tous les patients dans l'étude de Krieger et coll, de Gay et coll et 50% des patients dans l'étude de Chang et Liu avaient une classe I occlusale traitée sans extractions. Alors que dans l'étude de Liu et coll, tous les patients avaient une classe II occlusale

traitée avec extractions de 4 prémolaires dans 50% des cas. Or, les études précédentes ont montré que l'incidence des résorptions dans les cas de classe I occlusale était inférieure à celle rapportée dans les cas de classe II occlusale [145] et elle était aussi plus faible dans les cas traités sans extractions que dans les cas traités avec extractions [146,147].

Il est aussi à noter que l'étude de Liu et coll. [139] intéressait le groupe incisif uniquement, or il est préalablement admis que, après traitement orthodontique, les incisives maxillaires sont les plus sujettes aux résorptions, suivies par les incisives mandibulaires et les premières molaires [148].

Méthodes de diagnostic et de mesure des résorptions: la précision du diagnostic des résorptions radiculaires après traitement orthodontique dépend largement de la fiabilité de l'image radiologique utilisée comme outil de diagnostic et de mesure de ces résorptions [139]. Kieger et coll. [118] et Gay et coll. [137] ont utilisé la radiographie panoramique alors que Liu et coll. [139] se sont basés sur les mesures effectuées sur les images du Cône Beam. Or les études précédentes [149,150] ont montré que les images radiologiques bidimensionnelles conventionnelles, en raison des distorsions, pourraient manquer le diagnostic des résorptions radiculaires, établir un diagnostic tardif ou encore sur ou sous-estimer la sévérité de ces résorptions. Dans ce sens, Dudic et coll. [151,152] ont conclu que la radiographie péri-apicale détecterait moins que la moitié des cas de résorptions identifiés par micro-tomodensitométrie et que la prévalence des résorptions établie par la radiographie panoramique a été sous-estimée de 20% par rapport à l'imagerie Cône Beam.

En effet, l'imagerie Cône Beam a démontré une sensibilité élevée et une excellente spécificité dans la détection des résorptions radiculaires [152,153] justifiant son utilisation dans la plupart des études récentes comme outil de diagnostic et de mesure des résorptions radiculaires après traitement orthodontique [139,141,145].

Analyse comparative : traitement par aligneurs VS traitements multi-attaches fixes

Les résultats de l'étude de Li et coll. [141] ont montré que la prévalence des résorptions dans le groupe de dents traitées par des gouttières Invisalign® était significativement inférieure à celle rapportée dans le groupe du traitement fixe (53,3% et 81% respectivement). Il est aussi à noter que, en se basant sur la méthode de Sharpe [154], toutes les résorptions des dents traitées par des gouttières étaient légères (1 à 2 mm), alors que le groupe du traitement fixe présentait en plus des résorptions modérées (2mm au 1/4 de la longueur radiculaire) dans 19,24% et des

résorptions sévères (>1/4 de la longueur radiculaire) dans un faible pourcentage de 0,81%. En termes de sévérité, la diminution de la longueur radiculaire dans le groupe traité par des gouttières ($0,13 \pm 0,47$ mm) était significativement plus faible que celle dans le groupe du traitement fixe ($1,12 \pm 1,34$ mm).

La sévérité des résorptions rapportée dans cette étude était supérieure que celle rapportée dans l'étude de Toyokawa-Sperandio et coll. [142] où la quantité de résorption était inférieure à 1mm allant de de -0,52 à -0,85 mm dans le groupe des dents traitées par des gouttières et de -0,52 à -0,88mm dans le groupe des dents du traitement fixe. De plus, aucune différence significative n'a été notée entre les deux groupes sauf pour la 21 qui présentait moins de résorptions avec les gouttières comparativement aux traitements fixes ($-0,52 \pm 0,57$ mm et $-0,86 \pm 0,60$ mm).

Plusieurs raisons pourraient expliquer cette différence générale de sévérité:

- Dans l'étude de Toyokawa-Sperandio et coll. [142], tous les cas présentaient une classe I occlusale avec encombrement moyen traité sans extractions, alors que dans l'étude de Li et coll. [141], les extractions ont été réalisées chez 54% des patients traités par des gouttières et 40% des patients traités par des appareillages fixes. Or, à l'instar de notre étude, plusieurs études précédentes [146,147,155,156] ont montré que les extractions augmenteraient le risque de résorptions en raison des mouvements radiculaires induits pour la fermeture des espaces des extractions. Récemment, Gandhi et coll. [157] ont réalisé une méta-analyse afin de comparer la sévérité des résorptions au niveau des incisives maxillaires, après traitement orthodontique sans extractions, entre les appareillages fixes pré-informés et les gouttières d'alignement. Les résultats étaient similaires à ceux de Toyokawa-Sperandio et coll. [142] et les deux thérapeutiques ont induit des résorptions légères (1mm). Par contre, les résultats de la méta-analyse ont montré que la différence significative entre les deux thérapeutiques a été notée uniquement pour la 12 qui présentait plus de résorptions avec les appareillages edgewise qu'avec les gouttières, alors que cette différence a été notée pour la 21 dans l'étude de Toyokawa-Sperandio et coll. [142] .
- La durée de traitement dans l'étude de Toyokawa-Sperandio et coll. [142] était de 6 mois, nettement inférieure à celle de l'étude de Li et coll. [141] où la durée de traitement variait de $21,54 \pm 5,55$ mois pour le traitement avec des gouttières et $23,31 \pm 6,25$ mois pour le traitement multi-attache fixe. Or, comme notre étude, plusieurs études précédentes [10,147] ont montré que le risque et la sévérité des résorptions

augmenteraient avec la durée de traitement, autrement dit, la durée pendant laquelle les racines seraient déplacées.

- Dans l'étude de Toyokawa-Sperandio et coll. [142], les auteurs ont utilisé la radiographie péri-apicale pour diagnostiquer et mesurer les résorptions alors que Li et coll. [141] ont eu recours à l'imagerie Cône Beam qui présente, par rapport à la radiographie péri-apicale, une meilleure sensibilité et spécificité dans le diagnostic et la mesure des résorptions.

Par ailleurs, les résultats des études de Li et coll. [141] et de Toyokawa-Sperandio et coll. [142], ainsi que la méta-analyse de Gandhi et coll. [157], ont tous conclu vers une sévérité plus faible des résorptions radiculaires des dents antérieures après traitement orthodontiques par des gouttières d'alignement comparativement aux traitements par des appareillages fixes.

Plusieurs facteurs sembleraient être en faveur de cette différence:

- comme tous les appareillages amovibles, les gouttières thermoplastiques appliquent des forces intermittentes, favorables au processus de réparation cémentaire [65]. Weiland et coll [86] ont montré que les dents soumises à des forces continues délivrées par des appareillages fixes présentaient significativement plus de résorptions et des lacunes de résorptions plus larges et plus profondes que les dents soumises à des forces intermittentes.
- l'amplitude de déplacement dentaire indiquée par les gouttières thermoplastiques est faible, de 0.5mm/2semaines en moyenne [119]. En effet, l'amplitude moyenne du mouvement de version que la dent pourrait atteindre, dans un os cortical dense, en respectant les structures parodontales, est de 1mm/mois [158].
- les gouttières d'alignement délivrent des forces relativement légères, permettant à la circulation sanguine de reprendre et de poursuivre un apport en ostéoclastes et progéniteurs d'ostéoclastes, diminuant ainsi le risque d'hyalinisation, facteur déclenchant du phénomène de résorption radiculaire [65]. Dans ce sens, Barbagallo et coll. [119], ont montré que le groupe de dents traité avec des gouttières thermoplastiques, présentait un degré de résorption proche que celui traité avec des forces légères délivrées par des attaches fixes.
- les mouvements orthodontiques générés par les gouttières se limitent souvent à des versions légères sur une faible amplitude et donc moins de déplacements apicaux [119,123,125]. Ces déplacements, très fréquents dans le traitement par des techniques

fixes (torque et ingression), sont générateurs de pressions exagérées au niveau de la zone apicale, ce qui augmente le risque de résorptions radiculaires avec ces techniques [108].

- D'autres considérations sont en rapport avec la biomécanique des aligneurs, en effet la surface de l'aligneur recouvre la quasi-totalité de la couronne dentaire et avec des contacts intimes, ce qui permet à cet appareil amovible d'optimiser le mouvement. Ce contact parfait permet une transmission des informations par une action ciblée et programmable [159,160,161].

Par ailleurs, comme dans les cas de traitements multi-attaches fixes [4-6,11,60], l'âge et le sexe n'étaient pas associées à la sévérité des résorptions associées au traitement orthodontique par des gouttières [118,139,146,151].

Quant aux dents les plus touchées par ces résorptions, les résultats de Krieger et coll. [118] ont montré que l'incidence des résorptions était plus élevée au niveau des incisives maxillaires, bien qu'en termes de sévérité, la diminution de la longueur radiculaire n'était que 4 %.

Il découle de ce qui précède que la prévalence et la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique par des gouttières seraient moindres comparativement aux traitements multi-attaches fixes, une conclusion prouvée de point de vue statistique mais qui ne serait pas complètement élucidée de point de vue biomécanique. Les deux systèmes n'ont pas la même biomécanique, de plus, l'étude biomécanique des aligneurs présente plusieurs difficultés.

En effet :

- La détermination du système de force d'un aligneur et des moments associés est complexe et difficile à définir.
- Étant donné que la dent est englobée dans l'aligneur, le point d'application de la force n'est pas ponctuel. Il s'apparente plutôt à une surface de contact. C'est la résultante des forces appliquées sur cette surface qu'il faut appréhender.
- Ces forces évoluent continuellement lors du port de l'aligneur.
- La zone d'application des forces correspondant à la zone d'interaction couronne/aligneur, se modifie en même temps que les dents se déplacent. En effet, puisqu'il s'agit d'un appareil amovible et par conséquent il n'est pas fixé de manière rigide à la dent qu'il met en mouvement ; ceci va entraîner des interactions plus complexes entre la dent et l'aligneur, notamment lors d'un mouvement de glissement,

où les points de contact entre ces deux interfaces évoluent de manière dynamique.

- Les forces appliquées sont complètement modifiées lors du changement de l'aligneur suivant. Si un incident de parcours se produit, l'adaptation de l'aligneur suivant est alors modifiée ce qui peut induire des forces non souhaitées et des mouvements indésirables [159,160,161].

D'un autre point de vue, plusieurs critères influenceraient les forces délivrées par les aligneurs:

- Les forces délivrées dépendent tout d'abord du type et de l'épaisseur du polymère.
- À faible niveau d'activation, les principaux déterminants sont les propriétés physiques et chimiques du polymère.
- Lorsque l'activation est plus élevée (0.50 mm), on peut observer un phénomène de soulèvement de l'aligneur. C'est à ce moment-là que le mode de thermoformage joue un rôle crucial.
- Une bonne adaptation de l'appareil sur les couronnes dentaires permet d'appliquer une pression plus importante sur les dents à déplacer. De plus, les phénomènes de friction empêchent le soulèvement de l'aligneur.
- Un autre critère à analyser serait en rapport avec la variabilité de la morphologie dentaire, plus l'anatomie dentaire se complexifie, plus les forces délivrées seront variables.
- L'ajout d'attachements diminue la variabilité des forces car ils augmentent la rétention de l'aligneur grâce à une bonne adaptation et un positionnement réitératif sur la dent à déplacer.
- Les forces sont principalement appliquées sur certaines dents, les autres serviront d'ancrage.
- En fonction du type de dents, les forces engendrées sont différentes.

Il résulte ce qui précède que l'anatomie et la position d'une dent et de ses voisines influent sur les forces délivrées, l'interaction couronne dentaire/aligneur est patient dépendante.

Pour finir, il est important de prendre en compte la relaxation du polymère qui subit des charges répétées en raison des nombreux cycles d'insertions et de désinsertions entraînant une diminution des forces délivrées [159,160,161].

Limites de la présente revue systématique:

La principale limitation de notre revue systématique était le manque d'études prospectives à haut niveau de preuve, en particulier les essais contrôlés randomisés. La plupart des études incluses sont de type rétrospectif et n'englobent pas tous les paramètres de la malocclusion.

De plus, à la lumière de notre recherche, on a noté le manque des études incluant des cas avec extractions ou étendues à des malocclusions sévères de classe II et classe III. Le traitement avec des gouttières d'alignement était le plus souvent indiqué dans les cas de classe I sans extractions à sévérité légère ou modérée. Des études plus poussées englobant les cas avec extractions et toutes les dysmorphoses squelettiques et malocclusions seraient donc nécessaires afin de mieux identifier l'incidence et la sévérité des résorptions radiculaires à l'usage des gouttières et les comparer avec celles qui font suite au traitement orthodontique fixe.

Une autre limitation était en rapport avec la précision des mesures de la longueur radiculaire sur les radiographies 2D et la possibilité de comparaison avec les études utilisant l'imagerie Cône Beam.



**CONCLUSION ET
RECOMMANDATIONS**

Dans notre étude, la fréquence des résorptions radiculaires apicales externes des incisives maxillaires après traitement orthodontique fixe était de 95% dont 59.3% étaient des résorptions modérées à sévères.

La sévérité des résorptions augmentait de façon statistiquement significative au niveau des incisives latérales, dans les cas traités avec extractions, les cas de supracluse et de bécane incisives, et en présence d'anomalies radiculaires.

Concernant la durée de traitement, notre étude a montré que l'incidence et la sévérité des résorptions augmentaient avec la durée de traitement, bien que cette association n'était pas statistiquement significative en analyse multivariée.

L'âge, le sexe, le type de malocclusion, la déglutition dysfonctionnelle et l'inclusion canine n'étaient pas associés de façon statistiquement significative à la sévérité des résorptions radiculaires après traitement multi-attache fixe.

En comparaison avec le traitement orthodontique par des gouttières, la prévalence des résorptions radiculaires variait de 41% jusqu'à 100%, prédominée par des résorptions légères (1mm à 2 mm) alors que les résorptions sévères présentaient 0,62% à 6%. Cette prévalence était plus élevée au niveau des incisives maxillaires et n'était également pas influencée par l'âge et le sexe.

Ces résultats sont à prendre avec prudence, puisque les deux techniques diffèrent selon plusieurs critères (indications, nécessité d'extractions, durée de traitement, type et intensité des forces, mouvements orthodontiques prévus, complexité de la biomécanique des aligneurs...) qui, eux-mêmes, pourraient influencer le risque de survenue des résorptions radiculaires.

Ceci dit, le risque de résorptions radiculaires quand il est présent, quel que soit la technique préconisée, toutes les précautions nécessaires devraient être entreprises pour le minimiser.

Face aux facteurs de risque identifiés dans notre étude, ainsi que ceux énoncés dans la littérature, il nous a semblé intéressant de proposer des recommandations cliniques, dont le but est de prévenir la survenue et minimiser la sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique:

- Approfondir l'anamnèse à la recherche d'éventuelles maladies systémiques (arthrose, diabète, allergies...), des traitements médicamenteux notamment anti-inflammatoires, des antécédents traumatiques, des formes familiales de résorptions...
- Informer le patient sur le risque de survenue des résorptions et obtenir son consentement éclairé avant de commencer le traitement orthodontique.
- Réaliser un bilan radiologique rétro-alvéolaire, en technique long cône de préférence, avant le traitement, afin de déceler les éventuelles anomalies de la morphologie radiculaire, les résorptions préalablement existantes, une résorption en rapport avec une canine incluse...etc.
- Rééduquer les dysfonctions en général et la déglutition dysfonctionnelle en particulier et éliminer les parafonctions (onychophagie, succion de pouce, dysfonctions labiales, bruxisme...).
- Limiter la durée du traitement.
- Adapter l'intensité des forces orthodontiques à l'environnement neuro-musculaire et parodontal du patient.
- Limiter l'amplitude des déplacements dentaires et avoir recours aux protocoles orthodontico-chirurgicaux quand leur indication s'impose, pour limiter les déplacements radiculaires trop importants.
- Adapter le protocole thérapeutique à la physiologie apicale en limitant les mouvements à risque (ingression, torque, tipping...)
- Réaliser des contrôles radiologiques réguliers, généralement tous les 6 mois pour les dents antérieures. Ces contrôles devraient être plus fréquents chez les patients ayant subi un traumatisme, ainsi que chez les sujets sous traitement anti-inflammatoire ou à risque élevé de résorptions radiculaires.
- Si des résorptions sont détectées au cours de traitement, leur étiologie doit être recherchée et en fonction de leur sévérité, le nombre de dents atteintes et l'environnement parodontal, les objectifs du traitement doivent être réévalués. Eventuellement, le traitement pourrait être arrêté momentanément, pendant au moins 3 mois, en maintenant des arcs passifs.
- Le traitement canalaire n'est recommandé qu'en présence de nécrose pulpaire aseptique ou avec contamination microbienne, de calcifications pulpaires ou dans le cas de résorptions internes [162].

Comparativement aux incidences 2D, l'imagerie Cône Beam présente une grande sensibilité et spécificité qui génèrent des images précises particulièrement des petits défauts radiculaires.

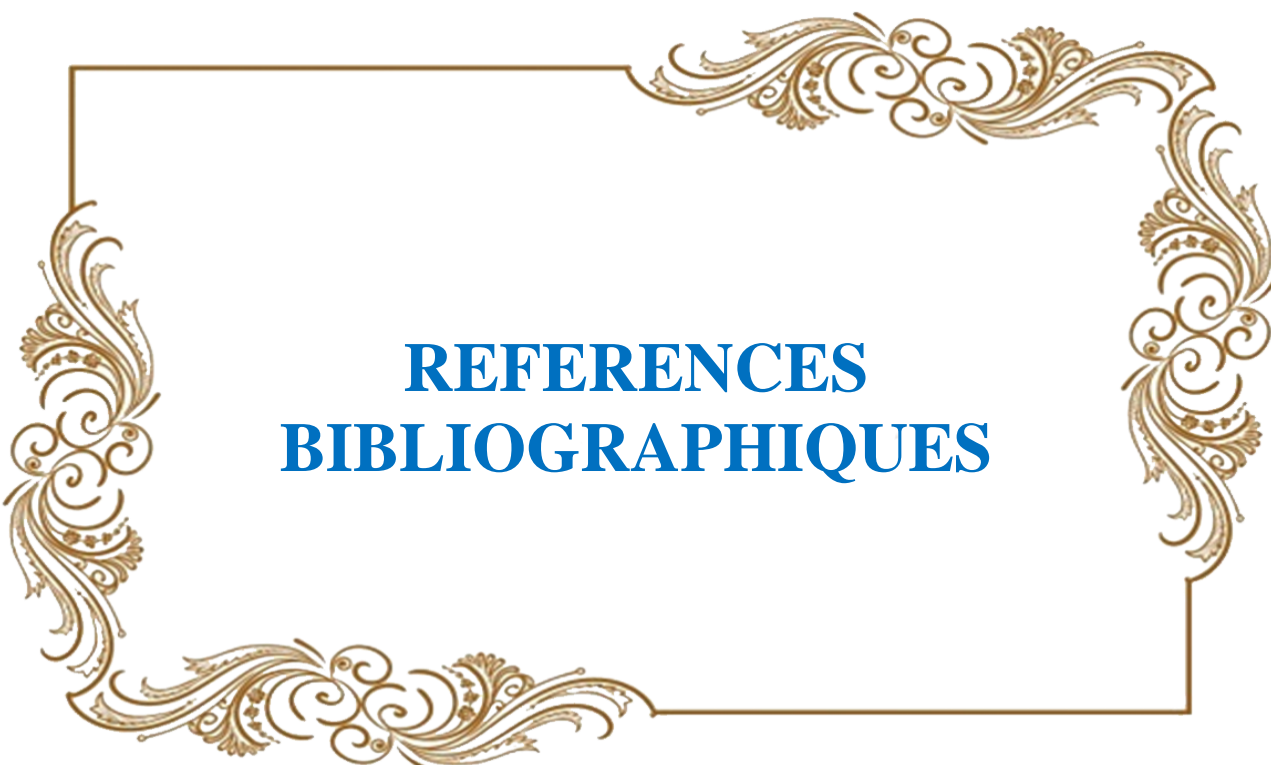
De plus, alors que les radiographies 2D ne fournissent que la visualisation de l'apex et des surfaces radiculaires mésiale et distale, l'imagerie Cône Beam permet de visualiser les lésions radiculaires vestibulaires et linguales. Cela a conduit à la découverte que la perte de substance radiculaire n'est pas seulement présente à l'extrémité apicale, mais souvent présente comme une résorption oblique sur les surfaces adjacentes à la direction du mouvement des dents. Ainsi, en plus du diagnostic accepté des résorptions à partir des radiographies 2D, le Cône Beam à haute résolution pourrait définir de nouveaux critères diagnostiques de la résorption radiculaire affectant les surfaces radiculaires visualisables en 3D mais pas en 2D [163,164].

À l'heure actuelle, il n'existe aucune preuve que la détection des résorptions radiculaires apicales externes modérées à sévères diffère entre les images 2D et la radiographie 3D ou que leur découverte par imagerie Cône Beam pendant le traitement conduirait à une décision thérapeutique différente -impliquant généralement l'arrêt au moins temporairement du traitement- que si ces résorptions ont été détectées par radiographie 2D [164].

Cependant, l'identification d'une résorption radiculaire vestibulaire ou linguale, qui n'est pas visualisée par la radiographie 2D mais qui est détectable par le Cône Beam, pourrait conduire à des différences de décisions avant ou pendant le traitement. La question qui reste à répondre dans ce scénario est comment et quand un clinicien déciderait qu'un patient a subi une telle résorption radiculaire vestibulaire et/ou linguale pour justifier l'indication d'un Cône Beam [164].

Conformément aux recommandations et dernières directives, l'utilisation du Cône Beam est indiquée dans les cas où l'examen clinique complété par la radiographie conventionnelle ne permettraient pas de fournir tous les éléments pour un diagnostic complet. Dans les cas des résorptions, l'imagerie Cône Beam pourrait être prescrite là où il est probable qu'il y aurait un rapport bénéfice/risque favorable, tel que le diagnostic d'une résorption radiculaire causée par une dent incluse par exemple [163,164].

Pour cela, il est de plus en plus conseillé aux orthodontistes de faire appel à leur jugement clinique lors de la prescription des radiographies, y compris l'imagerie Cône Beam, pour obtenir les données les plus pertinentes en utilisant le minimum de rayonnements ionisants [163,164].



**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Levander E, Malmgren O. Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: a study of upper incisors. *Eur J Orthod* 1988;10:30-38.
- [2] Reitan K, Rygh P. Biochemicals principles and reactions. In Graber TM, Robert L Vanarsdall, Jr. *Orthodontics. Current Principles and Techniques. Second Edition. St Louis Mosby, 1994:101-192.*
- [3] Mavragani M, Amundsen OC, Selliseth NJ. Early root alterations after orthodontic force application studied by light and scanning electron microscopy. *Eur J Orthod* 2004;26:119-128.
- [4] Long D Tieu, Humam Saltaji, David Normando, Carlos Flores-Mir Radiologically determined orthodontically induced external apical root resorption in incisors after non-surgical orthodontic treatment of class II division 1 malocclusion: a systematic review. *Progress in Orthodontics. 2014,15:48.*
- [5] Linge L, Linge BO. Patient characteristics and treatment variables associated with apical root resorption during orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;99(1):35–43.
- [6] Ruo-ping Jiang, J.P. McDonald, Min-kui Fu. Root resorption before and after orthodontic treatment: a clinical study of contributory factors. *European Journal of Orthodontics. 2010;32:693–697.*
- [7] Sameshima GT, Sinclair PM. Predicting and preventing root resorption: Part I. Diagnostic factors. *Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2001a;119(5):505–10.*
- [8] Sameshima G T, Sinclair P M Predicting and preventing root resorption Part 2: treatment factors. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics 2001b;119: 511–515.*
- [9] Mirabella AD, Artun J. Risk factors for apical root resorption of maxillary anterior teeth in adult orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop. 1995; 108(1):4855.*
- [10] Baumrind S, Korn EL, Boyd RL. Apical root resorption in orthodontically treated adults. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1996;110:311-320.
- [11] Levander E, Bajka R, Malmgren O. Early radiographic diagnosis of apical root resorption during orthodontic treatment: a study of maxillary incisors. *Europ J of Orthodontics. 1998;20:57–63.*
- [12] Mavragani M, Vergari A, Selliseth NJ, Boe OE, Wisth PL. A radiographic comparison of apical root resorption after orthodontic treatment with a standard edgewise and a straight-wire edgewise technique. *Eur J Orthod* 2000;22:665-674.
- [13] Brin I, Tulloch JF, Koroluk L, Philips C. External apical root resorption in Class II malocclusion: a retrospective review of 1- versus 2-phase treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003; 124:151-6.

-
- [14] Nishioka M, Loi H, Nakata S. Root resorption and immune system factors in the Japanese. *Angle Orthod* 2006;76:103-108.
- [15] Mohandesan H, Ravanmehr H, Valaei N. A radiographic analysis of external apical root resorption of maxillary incisors during active orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 2007; 29 : 134-9.
- [16] Nanekrungsan K, Patanaporn V, Janhom A, Korwanich N. External apical root resorption in maxillary incisors in orthodontic patients: associated factors and radiographic evaluation. *Imaging Science in Dentistry* 2012; 42: 147-54.
- [17] Motokawa M, Terao A, Kaku M, Kawata T, Gonzales C, Darendeliler MA, Tanne K. Open bite as a risk factor for orthodontic root resorption. *European Journal of Orthodontics*. 2013(35) 790–795.
- [18] Maués CP, Do Nascimento RR, Vilella Ode V. Severe root resorption resulting from orthodontic treatment: prevalence and risk factors. *Dental Press J Orthod* 2015;20(1):52-58.
- [19] Copeland S, Green L. Root resorption in maxillary central incisors following active orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 1988;10:180-186.
- [20] Casa MA, Faltin RM, Faltin K. Root resorption on torqued human premolars shown by tartrate-resistant acid phosphatase histochemistry and transmission electron microscopy. *Angle Orthod* 2006;76:1015-1021.
- [21] Le Norcy E. Anomalies dentaires et résorption radiculaire apicale externe au cours du traitement orthodontique : une étude radiographique rétrospective sur l'incisive centrale maxillaire. *Rev. Orthop. Dento-Faciale* 2009;43:143-151.
- [22] Sauveur G, Mesbah M. Résorptions pathologiques des dents permanentes évoluées. In : *Encycl. Med. Chir, Chirurgie orale et maxillo-faciale*, 22-032-K-10, 2003.11p.
- [23] Hohmann A, Wolfram U, Geiger M. Periodontal ligament hydrostatic pressure with areas of root resorption after application of a continuous torque moment. *Angle Orthod* 2007;77(4):653-659.
- [24] Rygh P. Orthodontic root resorption studied by electron microscopy. *Angle Orthod* 1977;47(1):1-16.
- [25] Linge BO, Linge L. Apical root resorption in upper anterior teeth. *Eur J Orthod* 1983;5:173-183.
- [26] Sharpe W, Reed B, Subtelny D. Orthodontic relapse, apical root resorption and crestal bone levels. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1987;91(3):252-258.
- [27] Brudvik P, Rygh P. Non-clast cells start orthodontic root resorption in the periphery of hyalinized zones. *Eur J Orthod* 1993;15:467-480.

- [28] Brudvik P, Rygh P. Root resorption beneath the main hyalinised zone. *Eur J Orthod* 1994;16:249-263.
- [29] Tanaka T, Morioka T, Ayasaka N. Endocytosis in odontoclasts using microperoxydase as a tracer. *J Dent Res* 1990;69:883-889.
- [30] Andreasen JO. External root resorption: its implication in dental traumatology, periodontics, orthodontics and endodontics. *Int Endod J* 1985;18(2):109-118.
- [31] Iglesias-Linares A, Hartsfield Jr J.K. Cellular and Molecular Pathways Leading to External Root Resorption. *J Dent Res*. 2017;96(2):145-152.
- [32] Kalra S, Gupta P, Tripathi T, Rai P External apical root resorption in orthodontic patients: molecular and genetic basis. *J Family Med Prim Care*. 2020;9(8):3872-3882.
- [33] Al-Qawasmi RA, Hartsfield JK Jr, Everett ET, Flury L, Liu L, Foroud TM, et al. Genetic predisposition to external apical root resorption. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2003;123(3):242-52.
- [34] Iglesias-Linares A, Yanez-Vico RM, Ballesta-Mударra S, Ortiz-Ariza E, Ortega-Rivera H, Mendoza-Mendoza A, et al. Postorthodontic external root resorption is associated with IL1 receptor antagonist gene variations. *Oral Dis* 2012;18(2):198-205.
- [35] Gottipati S, Rao NL, Fung-Leung WP. IRAK1: A critical signaling mediator of innate immunity. *Cell Signal* 2008;20(2):269-76.
- [36] Guo Y, He S, Gu T, Liu Y, Chen S. Genetic and clinical risk factors of root resorption associated with orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2016;150(2):283-9.
- [37] Hayashi N, Yamaguchi M, Nakajima R, Utsunomiya T, Yamamoto H, Kasai K. T-helper 17 cells mediate the osteo/odontoclastogenesis induced by excessive orthodontic forces. *Oral Dis* 2012;18(4):375–88.
- [38] Linhartova PB, Cernochova P, Kastovsky J, Vrankova Z, Sirotkova M, Izakovicova H, L. Genetic determinants and postorthodontic external apical root resorption in Czech children. *Oral Diseases* 2017;23(1):29–35.
- [39] Fontana ML, de Souza CM, Bernardino JF, Hoette F, Hoette ML, Thum L, et al. Association analysis of clinical aspects and vitamin D receptor gene polymorphism with external apical root resorption in orthodontic patients. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2012;142(3):339-47.
- [40] Iglesias-Linares A, Yanez-Vico RM, Moreno-Fernandez AM, Mendoza-Mendoza A, Orce-Romero A, Solano-Reina E. Osteopontin gene SNPs (rs9138, rs11730582) mediate susceptibility to external root resorption in orthodontic patients. *Oral Dis* 2014;20(3):307–12.
- [41] Hartsfield JK Jr. Pathways in external apical root resorption associated with

- orthodontia. *Orthod Craniofac Res* 2009;12(3):236-42.
- [42] Lim WH, Liu B, Hunter DJ, Cheng D, Mah S, Helms JA. Downregulation of Wnt causes root resorption. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2014;146(3):337-45.
- [43] Nishijima Y, Yamaguchi M, Kojima T. Levels of RANKL and OPG in gingival cervical fluid during orthodontic tooth movement and effect of compression force on releases from periodontal ligament cells in vitro. *Orthod Craniofac Res* 2006;9(2):63-70.
- [44] Samadet V, Delsol L. Résorptions radiculaires: des possibilités de réparation? *Rev Orthop Dento Faciale*. 2007;41:311-319.
- [45] Brezniak N, Wasserstein A. Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part I: the basic science aspect. *Angle Orthod* 2002a;72(2):175-179.
- [46] Levander E, Malmgren O. Long-term follow-up of maxillary incisors with severe apical root resorption. *Eur J Orthod* 2000;22(1):85-92.
- [47] Bacon W, Canal P. Le clinicien et la rhizalyse orthodontique: l'essentiel des données actuelles. *Rev Orthop Dento Faciale* 2004;38(3):303-308.
- [48] Giganti U, Favilli F, Falconi A. Les résorptions radiculaires en orthodontie: revue de littérature. *Rev Orthop Dento Faciale* 1997;31:23-46.
- [49] Fuss Z, Tsesis I, Lin S. Root resorption, diagnosis, classification and treatment choice based on stimulation factors. *Dent Traumatol* 2003;19(4):175-182.
- [50] Lepatiene K, Dumbravaite A. Risk factors of root resorption after orthodontic treatment. *Stomatologija* 2008;10:89-95.
- [51] Preoteasa CT, NiȚoi DF, Preoteasa E. Microscopic morphological changes of the tooth surface in relation to fixed orthodontic treatment. *Rom J Morphol Embryol*. 2015;56(1):257-62.
- [52] Steadman SR. Resume of the litterature on root resorption. *Angle Orthod* 1942;12:28-38.
- [53] Bouyssou M, Lepp FH, Zerosi C, Thoma KH. Résorptions dentaires et biologie osseuse: Physiopathologie, radiologie, implications thérapeutiques. Lièges: Sciences et lettres, 1965:1-613.
- [54] Sarazin N. Résorptions radiculaires et traitements orthodontiques. *J. Edgewise* 1982;6:7-22.
- [55] Bassigny F. Les résorptions radiculaires d'origine orthodontique. *Rev Odonto Stomatol* 1982;11(4):305-311.
- [56] Andreasen JO. External root resorption: its implication in dental traumatology, periodontics, orthodontics and endodontics. *Int Endod J* 1985;18(2):109-118.

-
- [57] Tronstad L. Root resorption: etiology, terminology and clinical manifestations. *Endod Dent Traumatol* 1988;4(6):241-252.
- [58] Mavragani M, Bøe OE, Wisth PJ, Selvig KA. Changes in root length during orthodontic treatment: advantages for immature teeth. *Eur J Orthod*. 2002;24(1):91-7.
- [59] Jiang R, McDonald JP, Fu M. Root resorption before and after orthodontic treatment: a clinical study of contributory factors. *Eur J Orthod*. 2010; 32: 693-697.
- [60] Masahide Motokawa, Akiko Terao, Masato Kaku, Toshitsugu Kawata, Carmen Gonzales, M. Ali Darendeliler, Kazuo Tanne. Open bite as a risk factor for orthodontic root resorption. *European Journal of Orthodontics*. 2013(35) 790–795.
- [61] Artun J, Smale I, Behbehani F, Doppel D. Apical root resorption six and 12 months after initiation of fixed orthodontic appliance therapy. *Angle Orthod* 2005;75:916-926.
- [62] Kjaer I. Morphological characteristics of dentitions developing excessive root resorption during orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 1995;16:25-34.
- [63] Aminoshariae A, Aminoshariae A, Valiathan M, Kulild JC. Association of genetic polymorphism and external apical root resorption: A systematic review. *Angle Orthod*. 2016 May 5. [Epub ahead of print]
- [64] Harris EF, Kineret SE, Tolley EA. A heritable component for external apical root resorption in patients treated orthodontically. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1997;111:301-309.
- [65] Le Norcy E, Lautrou A, LE Golf C. Orthodontically-induced root resorption factors. Review of the literature. *International Orthodontics* 2005;3:129-140.
- [66] Weltman B, Vig KW, Fields HW, Shanker S, Kaizar EE. Root resorption associated with orthodontic tooth movement: a systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2010; 137(4):462–76.
- [67] Verna C, Dalstra M, Melsen B. Bone turnover rate in rats does not influence root resorption induced by orthodontic treatment. *Eur J Orthod* 2003;25:359-363.
- [68] Poumpros E, Loberg E, Engström C. Thyroid function and root resorption. *Angle Orthod* 1994;64(5):389-394.
- [69] Mac Nab S, Battistutta D, Taverne AL. External apical root resorption of posterior teeth in asthmatics after orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1999;116:545-551.
- [70] Owman-Moll P, Kurol J. Root resorption after orthodontic treatment in high- and low-risk patients: analysis of allergy as a possible predisposing factor. *Eur J Orthod* 2000;22:657-663.
- [71] Krishnan V, Davidovitch Z. Cellular, molecular, and tissue level reactions to orthodontic force. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2006; 129 : 469.e1-32.

- [72] Nawrocki L, Libersa P, Lambilliotte F et al. Anomalies dentaires après chimiothérapie anticancéreuse. *Arch Pédiatr* 2001;8:754-756.
- [73] Akharzouz C, Chauty S, Bodard AG. Children who received a radiotherapy treatment of the cranio-cervico-facial region: appraisal of the orthodontic treatment need. *Orthod Fr* 2013;84:157–168.
- [74] Drysdale C, Gibbs SL, Pitt Ford TR. Orthodontic management of root-filled teeth. *Br J Orthod* 1996;23(3):255-260.
- [75] Esteves T, Ramos AL, Pereira CM, Hidalgo MM. Orthodontic root resorption of endodontically treated teeth. *J Endod.* 2007;33:119-22.
- [76] Llamas-Carreras JM, Amarilla A, Solano E, Velasco-Ortega E, Rodríguez-Varo L, Segura-Egea JJ. Study of external root resorption during orthodontic treatment in root filled teeth compared with their contralateral teeth with vital pulps. *Int Endod J.* 2010;43:654-62.
- [77] Llamas-Carreras JM, Amarilla A, Espinar-Escalona E, Castellanos-Cosano L, Martín-González J, Sánchez-Domínguez B, López-Frías FJ. External apical root resorption in maxillary root-filled incisors after orthodontic treatment: A split-mouth design study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2012;17(3):e523-527.
- [78] Roberts-Harry D, Sandy J. Orthodontics. Part 11: Orthodontic tooth movement. *Br Dent J* 2004;196:391-394.
- [79] Malmgren O, Goldson L, Hill C, Orwin A, Lundberg M. Root resorption after orthodontic treatment of traumatized teeth. *Am J Orthod* 1982;Dec:487-490.
- [80] Graber TM, Vanarsdall Jr RL. Orthodontics. Current Principles and Techniques. 3e édition. Saint Louis: Mosby, 2000.
- [81] Brezniak N. Orthodontically induced inflammatory root resorption. Part II: The clinical aspects. *Angle Orthod* 2002;72:180-4.
- [82] Maltha JC, van Leeuwen EJ, Dijkman GE, Kuijpers-Jagtman AM.. Incidence and severity of root resorption in orthodontically moved premolars in dogs. *Orthod Craniofacial Res* 2004;7:115-121.
- [83] Chan E, Darendeliler MA. Physical properties of root cementum: Part 5. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005;127:186-195.
- [84] Ren Y, Maltha JC, Kuijpers-Jagtman AM. Optimum force magnitude for orthodontic tooth movement: A Systematic Literature Review. *Angle Orthod.* 2003;73:86-92.
- [85] Roscoe MG, Meira JB, Cattaneo PM. Association of orthodontic force system and root resorption: A systematic review. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2015;147(5):610-626.
- [86] Weiland F. Constant versus dissipating forces in orthodontics: the effect on initial tooth movement and root resorption. *Eur J Orthod* 2003;25:335-342.

-
- [87] Kurol J, Owman-Moll P, Lundgren D. - Time-related root resorptions after applications of a controlled continuous orthodontic force. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1996;110:303-310.
- [88] Segal GR, Schiffman PH, Tuncay OC. Meta analysis of the treatment – related factors of external apical root resorption. *Orthod Craniofac Res* 2004;7(2):71-78.
- [89] Apajalahti S, Peltola JS. Apical root resorption after orthodontic treatment: A retrospective study. *Eur J Orthod* 2007;29:408-412.
- [90] Costopoulos G, Nanda R. An evaluation of root resorption incident to orthodontic intrusion. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1996;103:543-548.
- [91] Martins Dr, Tibola D, Janson G, Maria FR. Effects of intrusion combined with anterior retraction on apical root resorption. *Eur J Orthod*. 2012;34(2):170-175.
- [92] Horiuchi A, Hotokezaka H, Kobayashi K. Correlation between cortical plate proximity and apical root resorption. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1998;114:311-318.
- [93] Han G, Huang S, Von Den Hoff JW. Root resorption after orthodontic intrusion and extrusion: an intraindividual study. *Angle Orthod* 2005;75:912-918.
- [94] Jimenez-Pellegrin C, Arana-Chavez VE. Root resorption in human mandibular first premolars after rotation as detected by scanning electron microscopy. *Am J Orthod DentofacialOrthop* 2004;126:178-84.
- [95] Beck BW, Harris EF. Apical root resorption in orthodontically treated subjects: analysis of edgewise and light wire mechanics. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 1994;105(4):350-361.
- [96] Savoldi F, Bonetti S, Dalessandri D, Mandelli G, Paganelli C. Incisal Apical Root Resorption Evaluation after Low Friction Orthodontic Treatment Using Two-Dimensional Radiographic Imaging and Trigonometric Correction. *J Clin Diagn Res*. 2015 Nov;9(11):ZC70-4.
- [97] Scott, P.;DiBiase, A.T.; Sherriff, M.; Cobourne, M.T. Alignment efficiency of Damon3 self-ligating and conventional orthodontic bracket systems: a randomized clinical trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008;134,470e:1-8.
- [98] Yi J, Li M, Li Y, Li X, Zhao Z. Root resorption during orthodontic treatment with self-ligating or conventional brackets: a systematic review and meta-analysis *BMC Oral Health* 2016;16:125
- [99] Aras I, Unal I, Huniler G, Aras A. Root resorption due to orthodontic treatment using self-ligating and conventional brackets. *J Orofac Orthop*. 2018;79(3):181-190.
- [100] Alwali S, Marklund M, Persson M. Apical root resorption of upper first molars as related to anchorage system. *Swed Dent J* 2000;24:145-153.
- [101] Jiang R P, Zhang D, Fu M K. A clinical study of root resorption before and after orthodontic

- treatment. *Chinese Journal of Orthodontics* 2001;8: 108–110.
- [102] Lupi JE, Handelman CS, Sadowsky C. Prevalence and severity of apical root resorption and alveolar bone loss in orthodontically treated adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1996; 109(1):28–37.
- [103] Lee Y J, Lee T Y External root resorption during orthodontic treatment in root-filled teeth and contralateral teeth with vital pulp: A clinical study of contributing factors. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2016;149:84-91.
- [104] Linkous ER, Trojan T M, Harris E F. External apical root resorption and vectors of orthodontic tooth movement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2020;158(5):700-709.
- [105] Liou EJW, Chang PMH. Apical root resorption in orthodontic patients with en-masse maxillary anterior retraction and intrusion with miniscrews. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;137(2):207–212.
- [106] Kreich EM, Chibinski AC, Coelho U, Wambier LS, Zedebski Rde A, de Moraes ME, de Moraes LC. A posteriori registration and subtraction of periapical radiographs for the evaluation of external apical root resorption after orthodontic treatment. *Imaging Sci Dent.* 2016 Mar;46(1):17-24.
- [107] Kaley J, Phillips C. Factors related to root resorption in edgewise practice. *Angle Orthod.* 1991; 61(2):125–32.
- [108] Bellini-Pereira SA, Almeida J, Del Castillo AA, Oliveira dos Santos CC et al. Evaluation of root resorption following orthodontic intrusion: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod* 2021 Aug 3;43(4):432-441.
- [109] Samandara, A., Papageorgiou, S.N., Ioannidou-Marathiotou, I., Kavvadia- Tsatala, S. and Papadopoulos, M.A. Evaluation of orthodontically induced external root resorption following orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod* 2019;41(1):67-79.
- [110] Deng, Y., Sun, Y. and Xu, T. (2018) Evaluation of root resorption after comprehensive orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a meta-analysis. *BMC Oral Health* 2018;18(1):116.
- [111] Harris E F, Butler M L Patterns of incisor root resorption before and after orthodontic correction in cases with anterior open bites. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 1992;101:112–119.
- [112] Kuperstein R External apical root resorption of the maxillary central incisor in anterior open bite malocclusion. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* 2005;127:393–394.
- [113] Tanaka A, Iida J, Soma K Effect of hypofunction on the microvasculature in the periodontal ligament of the rat molar. *Orthodontic Waves.*1998; 57: 180–188.

- [114] Sringkarnboriboon S, Matsumoto Y, Soma K. Root resorption related to hypofunctional periodontium in experimental tooth movement. *Journal of Dental Research* 2003;82:486–490.
- [115] Nigul K, Jagomagi T. Factors related to apical root resorption of maxillary incisors in orthodontic patients *Stomatologija. Baltic Dent Maxillofac J* 2006; 8:76-9.
- [116] Scott Derek Currell , Andrew Liaw, Peter Donald Blackmore Grant , Adrian Esterman , Alan Nimmo Orthodontic mechanotherapies and their influence on external root resorption: A systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2019;155(3):313-329.
- [117] Yassir YA, McIntyre GT, Bearn DR. Orthodontic treatment and root resorption: an overview of systematic reviews. *Eur J Orthod* 2021;43(4):442-456.
- [118] Krieger E, Drechsler T, Schmidtmann I, Jacobs C, Haag S, Wehrbein H. Apical root resorption during orthodontic treatment with aligners? A retrospective radiometric study. *Head Face Med.* 2013 Aug 14;9:21. doi: 10.1186/1746-160X-9-21.
- [119] Barbagallo LJ, Jones AS, Petocz P, Darendeliler MA. Physical properties of root cementum: Part 10. Comparison of the effects of invisible removable thermoplastic appliances with light and heavy orthodontic forces on premolar cementum. A microcomputed-tomography study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;133(2):218-27.
- [120] Brezniak N, Wasserstein A: Root resorption following treatment with aligners. *Angle Orthod.* 2008 Nov;78(6):1119-24.
- [121] Sombuntham NP, Songwattana S, Atthakorn P, Jungudomjaroen S, Panyarachun B. Early tooth movement with a clear plastic appliance in rats. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009 Jul;136(1):75-82.
- [122] Wong BH. Invisalign a to z. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2002;121(5):540-1.
- [123] Lagravere MO, Flores-Mir C. The treatment effects of MO, Flores-Mir C. The treatment effects of Invisalign orthodontic aligners: a systematic review. *J Am Dent Assoc* 2005;136:1724–9.
- [124] Vlaskalic V, Boyd R. Orthodontic treatment of a mildly crowded malocclusion using the Invisalign System. *Aust Orthod J* 2001;17:41–6.
- [125] Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign®. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2009;135:27–35.
- [126] Krieger E, Seiferth J, Marinello I, Jung BA, Wriedt S, Jacobs C, Wehrbein H. Invisalign® treatment in the anterior region: were the predicted tooth movements achieved? *J Orofac Orthop.* 2012 Sep;73(5):365-76.
- [127] Krieger E, Seiferth J, Saric I, Jung BA, Wehrbein H. Accuracy of Invisalign® treatments

- in the anterior tooth region. First results. *J Orofac Orthop.* 2011;72(2):141-9.
- [128] Norris RA, Brandt DJ, Crawford CH, Fallah M. Restor- RA, Brandt DJ, Crawford CH, Fallah M. Restorative and Invisalign: a new approach. *J Esthet Restor Dent.* 2002;14(4):217-24.
- [129] Levrini L, Sacerdote P, Moretti S, Panzi S, Caprioglio A. Changes of substance P in the crevicular fluid in relation to orthodontic movement preliminary investigation. *Scientific World Journal.* 2013 Apr 23;2013:896-874.
- [130] Bollen AM¹, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part I: Ability to complete treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003 Nov;124(5):496-501.
- [131] Clements KM, Bollen AM, Huang G, King G, Hujoel P, Ma T. Activation time and material stiffness of sequential removable orthodontic appliances. Part 2: Dental improvements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003 Nov;124(5):502-8.
- [132] Miller RJ, Derakhshan M. The Invisalign system: case report of a patient with deep bite, upper incisor flaring, and severe curve of Spee. *Semin Orthod* 2002;8:43–50.
- [133] Boyd RL. Surgical-orthodontic treatment of two skeletal RL. Surgical-orthodontic treatment of two skeletal Class III patients with Invisalign and fixed appliances. *J Clin Orthod* 2005;39(4):245–58.
- [134] Womack WR. Four premolar extraction treatment with WR. Four premolar extraction treatment with Invisalign. *J Clin Orthod* 2006;40(9):493–500.
- [135] Hönn M, Göz G. A premolar extraction case using the Invisalign system. *J Orofac Orthop* 2006;5:385–94.
- [136] Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the invisalign appliance for moderate to complex malocclusions. *J Dent Educ.* 2008 Aug;72(8):948-67.
- [137] Gay G, Ravera S, Castroflorio T, Garino F, Rossini G, Parrini S, Cugliari G, Deregibus A. Root resorption during orthodontic treatment with Invisalign®: a radiometric study. *Prog Orthod.* 2017 Dec;18(1):12.
- [138] Farouk K, Shipley T, El-Bialy T. Effect of the application of high-frequency mechanical vibration on tooth length concurrent with orthodontic treatment using clear aligners: A retrospective study. *J Orthod Sci.* 2018 Nov15; 7:20.
- [139] Wei Liu, Juhua Shao, Shufang Li, Maher Al-Balaa, Lulu Xia, Hanyue Li, Xianming Hua Volumetric cone-beam computed tomography evaluation and risk factor analysis of external apical root resorption with clear aligner therapy. *Angle Orthod.* 2021;91(5):597-603.
- [140] Eissa O, Carlyle T, El-Bialy T. Evaluation of root length following treatment with clear aligners and two different fixed orthodontic appliances. A pilot study. *J Orthod Sci.* 2018

Jun 6; 7:11.

- [141] Yuan Li, Shiyong Deng , Li Mei , Zhengzheng Li , Xinyun Zhang , Chao Yang and Yu Li. Prevalence and severity of apical root resorption during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances: a cone beam computed tomography study. *Prog Orthod.* 2020;21(1):1.
- [142] Katia Cristina Toyokawa-Sperandio, Ana Cláudia de Castro Ferreira Conti, Thais Maria Freire Fernandes et al. External apical root resorption 6 months after initiation of orthodontic treatment: A randomized clinical trial comparing fixed appliances and orthodontic aligners. *Korean J Orthod.* 2021;51(5):329-336.
- [143] Slim, K., Nini, E., Forestier, D., Kwiatkowski, F., Panis, Y. and Chipponi, J. Methodological index for non-randomized studies (minors): development and validation of a new instrument. *ANZ Journal of Surgery.* 2003; 73:712–716.
- [144] Chang C, Liu Y. Root resorption during orthodontic treatment with aligners. *Chin J Orthod.* 2018;25:191–195.
- [145] Aman C, Azevedo B, Bednar E, et al. Apical root resorption during orthodontic treatment with clear aligners: a retrospective study using cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018;153:842–851.
- [146] Artun J, Van 't Hullenaar R, Doppel D, et al. Identification of orthodontic patients at risk of severe apical root resorption. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;135:448–455.
- [147] Pastro JDV, Nogueira ACA, Salvatore de Freitas KM, et al. Factors associated to apical root resorption after orthodontic treatment. *Open Dent J.* 2018;12:331–339.
- [148] Weltman B, Vig KW, Fields HW, et al. Root resorption associated with orthodontic tooth movement: a systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2010;137:462-476.
- [149] Wang Y, He S, Yu L, et al. Accuracy of volumetric measurement of teeth in vivo based on cone beam computer tomography. *Orthod Craniofac Res.* 2011;14:206–212.
- [150] Durack C, Patel S, Davies J, et al. Diagnostic accuracy of small volume cone beam computed tomography and intraoral periapical radiography for the detection of simulated external inflammatory root resorption. *Int Endod J.* 2011;44:136–147.
- [151] Dudic A, Giannopoulou C, Martinez M, et al. Diagnostic accuracy of digitized periapical radiographs validated against micro-computed tomography scanning in evaluating orthodontically induced apical root resorption. *Eur J Oral Sci.* 2008;116:467–472.
- [152] Dudic A, Giannopoulou C, Leuzinger M, et al. Detection of apical root resorption after orthodontic treatment by using panoramic radiography and cone-beam computed tomography of super-high resolution. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;135:434–437.
- [153] Ren H, Chen J, Deng F, et al. Comparison of cone-beam computed tomography and periapical radiography for detecting simulated apical root resorption. *Angle Orthod.* 2013;

83:189–195.

- [154] Sharpe W, Reed B. Orthodontic relapse, apical root resorption, and crestal alveolar bone levels. *Am J Orthod Dentofac Orthop.* 1987;91(3):252–8.
- [155] Sondejker CFW, Lamberts AA, Beckmann SH, et al. Development of a clinical practice guideline for orthodontically induced external apical root resorption. *Eur J Orthod.* 2020;42:115–124.
- [156] Deng Y, Sun Y, Xu T. Evaluation of root resorption after comprehensive orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a meta-analysis. *BMC Oral Health.* 2018;18:116.
- [157] Vaibhav Gandhi , Shivam Mehta, Marissa Gauthier, Jijian Mu, Chia-Ling Kuo, Ravindra Nanda, Sumit Yadav. Comparison of external apical root resorption with clear aligners and pre-adjusted edgewise appliances in non-extraction cases: a systematic review and meta-analysis. *Eur J Orthod.* 2021;43(1):15-24.
- [158] Roberts WE, Garetto LP, Katona TR. Principles of orthodontic biomechanics: metabolic and mechanical control mechanisms. In: Carlson DS, Goldstein SA, editors. *Bone biodynamics in orthodontic and orthopedic treatment. Monograph 27. Craniofacial Growth Series.* Ann Arbor: Center for Human Growth and Development; University of Michigan; 1992. p. 231-55.
- [159] Tuncay, O. C. *The Invisalign system.* London : Quintessence Publishing, 2006.
- [160] Hahn, W., H. Dathe, J. Fialka-Fricke, S. Fricke-Zech, A. Zapf, D. Kubein-Meesenburg, et R. Sadat-Khonsari. Influence of thermoplastic appliance thickness on the magnitude of force delivered to a maxillary central incisor during tipping. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;136(1):12.e1-7; discussion 12-3.
- [161] Kwon JS, Lee YK, Lim BS, Lim YK. Force delivery properties of thermoplastic orthodontic materials. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;133(2):228-34; quiz 328.e1.
- [162] Consolaro A. Why not to treat the tooth canal to solve external root resorptions? Here are the principles! *Dental Press J Orthod.* 2016;21(6):20-5.
- [163] Joseph H. Noar, Sona Pabari Cone beam computed tomography – current understanding and evidence for its orthodontic applications? *J Orthod.* 2013;40(1):5-13.
- [164] Kapila SD, Nervina JM. CBCT in orthodontics: assessment of treatment outcomes and indications for its use. *Dentomaxillofac Radiol.* 2015;44(1):20140282.

ANNEXES

Productions scientifiques

1- PUBLICATIONS:

"Resorption of maxillary incisors after orthodontic treatment – clinical study of risk factors"

Rajae ELHADDAOUI, Hicham BENYAHIA, Mohamed-Faouzi AZEROUAL, Fatima ZAOUI, Rachid RAZINE, Loubna BAHJE

International Orthodontics 2016; 14: 48-64

Prix de la meilleur Publication pour l'année 2016 décerné lors du 4^{ème} Congrès International de l'Association des Dentistes Internes et Résidents de Rabat (10-11-12 Février 2017, Rabat)

Summary

Introduction: External apical root resorption (EARR) is one of the major problems associated with orthodontic treatment. Such lesions represent an iatrogenic risk that must be detected as early as possible, with regular radiological follow-up and appropriate therapeutic precautions. The causes and mechanisms leading to susceptibility to root resorption following the application of an orthodontic force are often not clear and are generally said to be of multifactorial origin. The aim of this clinical study was to analyze the factors linked to the occurrence of moderate to severe resorption (MSR) of upper incisors during orthodontic treatment in a group of Moroccan patients treated in the Dento-Facial Orthopedic Department of the Dental Consultation and Treatment Center (Centre de consultation et de traitements dentaires [CCTD]) in Rabat.

Material and methods: A total of 82 patients (28% males, 72% females) aged between 12 and 27, with various malocclusions, who had been treated with fixed appliances for at least 1 year and for whom panoramic X-rays at the start, during and at the end of treatment were available, were selected randomly. The reduction in maxillary incisor root length was evaluated using resorption scores. The factors studied in relation to the risk of occurrence of MSR were: age, sex, treatment duration, extraction or non-extraction, type of malocclusion (Class I archlength discrepancy, Class II, Class III), the vertical diagnosis (normal, supraocclusion, open bite), presence of dysfunction, impacted canines and root morphology. Statistical analysis was performed using SPSS software, version 18.0. Statistical tests used were: Kaplan-Meier analysis and the univariate and multivariate Cox models for the study of factors associated with MSR. The threshold of significance adopted was 0.05.

Results: The factors that were significantly associated with the occurrence of MSR at the level of the upper incisors were: tooth type, with a greater risk for the lateral incisor (HR = 3.2 95% CI [2.3–4.5] P < 0.001), treatments with extraction (HR = 1.64 95% CI [1.16–2.33] P < 0.05), the presence of supraocclusion (HR = 2.17 95% CI [1.33–3.53] P < 0.05) or open bite (HR = 3.12 95% CI [1.66–5.86] P < 0.001) and root malformation (HR = 1.5 95% CI [1.09–2.07] P < 0.05). Age, sex, type of malocclusion, dysfunction and impaction of canines were not associated at a statistically significant level with the risk of occurrence of MSR of the upper incisors.

Conclusion: EARR is difficult to avoid; the orthodontist's role remains crucial in identifying risk factors so as to adopt a treatment strategy taking these factors into account. In our population, the risk of MSR in the upper incisors appeared to increase in treatments with extraction, situations of supraocclusion or open bite, and in the presence of root abnormalities. Finally, clinical recommendations for the prevention of the occurrence of MSR of the maxillary incisors are proposed, taking into account all the risk factors identified

"Orthodontic aligners and root resorption: A systematic review"

Rajae ELHADDAOUI, Halima Saadia QORAICH, Loubna BAHIJJE, Fatima ZAOUI

International Orthodontics 2017 ; 15: 1-12

Prix de la meilleure publication, édition 2017, catégorie doctorant, décerné lors de la 8ème journée de la recherche à la Faculté de Médecine Dentaire – Rabat (19 Avril 2018)

Summary

Introduction: Root resorption is one of the leading problems in orthodontic treatment. Most earlier studies have assessed the incidence and severity of root resorption following orthodontic treatment using fixed appliances as well as associated factors.

However, few studies have assessed these parameters in the context of orthodontic treatment using thermoplastic splints or aligners. The aim of this systematic review was to assess the incidence and severity of root resorption following orthodontic treatment using aligners and associated factors. A comparative analysis was also made with fixed multi-bracket treatments.

Materials and methods:

The data bases consulted were:

Medline, Embase, EBSCO Host, Cochrane Library and Science Direct. Our search included meta-analyses, randomized and non-randomized controlled trials, cohort studies and descriptive studies that have highlighted the incidence and severity of root resorption following orthodontic treatment using aligners alone or compared with fixed multi-bracket treatments.

Results: Among the 93 selected references, only 3 studies met our selection criteria. The incidence of root resorption ranged

between 0 and 46%, of which 6% were severe cases. Relative to fixed multi-bracket non-extraction treatments to correct the same malocclusions, the incidence of resorption ranged between

2% and 50%, of which 22% were severe cases. In both techniques, the incidence of resorption was higher for the maxillary incisors and was not influenced by either age or sex.

Conclusion: In malocclusion cases not requiring extractions, orthodontic aligner treatment is possibly associated with a lower incidence of resorption than fixed multi-bracket treatment. Further research encompassing extraction cases is needed to better assess the incidence and severity of root resorption following the use of these removable appliances.

2- COMMUNICATIONS ORALES:

1. « Les résorptions radiculaires externes des incisives maxillaires après traitement orthodontique: étude clinique des facteurs de risque »

R. ELHADDAOUI, H. BENYAHIA, W.RERHRHAYE, F. ZAOUI, L.BAHIJE

6^{ème} congrès international de l'Association des Dentistes Internes et Résidents de Casablanca.
(10-11-12 Avril 2015, Casablanca)

2. « Les résorptions modérées à sévères des incisives maxillaires après traitement orthodontique: étude clinique des facteurs de risque »

R. ELHADDAOUI, H. BENYAHIA, MF. AZAROUAL, F. ZAOUI, R. RAZINE, L.BAHIJE

18^{èmes} Journées de l'Orthodontie.
(06-09 Novembre 2015, Paris)

3. « Incidence et sévérité des résorptions radiculaires après traitement orthodontique: étude clinique et revue systématique »

R. ELHADDAOUI, H. BENYAHIA, MF. AZAROUAL, F. ZAOUI, R. RAZINE, L.BAHIJE

7^{ème} Journée de la recherche.
(20 avril 2017, Rabat)

8^{ème} journée de la recherche sous le thème: « Ecosystème oral: un carrefour de la recherche biomédicale ». Faculté de Médecine Dentaire de Rabat, le 19 Avril 2018.

- ❖ Dans le cadre de cette journée, nous avons participé par une **communication orale** intitulée: « Modèle de prédiction de la génioplastie d'avancée dans le cas de chirurgie bimaxillaire des classes III »
- ❖ Notre communication a reçu le **1er prix de la meilleure communication orale**.

9ème journée de la recherche sous le thème: « La recherche biomédicale au service de la pratique clinique ». Faculté de Médecine Dentaire de Rabat, le 18 Avril 2019.

- ❖ Dans le cadre de cette journée, nous avons participé par une **communication orale** intitulée: « L'orthodontie de l'adulte et le bruxisme »
- ❖ Nous avons également reçu **le prix de la meilleure publication, édition 2018, catégorie Enseignant, pour l'article intitulé « Modèle de prédiction de la génioplastie d'avancée dans le cas de chirurgie bimaxillaire de classe III » publié dans l'international orthodontics 2018;16:530-544.**

RESUME

Titre: Etude des Facteurs de la Résorption Radiculaire en Orthodontie chez la Population Marocaine

Auteur: Rajae ELHADDAOUI

Introduction:

Cette étude clinique, qui est la première au Maroc, avait pour objectif d'analyser les facteurs liés à la survenue et la sévérité des résorptions radiculaires des incisives maxillaires durant le traitement orthodontique, chez un échantillon de la population marocaine traitée au Service d'Orthopédie Dento-Faciale au Centre de Consultations et de Traitements Dentaires (CCDT) de Rabat.

Matériels et méthodes:

C'est une étude de cohorte rétrospective réalisée chez 82 patients sélectionnés au hasard. On a étudié l'association entre différents facteurs et le risque de survenue et la sévérité des résorptions au niveau des incisives maxillaires. L'analyse statistique a été réalisée par le logiciel SPSS version 18.0, les tests statistiques utilisés sont: la méthode de Kaplan-Meier et le modèle de Cox uni varié et multivarié.

Résultats:

La prévalence des résorptions radiculaires dans notre échantillon était de 95%. Les résorptions modérées à sévères (RMS) présentaient 59,3%. Les facteurs significativement associés aux RMS étaient: le type de dents ($p < 0,001$), les traitements avec extractions ($p < 0,05$), la supraclusion ($p < 0,05$), la béance ($p < 0,001$) et la dysmorphie radiculaire ($p < 0,05$). Pour le traitement avec des gouttières, la prévalence des résorptions radiculaires variait de 41% jusqu'à 100% dans certaines études, prédominée par des résorptions légères (1mm à 2 mm) alors que les résorptions sévères présentaient 0,62% à 6%.

Conclusion:

Les gouttières thermoplastiques pourraient être à l'origine de résorptions radiculaires après traitement orthodontique mais qui restent moins sévères comparativement à celles rapportées avec les traitements multi-attaches fixes.

Mots-clés: résorption radiculaire, sévérité, traitement orthodontique fixe, aligneurs

ABSTRACT

Title: Study of Root Resorption Factors in Orthodontics within Moroccan Population

Author: Rajae ELHADDAOUI

Introduction

This clinical study, which is the first in Morocco, aimed to analyze the factors related to the occurrence and severity of root resorptions of upper incisors during orthodontic treatment, in a sample of the Moroccan population treated in the Dento-Facial Orthopedic Department of the Dental Consultation and Treatment Center (Centre de consultation et de traitements dentaires [CCTD]) in Rabat.

Material and methods:

This is a retrospective cohort study performed in 82 randomly selected patients. We studied the association between various factors and the risk of occurrence and severity of resorptions in the maxillary incisors. Statistical analysis was performed using SPSS software, version 18.0. Statistical tests used were: Kaplan-Meier analysis and the univariate and multivariate Cox models.

Results:

The prevalence of external apical root resorptions in our sample was 95%. Moderate to severe resorption (MSR) were 59.3%. The factors that were significantly associated with the occurrence of MSR in the maxillary incisors were: tooth type ($p < 0.001$), treatments with extraction ($p < 0.05$), overbite ($p < 0.05$), open bite ($p < 0.001$) and root malformation ($p < 0.05$). For the orthodontic treatment with splints, the prevalence of root resorptions varied from 41% up to 100% in some studies, predominated by light resorptions (1mm to 2 mm) while severe resorptions presented 0.62% at 6%.

Conclusion:

Thermoplastic splints could cause root resorptions after orthodontic treatment, but these remain less severe compared to those reported with fixed multi-bracket treatments.

Keywords: root resorption, severity, fixed orthodontic treatment, aligners

Structure de Recherche : Équipe de Recherche en Biomatériaux et Biomarqueurs Salivaires