

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

ANNEE 2023

2023 TOU3 3026

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Nineb ODESHO

Le 12 mai 2023

**DIAGNOSTIC RADIOLOGIQUE DES RESORPTIONS RADICULAIRES
EXTERNES EN ORTHODONTIE**

Directeurs de thèse :

Dr Maxime ROTENBERG

Dr Marie GURGEL-GEORGELIN

JURY

Président: Pr Frédéric VAYSSE
1er assesseur: Dr Maxime ROTENBERG
2ème assesseur: Dr Marie GURGEL-GEORGELIN
3ème assesseur: Dr Carole VARGAS JOULIA



Faculté de santé
Département d'Odontologie

➔ **DIRECTION**

Doyen de la Faculté de Santé

M. Philippe POMAR

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

Mme Sara DALICIEUX-LAURENCIN

Directeurs Adjointes

Mme Sarah COUSTY
M. Florent DESTRUHAUT

Directrice Administrative

Mme Muriel VERDAGUER

Présidente du Comité Scientifique

Mme Cathy NABET

➔ **HONORARIAT**

Doyens honoraires

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

Chargés de mission

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

➔ **PERSONNEL ENSEIGNANT**

Section CNU 56 : Développement, Croissance et Prévention

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

ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE

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

ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

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

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

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

Section CNU 57 : Chirurgie Orale, Parodontologie, Biologie Orale

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

PARODONTOLOGIE

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

CHIRURGIE ORALE

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

BIOLOGIE ORALE

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

Section CNU 58 : Réhabilitation Orale

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

DENTISTERIE RESTAURATRICE, ENDODONTIE

Professeur d'Université : M. Franck DIEMER
Maîtres de Conférences : M. Philippe GUIGNES, Mme Marie GURGEL-GEORGELIN, Mme Delphine MARET-COMTESSE
Assistants : Mme Sophie BARRERE, M. Ludovic PELLETIER
M. Nicolas ALAUX, M. Vincent SUAREZ, M. Loris BOIVIN
Adjoints d'Enseignement : M. Eric BALGUERIE, M. Jean- Philippe MALLET, M. Rami HAMDAN, M. Romain DUCASSE, Mme Lucie RAPP

PROTHÈSES

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

FONCTIONS-DYSFONCTIONS, IMAGERIE, BIOMATERIAUX

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

Mise à jour pour le 05 Avril 2023

REMERCIEMENTS

Je tiens particulièrement à remercier :

Mes parents, sans qui je ne serais pas là où je suis aujourd'hui. Vous avez tant sacrifié pour l'avenir de vos enfants et je ne pourrais jamais vous le rendre. Maman, tu es la personne la plus réfléchie, la plus intelligente, la plus humble et la plus gentille que je n'aie jamais connue. L'amour que tu m'as témoigné et que tu continues à me témoigner a façonné toute ma vie. Je t'aime énormément. Papa, pour ton courage, ton altruisme et ta générosité. Tu as toujours été là pour moi et tu m'as encouragé à ta manière. Je t'aime.

Ma sœur, Omta. Tu as été la grande sœur exemplaire. Je n'oublierai jamais notre après-midi à Istanbul sur le balcon de notre appartement juste avant que tu ne partes. **Ithy**, le petit dernier de la famille. *Looking forward to seeing you grow up in our family.* **Mon frère, Atra**. J'admire ton insouciance dans la vie. **Mon frère, Nenara**. Tu aurais pu être là où je suis aujourd'hui si la vie ne t'avait pas mis des bâtons dans les roues. Le reste de ma famille, du côté de mon père ou de ma mère, pour votre encouragement.

Les **QPM**. Ces études n'auraient pas été les mêmes sans vous. J'ai adoré chaque instant : de nos repas où l'on mangeait au RU à nos restaurants chics aujourd'hui où l'on critique les vins comme si on était des sommeliers aguerris. **Barbs**, tu as toujours les bons mots. Ta gentillesse est contagieuse. Tu es une partenaire de danse hors pair. Arrête de voyager reviens nous faire un gros câlin. **Manue**, ta maturité continue de m'impressionner. Je peux toujours compter sur toi pour rigoler à mes blagues nulles. On va encore faire beaucoup de concours du regard. **Yona**, ma binôme préférée. Tu me fais toujours autant rire avec ta franchise et ton amour pour les moutons. L'externat fut bref mais intense à tes côtés. Merci pour tous ces moments précieux (à base de malaises vagues et de Kétac Cem bien préparé). Dans 20 ans, je nous imagine tous les quatre voisins de quartier à la *Desperate Housewives*, à se consoler sur nos problèmes futiles.

Alex et Adam. Les troupes existent bel et bien ! Je ne peux pas imaginer refaire cet internat sans vous. **Adam**, ton intelligence kinesthésique supérieure ne cesse de m'impressionner. Tes blagues me font toujours autant rire (intérieurement). Merci de m'avoir entraîné au sport avec toi. **Alexia**, j'admire ta joie, ta bonne humeur et ces soirées enflammées sur le dancefloor (debout ou pas). J'adore manger du chocolat avec toi pendant qu'Adam développe ses performances athlétiques et son humour plus que redoutable. Vous avez rendu cet internat (à base de chevrons, de boîtes et de gin) exceptionnel. Vous n'avez pas intérêt à m'oublier quand vous serez au fin fond de la campagne avec Jake et Ambre.

Popo. Cette folle aventure a commencé avec toi. C'est bon : nous, simples humains, on arrive à la fin. A tous nos souvenirs ensemble et ce beau jour ensoleillé où l'on s'est adressé la parole. **Sarah**. La préparation du concours n'aurait pas été la même sans ta joie, ta bonne humeur, ton énergie débordante et ton appartement de CROUS pendant le confinement. Heureusement qu'on s'est parlé ce soir-là à la danse. On a encore beaucoup de choses à faire ensemble !

Alix. Tu es une boule d'amour, de gentillesse et de joie. On se donne rendez-vous à Nouméa en novembre 2024. Imagine-nous sur la plage avec nos cocktails chocolatés à souhait.

Mes amis de promo' : **Tildou, Clara, Léa, Owen et Nico**. J'ai adoré ces études avec nos soirées et RU passés ensemble. On n'oubliera pas les soirées cinéma dans mon appartement de 18m².

Mes deux binômes d'internat: **Corentin**, de m'avoir transmis ta passion pour Toulouse, cette ville culturellement riche. **Clément**, tu as renforcé mes défenses immunitaires. Tu vas en ressortir enrichi de cet internat et moi aussi.

Juju (à bientôt sur la côte !), la **Troupe**, les **Lynx** et mes **co-internes** passés et actuels. Pour tous ces moments qu'on a vécus ensemble.

Mon dentiste traitant quand je suis arrivé en France, Dr INGARGIOLA Marc à Carcassonne. Vous n'êtes probablement pas au courant, mais c'est grâce à mon stage de 3^{ème} dans votre cabinet que j'en suis là aujourd'hui.

La personne qui se reconnaîtra ; d'avoir été là pendant les hauts et les bas. « *Il faut positiver !* » : toujours.

Au président de jury de thèse :

VAYSSE Frédéric

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier

Je suis très honoré que vous ayez accepté de présider ce jury. Je vous remercie pour votre implication dans notre cursus d'odontologie. Je retiendrai les vendredis passés avec vous à l'hôpital des enfants en AG lors de mon externat. Veuillez trouver au travers de ce manuscrit le témoignage de mon profond respect.

Au directeur de thèse :

ROTENBERG Maxime

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Spécialiste qualifié en Orthopédie Dento-Faciale, (CECSMO)
- Docteur en mathématiques de l'Université Paul Sabatier
- Ancien Président de la Société Bioprogressive Ricketts
- Ancien Coordinateur Inter-Régional DES ODF

Je vous remercie d'avoir accepté de diriger ce travail. Vous m'avez guidé dans mon cursus tout au long de ces années. Vous avez su me transmettre votre passion dès la deuxième année d'odontologie avec votre enseignement théorique et jusqu'à aujourd'hui en clinique. Ce fut un plaisir d'apprendre la spécialité d'ODF à vos côtés. Je vous remercie spécialement pour votre rigueur, ainsi que votre écoute et votre disponibilité, qualités inestimables chez un enseignant. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de ma reconnaissance et de mon profond respect.

A la directrice de thèse :

GURGEL-GEORGELIN Marie

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie Dentaire
- Maîtrise des Sciences Biologiques et Médicales
- D.E.A. MASS Lyon III
- Ancienne Interne des Hôpitaux
- Doctorat d'Université - Université d'Auvergne-Clermont

Vous m'avez fait l'immense plaisir d'avoir accepté de diriger ce travail. « Pour être un bon praticien, il faut trois choses : savoir, savoir-être et savoir-faire » : je conserverai précieusement ces paroles que vous avez prononcées au début de mon cursus. Elles me guideront tout au long de ma carrière.

Je vous remercie chaleureusement pour votre disponibilité, votre patience, votre bonne humeur et l'intérêt que vous avez porté à ce travail. Je me souviendrai de la qualité de vos enseignements. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde estime et sincère sympathie.

Au jury de thèse:

VARGAS JOULIA Carole

- Assistante Hospitalo-Universitaire d'Odontologie
- Docteur en Chirurgie-Dentaire
- Ancienne Interne des Hôpitaux de Toulouse
- Diplôme d'Etudes Spécialisées en Orthopédie Dento-Faciale
- Master 1 Santé en Biologie Cellulaire à la Faculté V Paris Descartes

Vous me faites l'immense plaisir d'avoir accepté de siéger à ce jury. Vos conseils furent précieux pour mener à bien les traitements des patients. Vous m'avez beaucoup apporté tout au long de mon internat. Je vous remercie pour votre bonne humeur, votre calme et votre disponibilité.

TABLE DES MATIERES

ABBREVIATIONS	12
Introduction.....	13
I. Généralités	14
1. Définitions.....	14
1.1. Tissus dentoalvéolaires concernés par le phénomène de résorption.....	14
1.2. Définition de la résorption radiculaire	14
2. Remaniement osseux en orthodontie	15
2.1. Électricité biologique.....	15
2.2. Pression-tension du desmodonte	16
3. Mécanismes de résorption et de réparation radiculaire	19
3.1. Résorption radiculaire	19
3.2. Réparation/cicatrisation radiculaire.....	20
4. Classifications des résorptions radiculaires externes	25
4.1. Selon le diagnostic pathologique	25
4.2. Selon le diagnostic étiologique.....	25
4.3. Selon la localisation.....	25
5. Statistiques.....	31
5.1. Évaluation de la longueur radiculaire.....	31
5.2. Évaluation volumétrique.....	32
6. Étiologies des résorptions	33
II. Examens radiologiques et diagnostic des resorptions radiculaires.....	36
1. Optimisation.....	36
1.1. Définitions	36
1.2. Radioprotection.....	37
2. Examens radiologiques systématiques en orthodontie	39
2.1. Orthopantomogramme ou cliché panoramique dentaire.....	39
2.2. Téléradiographie de profil.....	41
3. Examens complémentaires : intérêt en ODF pour le diagnostic des résorptions	42
3.1. La tomographie volumique à faisceau conique (CBCT)	42
3.2. Rétroalvéolaires	44
3.3. Cliché occlusal	47
3.4. Cliché latéral.....	48
3.5. Microscopie.....	48
3.6. Microtomographie aux rayons X.....	48
III. Comparaison et discussion	49
1. CBCT : quand le prescrire ? quelle précision ?	49
2. Microtomographie à rayons X – microscopie : exploration ex vivo	55
3. La région apicale.....	58
4. Les résorptions cervicales	60

5. Interruption temporaire du traitement orthodontique	61
IV. Gestion clinique	64
1. Avant le traitement	64
2. Pendant le traitement	64
3. Après le traitement.....	65
Conclusion	67
Listes des illustrations et tableaux	68
Bibliographie	70

ABBREVIATIONS

CBCT : Tomographie volumique à faisceau conique (Cone Beam Computed Tomography)

HAS : Haute Autorité de Santé

IC : intervalle de confiance (ex : IC95% - intervalle de confiance à 95%)

LAD : ligament alvéolo-dentaire ou desmodonte

ODF : orthopédie dento-faciale

RR : résorptions radiculaires

RRA : raccourcissement radiculaire apical

RRE : résorptions radiculaires externes

RRAE : résorptions radiculaires apicales externes

RRIOO/OIIRR : résorption radiculaire inflammatoire d'origine orthodontique (*orthodontically induced inflammatory root resorption*)

INTRODUCTION

La résorption radiculaire est un processus pathologique inflammatoire qui conduit à la disparation partielle ou totale des tissus radiculaires de la dent [1], [2].

L'orthodontie utilise le système inflammatoire de l'organisme pour résoudre des problèmes fonctionnels et esthétiques. Les résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique sont un des effets secondaires les plus communs et délétères de ce mouvement dentaire. Elles peuvent compromettre la longévité de la dent, la stabilité du traitement et induire une mobilité non physiologique des dents concernées [3]. Des résorptions radiculaires apicales graves (5mm ou plus) existeraient chez environ 5% des patients traités en orthodontie selon Killiany [4].

La résorption radiculaire étant un phénomène tridimensionnel, son diagnostic par des clichés radiographiques en deux dimensions peut contenir des limites [5]. Il n'existe actuellement pas de gold-standard *in vivo* pour le diagnostic des résorptions radiculaires [6].

Plusieurs termes sont utilisés dans la littérature [1], [7]–[9]: *external root resorption* ; *external apical root resorption* ; *external inflammatory resorption*; *root shortening*; *orthodontically induced inflammatory root resorption* etc. Ce dernier terme, pouvant se traduire par *résorption radiculaire inflammatoire d'origine orthodontique (RRIOO)*, nous semble adapté. Il faut distinguer deux types de résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique : les résorptions apicales et les autres types de résorptions externes.

La compréhension du phénomène de résorption radiculaire est nécessaire pour la prévention et le diagnostic précoce en cours de traitement orthodontique. Cela permet de prendre les décisions adaptées pendant et après le traitement [10].

L'objectif de ce travail est d'évaluer la pertinence des différents examens radiologiques dans le diagnostic des résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique, et plus précisément lors d'une prise en charge par appareillage fixe (multiattaches). Nous aborderons dans un premier temps quelques généralités et rappels pouvant s'avérer utiles dans la deuxième partie, qui se concentrera sur le diagnostic des résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique avant de finir par une discussion sur les données de la littérature et la gestion clinique de ces résorptions.

I. GENERALITES

1. Définitions

1.1. Tissus dentoalvéolaires concernés par le phénomène de résorption

Ligament alvéolo-dentaire ou **desmodonte** : tissu conjonctif d'une épaisseur de 100 à 400 µm qui relie le cément dentaire à l'os alvéolaire [11]. C'est un tissu très vasculaire constitué de fibres, de terminaisons nerveuses et d'éléments cellulaires multiples [12].

Cément : tissu minéralisé couvrant la dentine radiculaire ; constitué d'une partie acellulaire cervicale (cément primaire) et d'une partie cellulaire apicale et au niveau des furcations (cément secondaire). C'est un tissu avasculaire présentant une apposition continue tout au long de la vie [13].

Os alvéolaire : tissu conjonctif minéralisé, vasculaire, innervé, constitué d'une matrice organique (cellules, fibres...) et inorganique (phosphate, calcium...) constituant le support des dents au niveau du maxillaire et de la mandibule. Il est soumis au remodelage physiologique. Il est constitué de deux plaques d'os cortical séparées par de l'os spongieux [14].

Dentine : tissu minéralisé avasculaire de la dent, support l'émail et enfermant la chambre pulpaire, constitué de 60% de matière inorganique (apatite) et 40% de matière organique. Elle est organisée en tubuli qui irradiant de la pulpe vers l'émail et le cément. Les odontoblastes restent actifs au bout des tubuli dans la partie la plus pulpaire de la dentine pour assurer la sensibilité pulpaire [15].

1.2. Définition de la résorption radiculaire

Il s'agit d'un processus pathologique conduisant à la disparition graduelle, partielle ou totale, des tissus radiculaires de la dent [1], [8].

L'American Association of Endodontists définit les résorptions comme « un état associé à un processus physiologique ou pathologique provoquant une perte de tissu dentaire, cémentaire ou osseux ». Le terme de rhizalyses est parfois également utilisé. Cependant, la majorité des auteurs considèrent aujourd'hui les résorptions comme un processus pathologique et les rhizalyses comme un processus physiologique [16].

Les résorptions peuvent avoir un point de départ pulpaire, on parle de résorption interne ; ou de la surface radiculaire de la dent, on parle de résorption externe [17].

Une résorption radiculaire externe inflammatoire peut se produire n'importe où sur la surface radiculaire où il y a une attache parodontale. Celle se produisant au niveau de l'apex intéresse plus particulièrement les orthodontistes [18].

La résorption radiculaire détectable histologiquement est une étape préliminaire de la résorption radiculaire apicale externe détectable par radiographies conventionnelles [19]. Ainsi, le phénomène se détecte tardivement et fortuitement au niveau radiologique alors qu'il a démarré plus tôt d'un point de vue tissulaire.

Dans ce travail, nous nous concentrerons sur les résorptions externes associées au traitement orthodontique.

2. Remaniement osseux en orthodontie

Les forces orthodontiques conduisent à un processus local caractérisé par toutes les étapes de l'inflammation : rougeur, chaleur, tumeur (ou œdème), douleur. Cette inflammation sans composante infectieuse est indispensable pour le mouvement dentaire [20]. S'en suit alors un remodelage du ligament parodontal et de l'os alvéolaire [7].

Proffit et al. [21] décrivent deux théories de contrôle biologique du mouvement dentaire : l'électricité biologique et la pression-tension du desmodonte. Cette dernière joue un rôle majeur dans le déplacement orthodontique des dents. Par souci de clarté, nous nous concentrerons sur la théorie de la pression-tension du desmodonte.

2.1. Électricité biologique

Des phénomènes de piézoélectricité, mouvements des ions et autres types de signaux brefs induits par le stress sont décrits, mais sont peu applicables aux forces constantes ou durables délivrées en orthodontie [21]. Des études chez les animaux ont montré une amélioration du taux de mouvement dentaire avec un champ électromagnétique mais cela n'a pas été démontré chez l'homme [22], [23].

2.2. Pression-tension du desmodonte

L'application d'une force durable sur la dent modifie sa position dans l'espace desmodontal, produisant une compression de ce ligament dans certaines zones et un étirement dans d'autres. Sous l'effet mécanique sur les cellules du desmodonte, une libération de cytokines, prostaglandines et autres médiateurs chimiques se produit. Le flux sanguin est également modifié : diminué dans les zones de compression, et augmenté dans les zones d'étirement. De ce fait, l'environnement chimique se trouve altéré (différents niveaux d'oxygène et de dioxyde de carbone). Ces phénomènes ont ensuite des effets sur la différenciation et l'activité cellulaire (ostéoblastes, ostéoclastes) [21].

Par la suite, deux phénomènes de remodelage osseux sont décrits en fonction des forces appliquées.

2.2.1. Forces légères et durables

La dent bouge dans l'alvéole en quelques secondes. Le flux sanguin diminue dans le desmodonte partiellement comprimé. Ces phénomènes conduisent à une activité cellulaire différente. En quelques heures, des niveaux élevés d'adénosine monophosphate cycliques (cAMP), molécule impliquée dans la différenciation cellulaire, sont observés [24]. Les ostéoclastes sont recrutés en deux vagues : une première pouvant être dérivée de la population de cellules locales, et une deuxième provenant du flux sanguin. Ces cellules attaquent la lamina dura de l'alvéole du côté de la compression desmodontale, résorbant l'os dans un processus de « **résorption frontale** » et le mouvement dentaire s'initie. En parallèle, avec un léger retard par rapport aux ostéoclastes, les ostéoblastes commencent le processus la formation d'os dans les zones de tension [25], [21].

2.2.2. Forces lourdes et durables

Quand les forces sont trop importantes, il se produit une occlusion totale des vaisseaux dans le desmodonte, coupant le flux sanguin. Une nécrose cellulaire stérile se produit sans phénomènes de stimulation cellulaire tels que décrit ci-dessus. Histologiquement, une zone avasculaire dénuée de cellules est observée dans le desmodonte, communément appelée **zone hyaline** du fait de son apparence. Cependant, il faut la dissocier du tissu conjonctif hyalin [21], [26].

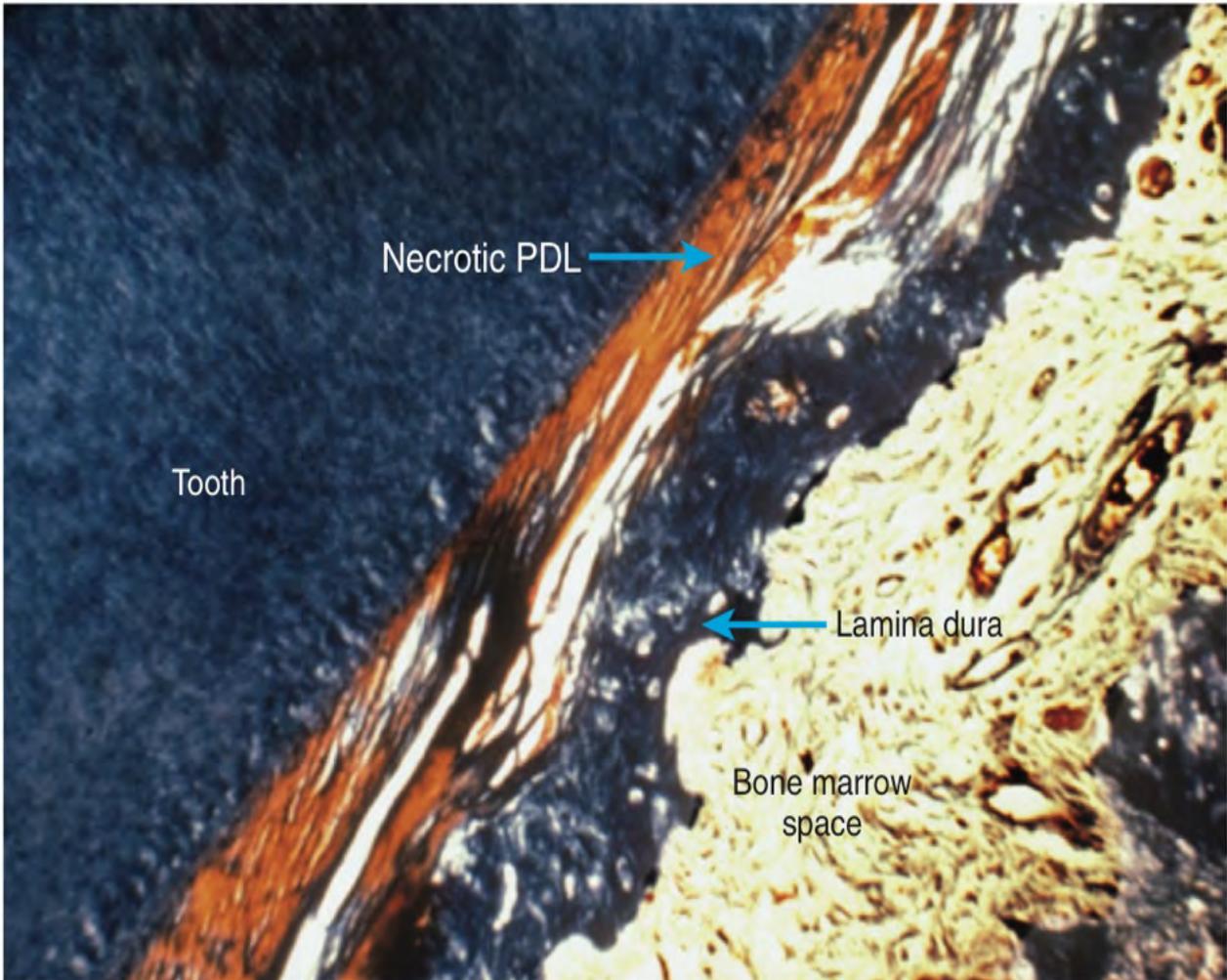


Figure 1: Coupe histologique du desmodonte (PDL) comprimé après plusieurs jours d'application de forces. Notez la bordure irrégulière de la lamina dura du côté de la moelle osseuse, résultat de la résorption par les ostéoclastes. (Proffit et al.) – *tooth* : dent ; *necrotic PDL* ou *periodontal ligament* : desmodonte nécrotique ; *lamina dura* : lamina dura ; *bone marrow space* : moelle osseuse.

Le remodelage osseux ne pouvant se faire directement de cette zone nécrotique, une infiltration cellulaire de la zone hyaline se produit au bout de quelques jours. Des ostéoclastes provenant des espaces de moelle osseuse résorbent l'os adjacent ; ce processus est décrit comme « **résorption sous-jacente** », puisque la résorption se fait « sous » la lamina dura de l'alvéole. Le mouvement des dents est plus lent comparé au processus de résorption frontale car :

- il y a un délai plus long de stimulation et de différenciation des cellules adjacentes à la zone hyaline ;
- une épaisseur d'os alvéolaire importante doit être résorbée avant qu'un mouvement ne se produise.

On comprend donc pourquoi il serait judicieux d'éviter le phénomène de nécrose. Il est cependant cliniquement inévitable d'avoir des zones avasculaires, même en appliquant des forces légères ; ainsi, le mouvement dentaire se fait par association des deux mécanismes décrits [21].

La réponse du ligament alvéolo-dentaire est déterminée non seulement par la force, mais par la *force par unité de surface*, donc la **pression**. Pour les forces optimales, il faut prendre en compte le mouvement orthodontique envisagé et le type de dent. *Proffit et al.* réalisent un tableau qui résume les forces nécessaires pour effectuer un type de mouvement particulier. Cela permet ainsi de clarifier les notions de forces légères et lourdes dont il est question dans la littérature mais qui restent peu définies [21]. Le tableau traduit de l'anglais est reproduit dans ce travail.

<i>Type de mouvement</i>	<i>Force¹ (gm)</i>
<i>Tip</i>	35-60
<i>Translation pure/gression</i>	70-120
<i>Torque</i>	50-100
<i>Rotation</i>	35-60
<i>Egression/extrusion</i>	35-60
<i>Ingression/intrusion</i>	10-20

Tableau 1: Forces optimales pour le mouvement orthodontique / ¹Les valeurs dépendent de la taille des dents : les petites valeurs sont adaptées pour les incisives, les grandes valeurs pour les dents pluriradiculées (Proffit et al.).

3. Mécanismes de résorption et de réparation radiculaire

3.1. Résorption radiculaire

Plusieurs cellules sont impliquées dans le processus de résorption radiculaire ; notamment, les odontoclastes/cémentoclastes dont les caractéristiques morphologiques et fonctionnelles sont très similaires aux ostéoclastes [27]. Les odontoclastes/ostéoclastes dérivent d'une lignée similaire de cellules souches hématopoïétiques (lignée de monocyte-macrophage), impliquant un processus de prolifération de cellules mononucléaires, de fusion et de différenciation sous l'influence de plusieurs facteurs moléculaires, cellulaires et protéiniques (RANKL, RANK, OPG, M-CSF...) [19], [26], [28].

Contrairement aux ostéoclastes qui font partie intégrante de la structure osseuse et sont impliqués dans la physiologie osseuse, les odontoclastes sont rarement présents à la surface radiculaire ou sur le ciment dans des conditions physiologiques [19].

Brudvik et Rygh [29]–[31] montrent dans une étude expérimentale chez le rat que le ciment adjacent à la zone hyaline lors du mouvement dentaire est « marqué » par ce contact et que les cellules clastiques l'attaquent une fois la réparation du ligament alvéolo-dentaire achevée. Ils démontrent que les résorptions radiculaires sont notamment observées dans les zones hyalines [32].

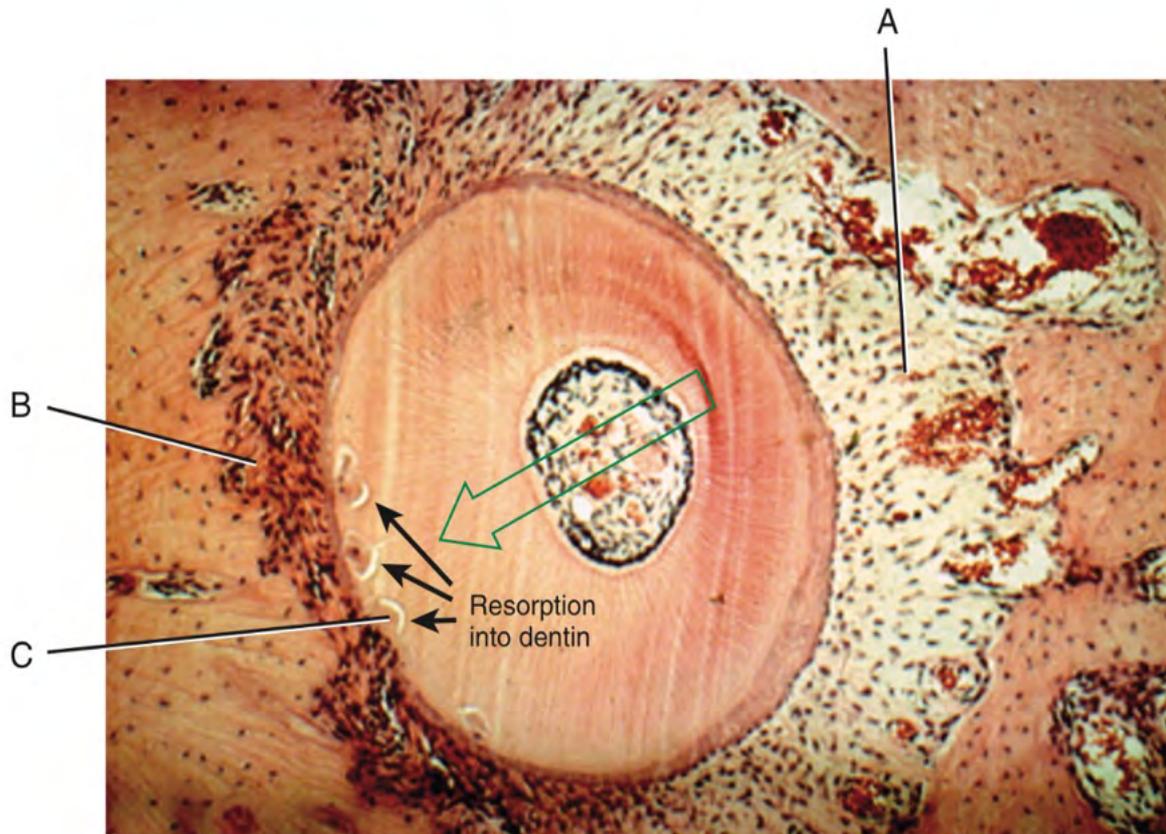


Figure 2: Section coronaire de l'os alvéolaire d'une racine de prémolaire bougée vers la gauche (grande flèche centrale). Notez la zone de compression du desmodonte à gauche et de dilatation à droite. Notez également la dilatation des vaisseaux à droite et l'activité ostéoblastique (A). Des cellules ostéoclastiques sont présentes à gauche (B). Zones de résorption radiculaire dans la dentine, qui seront par la suite réparées par apposition cémentaire (C) (Proffit et al.).

3.2. Réparation/cicatrisation radiculaire

3.2.1. Cicatrisation des lacunes de résorption

Il existe au niveau radiculaire des couches protectrices qui empêchent le phénomène de résorption en situation physiologique. Elles sont constituées par le ligament alvéolo-dentaire et le ciment pour les résorptions radiculaire externes [3], [33].

Selon certains chercheurs, la résorption du ciment et sa réparation par du ciment cellulaire (turn-over du ciment) serait considérée comme un processus de remodelage physiologique par analogie au remodelage osseux. Cela se produit face aux changements métaboliques du ligament parodontal sous l'effet des forces de mastication, de l'éruption et de la dérive continue des dents, des parafunctions mais également lors du traitement orthodontique [26], [34]–[36]

Il se produit donc un remodelage radulaire lors du traitement orthodontique. Un remplacement par du tissu cémentaire des lacunes de résorptions a lieu, avec retour à l'état initial de la forme radulaire [21], [26], [29], [37]. Les lacunes de résorptions (en confluence et formant des péninsules) peuvent être totalement désolidarisées de la surface radulaire, formant ainsi des îlots. Ces îlots sont résorbés par les cellules clastiques, conduisant à la résorption radulaire apicale visible par les examens radiologiques. Même si du tissu cémentaire est par la suite apposé, il l'est en quantité insuffisante pour masquer la perte de longueur radulaire.

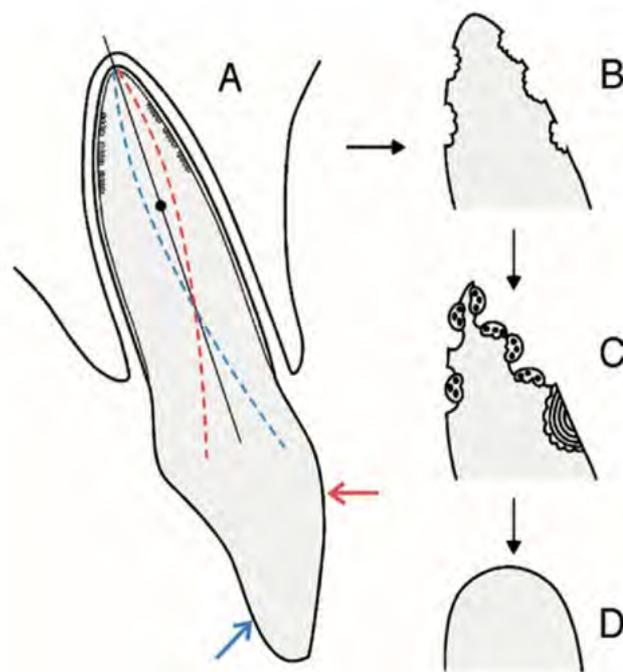


Figure 3: Lacunes de résorptions sans réparation, conduisant à la résorption radulaire apicale externe par confluence (*Abbas et al.*).

Il est à présent admis que la résorption radiculaire est un effet secondaire naturel de l'inflammation nécessaire au remodelage osseux et au déplacement de la dent. Du côté de la compression de la racine, pendant que les cellules clastiques sont recrutées pour le processus inflammatoire, des cémentoclastes résorbent le ciment. Dès que les forces orthodontiques se dissipent, des cémentoblastes remplacent les cémentoclastes. Ce cycle de résorption/réparation se produit en général sans conséquences sur la santé et la longévité de la dent [18], [38].

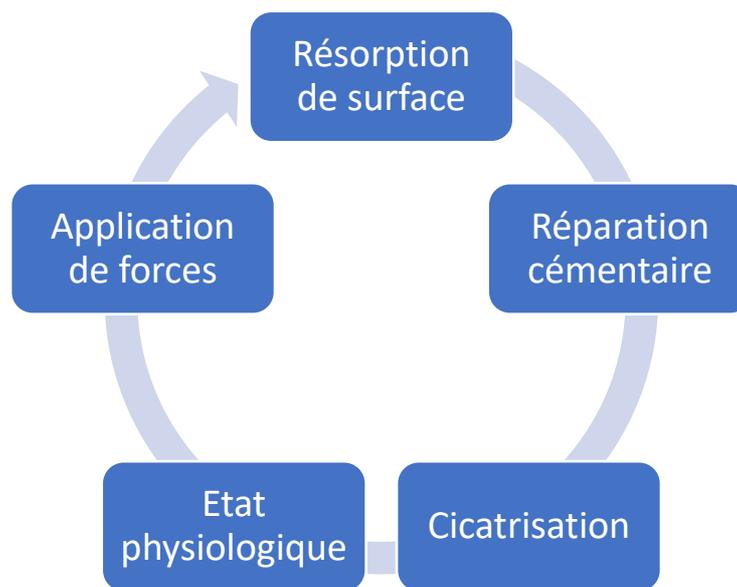


Figure 4: Cycle de résorption radiculaire de surface et de réparation lors du mouvement orthodontique (Sameshima et al.).

Histologiquement, on observe trois types de réparation des cavités de résorption [3], [36], [39], [40] (Figure 5) :

- (1) Réparation partielle : une partie de la surface de la cavité de résorption est recouverte de ciment réparateur (ciment cellulaire ou acellulaire). Il persiste une partie de dentine exposée non couverte de ciment.
- (2) Réparation fonctionnelle : la surface totale de la cavité de résorption est recouverte de ciment de réparation sans rétablissement du contour radiculaire original (ciment cellulaire).
- (3) Réparation anatomique : la surface totale de la cavité de résorption est recouverte de ciment de réparation rétablissant le contour radiculaire initial.

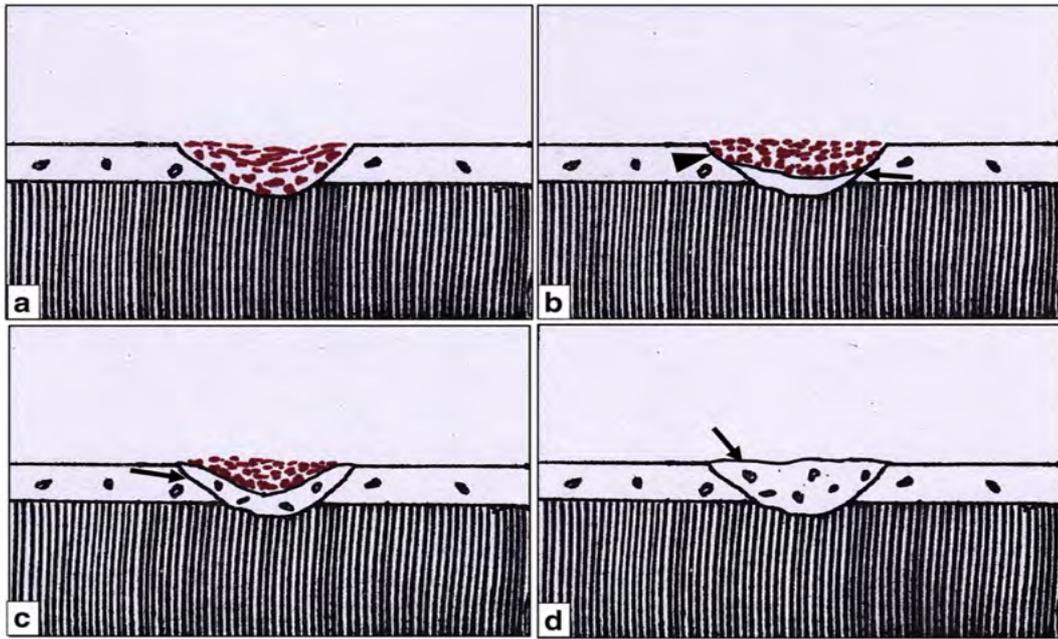


Figure 5: Représentation schématique des niveaux de réparation cémentaire. Lacunes de résorption montrant l'absence de réparation (a) ; une réparation partielle (b) avec seulement une partie de la surface couverte de ciment de réparation (flèche) et la surface restante exposée (triangle) ; une réparation fonctionnelle (c) avec la totalité de la surface couverte de ciment de réparation, sans restaurer le contour radiculaire initial et réparation anatomique (d) avec la totalité de la surface couverte de ciment de réparation, rétablissant le contour radiculaire initial (Mehta et al.).

Des controverses persistent quant à la nature du ciment de réparation. Il y aurait d'abord du ciment acellulaire qui se dépose dans la lacune de résorption puis du ciment cellulaire s'y appose pour une réparation de la surface totale de la lacune [39]. Le ciment acellulaire nécessiterait plus de temps à être produit [41].

Après réparation des lacunes de résorption, on observe une régénération du ligament parodontal [42].

3.2.2. Cicatrisation de la région apicale

La cicatrisation de la région apicale est particulière. Vardimon et al. [40] décrivent une hypercémentose apicale. Lors des mouvements orthodontiques, on observe une occlusion du tissu pulpaire apical, une exostose du ciment et un déplacement du foramen apical du côté opposé à la pression. Ce déplacement se fait par l'hypercémentose du côté de la pression, par une apposition sélective de dentine secondaire dans la paroi pulpaire interne adjacente à la pression et par une apposition de dentine sur la paroi radiculaire externe du côté opposé à la

pression (côté de la tension). Cependant, leur étude est réalisée chez des singes dans le cadre d'une expansion palatine alors que dans ce travail nous nous concentrons sur les résorptions radiculaires après traitement par multiattaches.

Pour des raisons peu élucidées, le cycle de résorption/réparation du cément est différent à l'apex. La réparation ne se fait pas correctement chez certaines personnes et la résorption apicale progresse [18]. Nous savons à présent que la prédisposition génétique et des facteurs épigénétiques jouent un rôle important dans le développement des résorptions radiculaires. [42] – [45]. Une étude avec l'analyse de l'ensemble du génome a trouvé des associations entre certaines variantes génétiques et des résorptions radiculaires apicales externes sévères (supérieures à 4mm), avec des polymorphismes situés sur deux gènes en particulier [46]. Plusieurs autres facteurs que nous développerons dans la partie concernant les étiologies sont impliqués.

Plusieurs théories sont développées à partir de ces constats quant à l'apparition de résorptions radiculaires au niveau apical de manière irréversible. L'étude de Vardimon et al. pourrait supposer un mécanisme de défense visant à protéger le paquet vasculonerveux de la région apicale comme le décrivent Wasserstein et Brezniak [47]–[50]. Nous détaillerons ces théories dans la partie discussion.

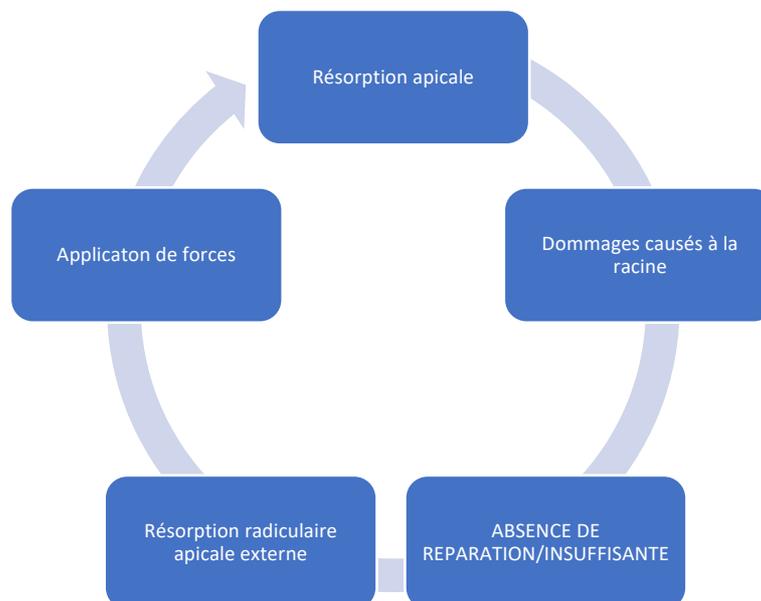


Figure 6: Cycle de remodelage au niveau apical. Contrairement à la surface radulaire, à l'apex de la dent le cycle peut être interrompu lorsqu'une combinaison inconnue de facteurs provoque des dommages irréparables. Il en résulte une résorption radulaire apicale permanente et irréversible. Si les forces sont maintenues et que les facteurs demeurent, le cycle se répète et les dommages apicaux s'aggravent (Sameshima et al.).

4. Classifications des résorptions radiculaires externes

Plusieurs propositions de classifications ont été faites dans la littérature.

4.1. Selon le diagnostic pathologique

D'après Andreasen en 1985 [51], basée sur les traumatismes dentaires :

- Résorption de surface
- Résorption inflammatoire
- Résorption de remplacement (ankylose)

D'après Ne et al. en 1999 [52], basée sur les caractéristiques cliniques et histologiques :

- Résorption externe de surface
- Résorption radiculaire externe inflammatoire
- Ankylose
- Résorption de remplacement : différenciée de l'ankylose par la présence d'un tissu conjonctif inflammatoire [52].

4.2. Selon le diagnostic étiologique

Fuss et al. [53] proposent une classification axée sur la clinique, avec une résorption suite :

- A une infection pulpaire
- A une infection parodontale
- Au déplacement orthodontique
- A la pression tumorale ou d'une dent incluse
- A l'ankylose dentaire

4.3. Selon la localisation

Selon le point de départ pulpaire ou de la surface radiculaire, on parle respectivement de résorption radiculaire interne ou externe [18], [33], [54]–[56].

Les résorptions externes :

- Inflammatoires transitoires, également connue comme résorption de surface ;
- Inflammatoire évolutives, apicales ou cervicales ;
- De remplacement.

Voici des illustrations des schématisant les différents types de résorptions (*Dentisterie restauratrice Endodontie - Référentiel Internat*) [33].

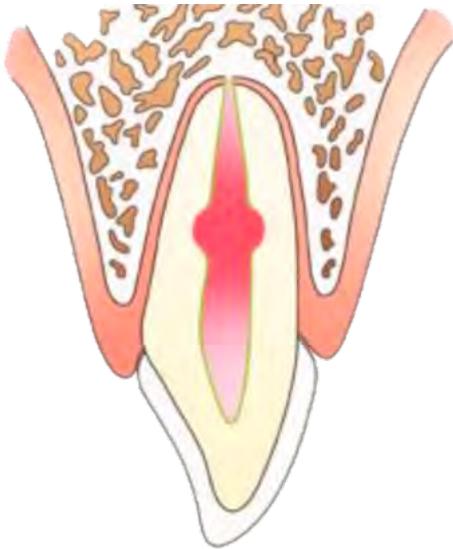


Figure 7: Illustration d'une résorption interne.

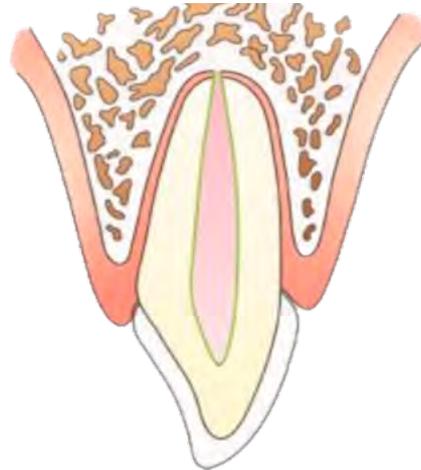


Figure 8: Illustration de la situation initiale (dent indemne de résorptions radiculaires). Couche de protection interne représentée en vert.

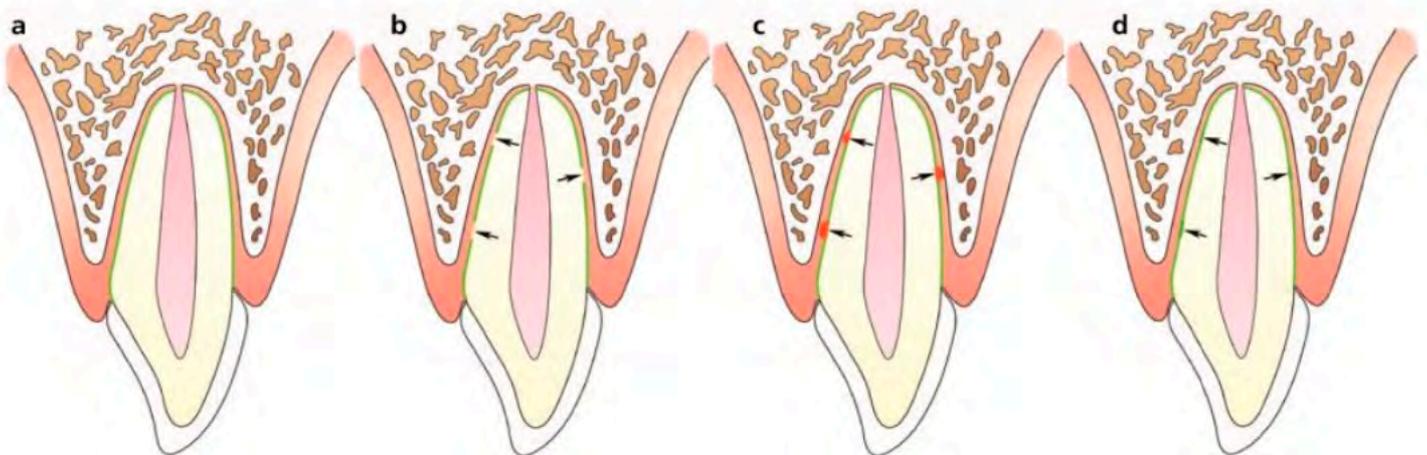


Figure 9: Illustration des résorptions externes de surface a) Situation initiale. La couche de protection externe est représentée en vert. b) Lésion de la couche de protection externe (flèche noire). c) Inflammation locale induite par la lésion de la couche de protection. d) Arrêt du processus et réparation.

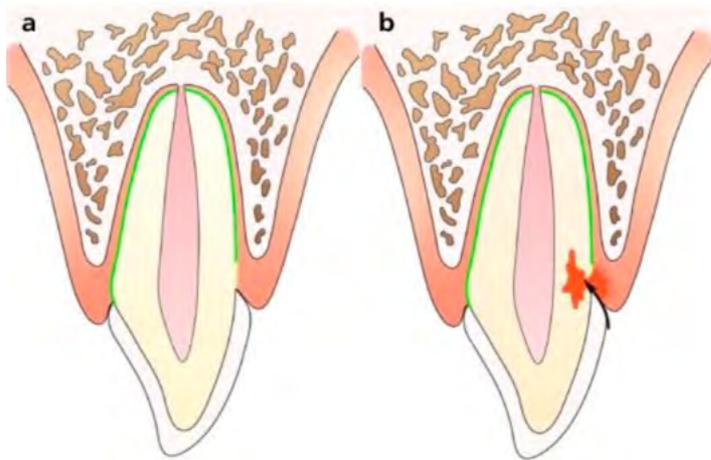


Figure 10: Illustration d'une résorption externe cervicale. a) Lésion de la couche de protection externe de la région cervicale initiant le processus de résorption. b) Maintien du processus de résorption par les bactéries provenant du sulcus gingival et/ou de la surface de la dent.

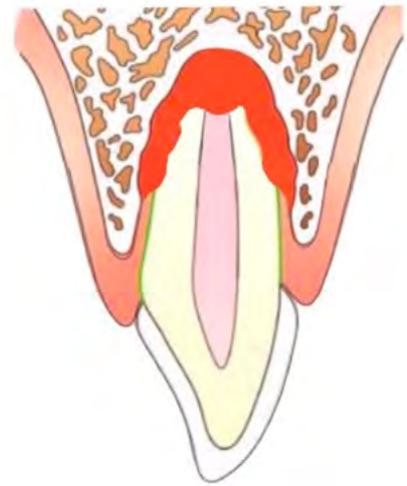


Figure 11: Illustration d'une résorption radiculaire apicale externe.

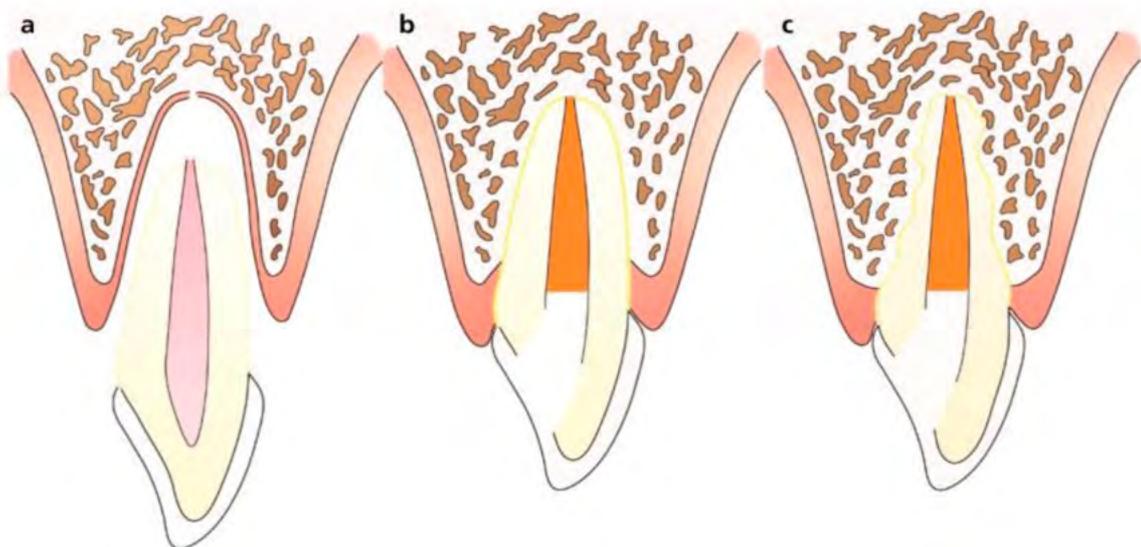


Figure 12 : Ankylose et résorption de remplacement. a) Réimplantation d'une dent expulsée après un temps extra-oral long ayant entraîné une nécrose massive des cellules de la couche de protection externe. b) Contact direct entre la surface radiculaire et l'os alvéolaire (ankylose). c) La racine résorbée est remplacée par de l'os alvéolaire (résorption de remplacement).

Les résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique sont le plus souvent classées parmi les résorptions externes de remplacement et parfois parmi les résorptions inflammatoires [53]. Dans tous les cas, dans la suite de ce travail, nous nous concentrerons sur les résorptions radiculaires externes diagnostiquées pendant ou après un traitement orthodontique.

4.3.1. Les résorptions cervicales

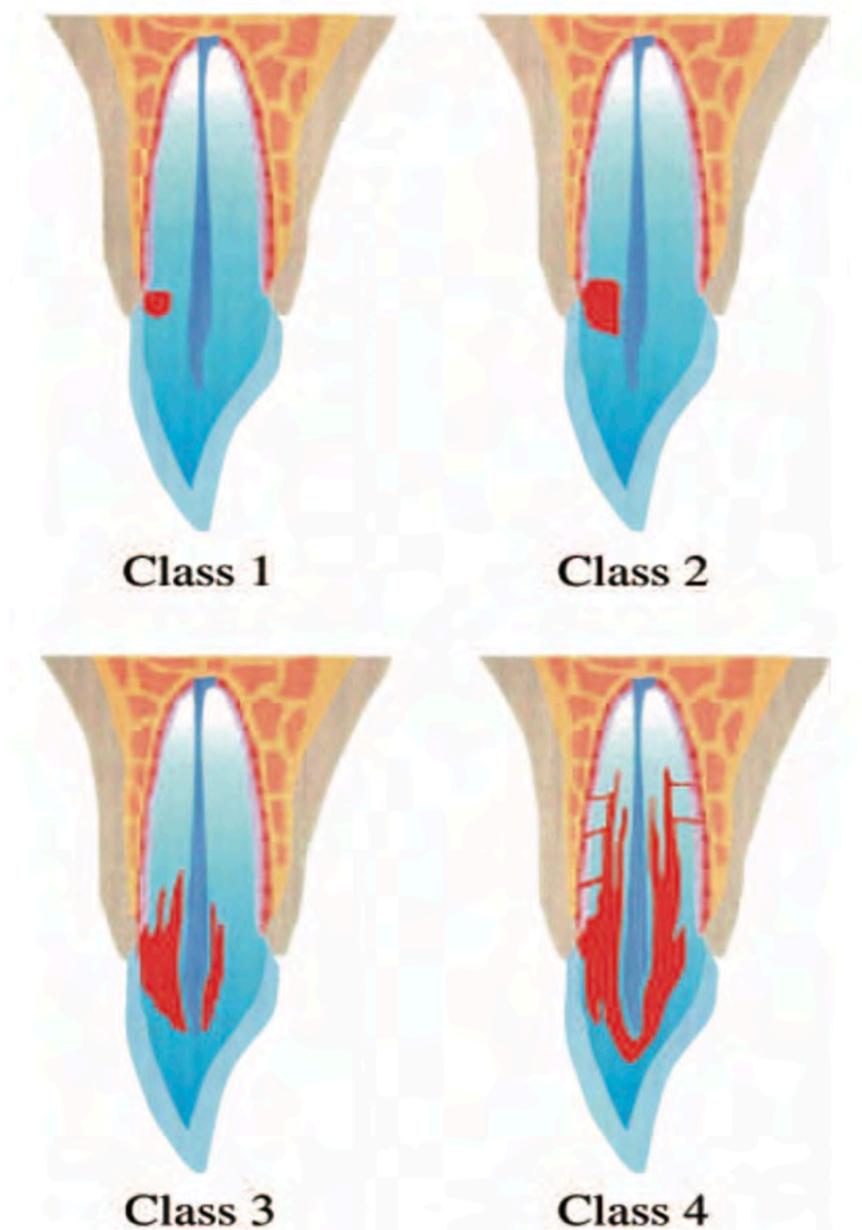


Figure 13: Représentation schématique des résorptions cervicales invasives (Heithersay).

Heithersay [57]–[59] a proposé une classification en 4 classes des résorptions cervicales. Elle reste très largement utilisée. Les deux premiers types de résorptions cervicales concernent la dentine coronaire et les deux autres la dentine coronaire et radiculaire.

Classe 1 : résorption cervicale avec une atteinte dentinaire peu profonde ;

Classe 2 : résorption cervicale bien limitée avec une diffusion proche de la pulpe camérale mais sans extension dans la dentine radiculaire ;

Classe 3 : résorption cervicale dentinaire s'étendant dans le tiers radiculaire coronaire ;

Classe 4 : résorption cervicale invasive s'étendant au-delà du tiers coronaire de la racine.

Cependant, cette classification se base sur une analyse en deux dimensions. D'autres travaux de classifications en trois dimensions, que nous ne détaillerons pas, ont été publiés [60].

4.3.2. Les résorptions apicales

Plusieurs classifications des résorptions radiculaires apicales externes lors d'un traitement orthodontique ont été proposées dans la littérature. Elles sont basées sur l'évaluation de l'ampleur du phénomène résorptif apprécié sur les radiographies en deux dimensions.

Sharpe évalue les résorptions radiculaires observées par rétroalvéolaires sur les critères suivants [61] :

- 0 = aucune résorption radiculaire apicale
- 1 = léger émoussement de l'apex
- 2 = émoussement modéré de l'apex jusqu'à $\frac{1}{4}$ de la longueur radiculaire
- 3 = émoussement important de l'apex dépassant $\frac{1}{4}$ de la longueur radiculaire

La classification de Levander et Malmgren [62], la plus utilisée, se base sur la longueur radiculaire avec des indices de 0 à 4 :

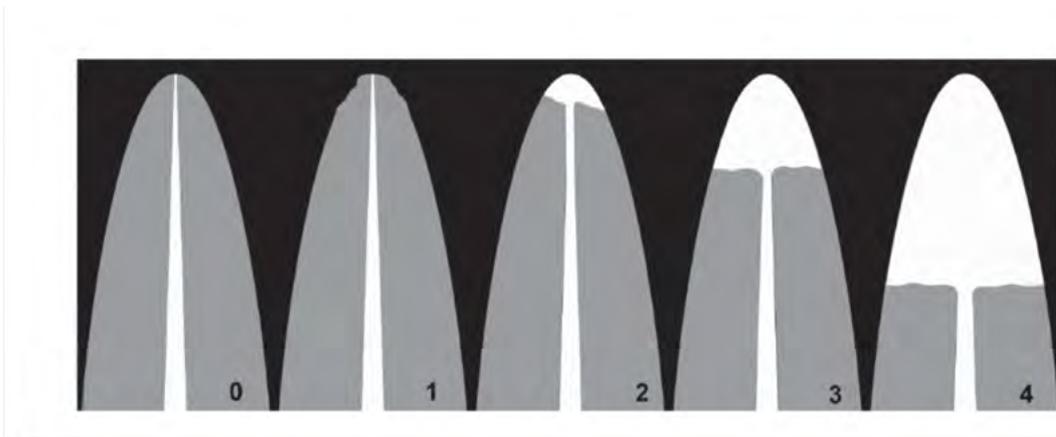


Figure 14 : Résorption radiculaire apicale – classification de Malmgren et al. (1 à 4) modifiée par Levander et al. avec mise en place de stade 0 (racine intacte).

- 0 : aucune résorption radiculaire ;
- 1 : contour radiculaire irrégulier ;
- 2 : résorption radiculaire apicale inférieure à 2mm. Résorption **mineure** ;
- 3 : résorption radiculaire apicale allant de 2mm au tiers de la longueur radiculaire initiale. Résorption **sévère** ;
- 4 : résorption radiculaire excédant le tiers de la longueur radiculaire initiale. Résorption **extrême**.

Il n'existe pas de signe clinique pathognomonique pour diagnostiquer les résorptions radiculaires en cours de traitement orthodontique. Elles sont révélées par un examen radiologique de routine [10].

Plus récemment, Brezniak et Wasserstein [8], [63] ont établi trois degrés de sévérité des résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique :

- **Résorption cémentaire ou de surface avec remodelage** : ne sont touchés que les couches de ciment, qui sont ensuite régénérées ou remodelées.
- **Résorption dentinaire** : ne sont résorbés que le ciment et les couches externes de la dentine, avec une réparation par du matériel cémentaire (la racine gardant ou pas son contour initial).
- **Résorption radiculaire circonférentielle** : les tissus durs apicaux de la dent sont résorbés et un raccourcissement radiculaire apparaît ; la dent reste vitale (réponse positive aux tests de sensibilité pulpaire).

5. Statistiques

La prévalence des résorptions radiculaires d'origine orthodontique varie considérablement selon les études et les critères utilisés [7]. Il convient de distinguer la prévalence des résorptions radiculaire **apicales** externes de celle des résorptions radiculaires externes [26].

5.1. Évaluation de la longueur radiculaire

5.1.1. Évaluation par rétroalvéolaires

2015

Dans l'étude rétrospective de Maués et al. [64] sur 129 patients traités par technique Edgewise, les auteurs ont analysé les rétroalvéolaires sur 959 dents avant et après traitement. La prévalence de résorption radiculaire apicale externe excédant le tiers de la longueur radiculaire (indice 4 dans la classification de Malmgren et Levander) était de 2,9% au total (28 dents). Les incisives maxillaires étaient les plus touchées, suivies par les incisives mandibulaires.

2010

Marques et al. [65] évaluent la prévalence des résorptions radiculaires apicales externes sur un échantillon de 1049 patients (12 588 rétroalvéolaires) traités par technique Edgewise, en prenant les mêmes critères que Maués et al. et trouvent une prévalence de 14,9%.

5.1.2. Évaluation par l'orthopantomogramme

2021

Bayir et Bolat [66] trouvent une incidence de résorption radiculaire apicale externe de 27,7%, dont 14,8% sévère (selon la classification de Malmgren) chez 1356 patients adolescents ayant eu un traitement orthodontique par technique multiattaches Edgewise. L'incidence est évaluée en analysant les orthopantomogrammes pré- et post-traitement orthodontique.

5.1.3. Évaluation par tomographie volumique à faisceau conique (CBCT)

2020

Dans l'étude rétrospective de Yuan Li et al. [67], les auteurs comparent la technique multiattaches vestibulaires (groupe A) avec la technique de gouttières d'alignement (groupe B) en évaluant les CBCT pré- et post-traitement orthodontique de 70 patients (35 dans chaque groupe) avec 373 dents évaluées. La prévalence de résorption radiculaire apicale externe est

de 82,11% dans le groupe traité par multiattaches vestibulaire (versus 56,30% dans le groupe traité par gouttières).

Les auteurs reprennent la méthode de Sharpe [61] pour évaluer les résorptions radiculaires ; ils comparent l'absence totale de résorptions radiculaires apicales (0 mm) versus la présence—même minime. La quantité de résorption radiculaire apicale était de $1,12 \pm 1,34$ mm en moyenne dans le groupe A versus $0,13 \pm 0,47$ mm dans le groupe B, avec une différence significative. Des valeurs négatives de résorption apicale (allongement de racines) ont été trouvées dans cette étude mais également dans d'autres [68], [69] ; elles pourraient être dues à des erreurs de mesure mais également à des patients en cours de croissance pour lesquels l'édification radiculaire n'est pas achevée.

2011

Lund et al. [70] évaluent l'incidence des résorptions radiculaires apicales sur 152 patients traités orthodontiquement par technique Edgewise avec avulsions de prémolaires ; ils examinent les CBCT avant, pendant (6 mois) et en fin de traitement. Environ 7% de patients traités avaient au moins une dent avec une résorption radiculaire supérieure à 4mm en fin de traitement, mais aucun patient n'avait plus de 3 dents atteintes avec ce degré de sévérité. Parmi tous les patients, 94% avaient au moins une dent avec une résorption radiculaire de 1mm ou plus.

5.2. Évaluation volumétrique

5.2.1. *Évaluation histologique*

Dans une étude publiée en 1996 [71], les auteurs trouvent une prévalence histologique des résorptions radiculaires de plus de 90% après applications de forces orthodontiques sur 112 prémolaires pendant 7 semaines. Les analyses étaient réalisées sur un stéréo-microscope avec analyse d'imagerie sur ordinateur. Ces résorptions n'étaient pas visibles sur les rétroalvéolaires puisqu'ici les auteurs ont évalué les résorptions radiculaires qui n'étaient pas forcément apicales.

5.2.2. Évaluation par CBCT

Dans la méta-analyse de Deng et al. [72] sur 12 études, le volume des racines est étudié avant et après traitement. Trois études ont rapporté des changements dans le volume des racines en utilisant le CBCT. La méta-analyse révèle une diminution significative du volume radiculaire : la différence moyenne était de 23,12% avec IC17,88-28,36 et $p < 0,00001$ entre le début et la fin du traitement orthodontique.

Les résultats restent cliniquement acceptables. Les auteurs ont également évalué la quantité de résorption apicale. Ils trouvent en moyenne une différence de longueur de 1mm par rapport à la longueur initiale de la dent, pouvant aller jusqu'à 2mm.

Les résorptions radiculaires sont donc fréquentes lors de la prise en charge orthodontique.

6. Étiologies des résorptions

Les étiologies des résorptions sont multifactorielles et complexes [9]. Parmi ces facteurs, on trouve les caractéristiques biologiques individuelles (facteurs liés aux patients) dont la susceptibilité génétique [19], [43], [46] et les facteurs liés à la prise en charge en orthodontie (mécanique etc.) [1], [8], [38], [44], [65], [73].

Samadet et Bacon [63], [74] ont publié un article en 2007 sur les facteurs de risques des résorptions radiculaires en orthodontie et les attitudes thérapeutiques à adopter. Les facteurs de risques sont classifiés en biologiques et mécaniques. Les deux tableaux synthétiques publiés sont rapportés ici et résument bien tous les facteurs qui pourraient intervenir dans les résorptions radiculaires d'origine orthodontique. Depuis, d'autres publications clarifient un peu plus ces données et continuent d'investiguer sur les facteurs impliqués afin d'apporter une réponse plus nuancée [38], [73], [75], [76].

Un excellent article publié récemment par Yassir et al. [77] a réalisé un résumé des revues systématiques portant sur les facteurs de risques des résorptions radiculaires en orthodontie. L'article reprend les étiologies liées aux patients et au traitement et apporte une réponse claire et concise pour chaque facteur impliqué.

FACTEURS DE RISQUE BIOLOGIQUES	FAIBLE	MODÉRÉ	SÉVÈRE
SYSTÉMATIQUES Prédisposition génétique Pathologies systémiques Âge Sexe	Allergie Asthme Diabète	Précédent traitement ODF RR « familiale » post-ODF Pathologie systémique sus citée Adulte	SUSCEPTIBILITÉ GÉNÉTIQUE Précédent trait. ODF avec RR RR « familiale » généralisée Pathologie systémique sus citée et non-équilibrée
ANATOMIQUES Forme des dents et des racines Anomalies dentaires Territoire anatomique Densité de l'OA	Encombrement moyen à sévère	Racines émoussées ou en pipette Anomalies dentaires	Dent ayant déjà eu une RR Racines émoussées ou en pipette Anomalies dentaires
TRAUMATIQUES		Dents traumatisées antérieurement sans RR Dent transplantée	Dents traumatisées antérieurement avec RR Dent réimplantée
FONCTIONNELS Dysfonction : déglutition atypique, ventilation buccale Parafonction : succion, onychophagie	Rééducation des dysfonctions et arrêt des parafonctions	Bruxisme Dysfonction(s) : pulsion linguale, ventilation buccale Parafonction(s) : onychophagie, succion, tics	Bruxisme sévère Dysfonction(s) non rééduquée(s) Parafonction(s) persistante(s)

Tableau 2: Les facteurs de risques biologiques (d'après Samadet et al.). RR : résorption radiculaire ; ODF : orthopédie dento-faciale ; OA : os alvéolaire. Risque faible : RR localisée et/ou généralisée d'intensité mineure. Risque modéré : RR localisée et/ou généralisée et d'intensité mineure à sévère. Risque sévère : RR localisée et/ou généralisée et d'intensité sévère à extrême.

FACTEURS DE RISQUE MÉCANIQUES	RISQUE FAIBLE	RISQUE MODÉRÉ	RISQUE SÉVÈRE
FORCE APPLIQUÉE Consensus thérapeutique non démontré statistiquement	Forces continues et légères	Mécanique « lourde »	Forces importantes et mécanique « lourde »
NATURE DU MOUVEMENT	Tous les mouvements	Ingression « Va et vient » Rotation Version prolongée	Mouvement rapide Torque important
DURÉE DU TRAITEMENT	Supérieure à 6 mois	Longue mais prévue	Trop longue ou arrêts intempestifs du traitement
AMPLITUDE DU MOUVEMENT		IMPORTANTE (encombrement)	Amplitude du mouvement +++ Béance antérieure +++ Supraclusion +++ (non démontré statistiquement)
TYPE D'APPAREIL			Rapport Charge/Flexion +++ Port irrégulier des auxiliaires de traitement
TERRITOIRE DE DÉPLACEMENT		Proximité de dents incluses Chirurgie orthognathique à proximité	Racines ayant eu des RR par des dents incluses Dents lésées lors d'une chirurgie orthognathique

Tableau 3: Les facteurs de risque mécaniques (d'après Samadet et al.) RR : résorption radiculaire.

Cependant, des contradictions persistent entre différentes études concernant le rôle plus ou moins important de ces facteurs dans l'apparition des résorptions radiculaires ; les preuves scientifiques établies quant à la participation de ces facteurs dans les résorptions radiculaires sont très faibles voire absentes [63], [74]. Néanmoins, beaucoup d'auteurs estiment qu'il existe une corrélation positive entre durée de traitement orthodontique et résorptions radiculaires. Cela a été souligné dans la revue systématique et méta-analyse plus récente de Samandara et al. [78] où les RR sont significativement corrélées à la durée de traitement (avec une augmentation moyenne de 0,36mm par année de traitement). Les mêmes résultats sont trouvés dans la revue systématique et méta-analyse de Deng et al. [63], [72], [74], [79].

Pour les résorptions externes, les couches de précément et de prédentine étant constituées essentiellement de matières organiques, les cellules clastiques ne peuvent pas y adhérer et donc initier un processus de résorption [18], [19], [33].

II. EXAMENS RADIOLOGIQUES ET DIAGNOSTIC DES RESORPTIONS RADICULAIRES

1. Optimisation

1.1. Définitions

La capacité des rayons X à traverser les tissus humains a été découverte par Röntgen en 1895. Ils ont été nommés *rayons X* car leur nature était inconnue. Nous savons à présent qu'ils font partie des rayonnements électromagnétiques de hautes doses. Ils appartiennent donc au spectre électromagnétique tout comme les ondes radio ou la lumière visible. Ces rayons X sont des paquets d'énergie de photons et font partie des rayonnements ionisants [80].

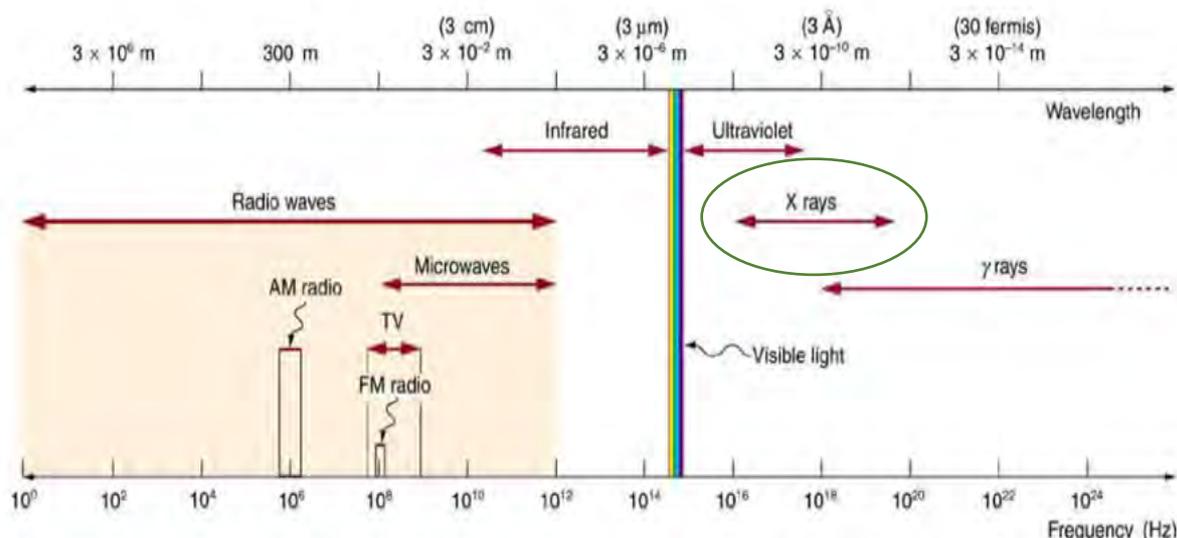


Figure 15: Le spectre électromagnétique, montrant les principales ondes électromagnétiques avec leurs longueur d'onde (*wavelength*) et leur fréquence (*frequency*). Les rayons X (*X rays*) sont entourés (Whaites et al.).

Les examens radiologiques sont essentiels pour le diagnostic en odontologie. Ils ne peuvent cependant pas se substituer à l'examen clinique complet.

Les progrès technologiques ont permis l'utilisation des radiographies numériques par capteur CCD (*charge coupled device*) ou ERLM (écrans radioluminescents à mémoire). Les risques de dégradation de l'image sont amoindris [81], [82].

1.2. Radioprotection

Il existe des risques inhérents à l'utilisation des rayonnements ionisants. Lors d'un examen radiologique, les rayonnements ionisants traversent les tissus et ils sont partiellement ou totalement absorbés. Ainsi, une partie de l'énergie est absorbée par les tissus et peut créer une ionisation (arrachement d'un électron). Ces ionisations peuvent induire, au niveau tissulaire, des effets déterministes (apparaissent au-delà d'une dose seuil) et des effets stochastiques/aléatoires (altération de l'ADN, sans dose seuil). En odontologie, nous sommes concernés principalement par les effets stochastiques, qui ne présentent pas de dose seuil. C'est pour cela que le principe ALARA existe : « As Low As Reasonably Achievable » ou « aussi bas qu'il est raisonnablement possible » lors de la prescription d'un examen radiologique [83], [84]. Il convient de prescrire l'examen de choix pour l'établissement du diagnostic et du plan de traitement, et la réalisation correcte de cet examen radiologique.

Pour la plupart des examens radiologiques, la limitation du champ peut conduire à une diminution de l'irradiation, par exemple lors des réévaluations radiologiques en orthodontie en cours de traitement [81].



Figure 16: Exemple de limitation d'un champ d'exploration sur un orthopantomogramme. Pour les réévaluations en cours de traitement orthodontique, cette technique permet une réduction significative de l'irradiation du patient (Felizardo et al.).

L'évaluation des risques inhérents à chaque examen radiologique passe par l'évaluation des doses induites. Il convient donc de définir ces grandeurs et unités utilisées en radioprotection [83] :

- **La dose absorbée (en Gray ; Gy)** : évalue la quantité d'énergie absorbée par unité de masse (Joule par kilogramme ; J/kg). Elle est liée aux paramètres de l'exposition radiologique.
- **La dose équivalente (en Sievert ; Sv)** : elle prend en compte la nocivité propre de chaque rayonnement ionisant. Elle correspond à la dose absorbée multipliée par le facteur de pondération radiologique de chaque rayonnement. Celui des rayons X est de 1 ; une dose absorbée de 1Gy correspond à une dose équivalente de 1Sv.
- **La dose efficace ou effective** : elle prend en compte la susceptibilité de chaque tissu à un rayonnement ionisant. La dose efficace correspond à la dose équivalente multipliée par le facteur de pondération tissulaire (facteur prédéfini pour chaque tissu exposé).

La dose efficace de chaque type d'examen est rapportée dans le tableau ci-dessous ; celui-ci exprime l'équivalence des risques en radiodiagnostic odontologique [83].

Techniques	Dose efficace (µSv)	Jours et heures d'irradiation naturelle	Jours de vol/séjour à 3 000 m	Nombres de cigarettes/jour
Cliché rétro-alvéolaire/rétrocoronaire	1-8	4 h-1 j	1-2	1-2
Bilan rétro-alvéolaire (20 films)	30-150	5-20 j	8-40	10-40
Cliché occlusal maxillaire	8	1 j	2	2
Panoramique dentaire	4-30	10 h-5 j	1-8	1-10
Téléradiographie de profil	2-3	12 h	1	1
Tomographie (1 coupe)	1-190	4 h-30 j	1-50	1-50
Tomodensitométrie max. ou mand.	75-100	12-15 j	24-30	24-30
Tomodensitométrie du crâne	400-1000	60-150 j	120-285	120-300
Tomographie volumique « grand champ »	70-550	10-85 j	20-150	20-165
Tomographie volumique « moyen champ »	70-550	10-85 j	20-150	20-165
Tomographie volumique « petit champ »	5-500	18 h-75 j	2-145	2-150

Figure 17: Équivalence des risques en radiodiagnostic odontologique (Felizardo et al.).

2. Examens radiologiques systématiques en orthodontie

2.1. Orthopantomogramme ou cliché panoramique dentaire

L'orthopantomogramme ou panoramique dentaire (OPT) reste un examen complémentaire indispensable en orthodontie. Il permet d'évaluer l'état global des dents et tissus attenants, la présence ou l'absence d'anomalies de nombre, de forme ou de structure des dents. Il fait partie du dossier orthodontique et reste un élément médico-légal clé [81], [85], [86].

Il s'agit d'une technique de radiographie sectionnelle utilisant les rayons X. Une zone de coupe est prédéterminée dans les paramètres. Cette zone ressemble à un fer à cheval tridimensionnel. Dans la zone de coupe déterminée, les structures anatomiques visées apparaissent nettes ; l'image obtenue est donc en deux dimensions. De plus, viennent se superposer à cette image les projections floutées et déformées des tissus durs et mous avoisinants, en avant ou en arrière de la zone de coupe. On comprend l'importance du bon positionnement des patients lors de la prise du cliché [81], [85].

Les avantages de l'orthopantomogramme :

- La possibilité d'évaluer plusieurs structures osseuses et organes dentaires avec une irradiation relativement faible en comparaison à un bilan rétroalvéolaire de toutes les dents [81], [86] ;
- Facilité d'échange du cliché obtenu entre confrères/consœurs [18] ;
- Appareil relativement répandu dans les cabinets.

Les inconvénients sont nombreux [81], [85] :

- Des erreurs de positionnement mènent à des dents apparemment plus courtes, longues ou floutées en fonction de l'erreur de positionnement par rapport au champ de coupe ;
- Des superpositions de toutes les structures anatomiques qui peuvent rendre plus difficile l'interprétation du cliché (tissus mous ou durs) ;
- En orthodontie, des dysmorphoses sagittales marquées (classe II ou III squelettiques) peuvent empêcher le positionnement simultané des deux mâchoires dans un même champ de coupe ;

- Des dents trop linguoversées ou vestibuloversées peuvent se trouver partiellement ou totalement hors du champ de coupe. Cela rend le diagnostic des résorptions radiculaires plus difficile (Figure 18 et Figure 19) ;
- La machine peut être assez onéreuse à l'achat.

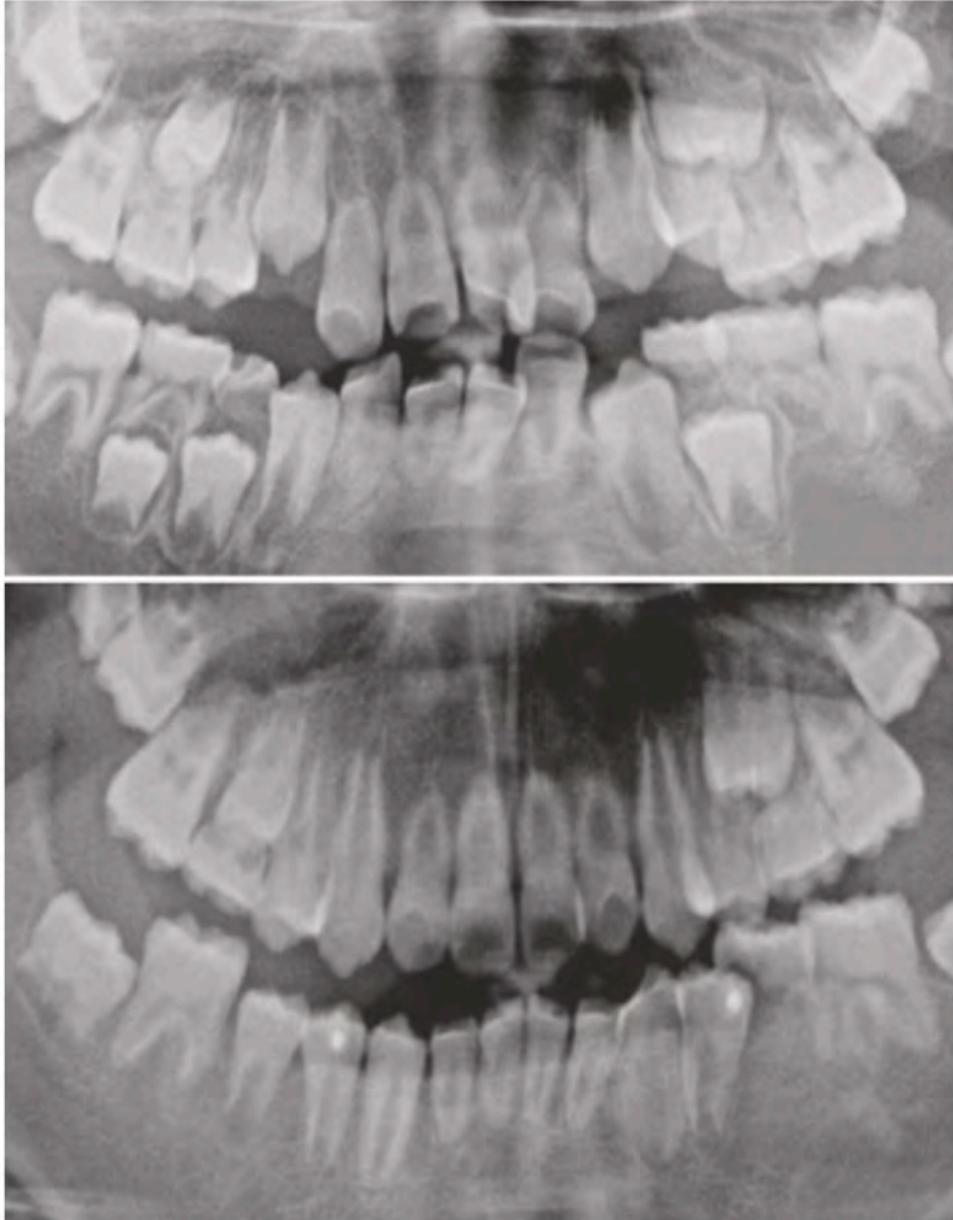


Figure 18: Orthopantomogramme initial avant traitement orthodontique d'interception (haut) et final (bas) illustrant l'impact de la position des incisives sur la longueur radiculaire (*Sameshima et al.*).

2.2. Téléradiographie de profil

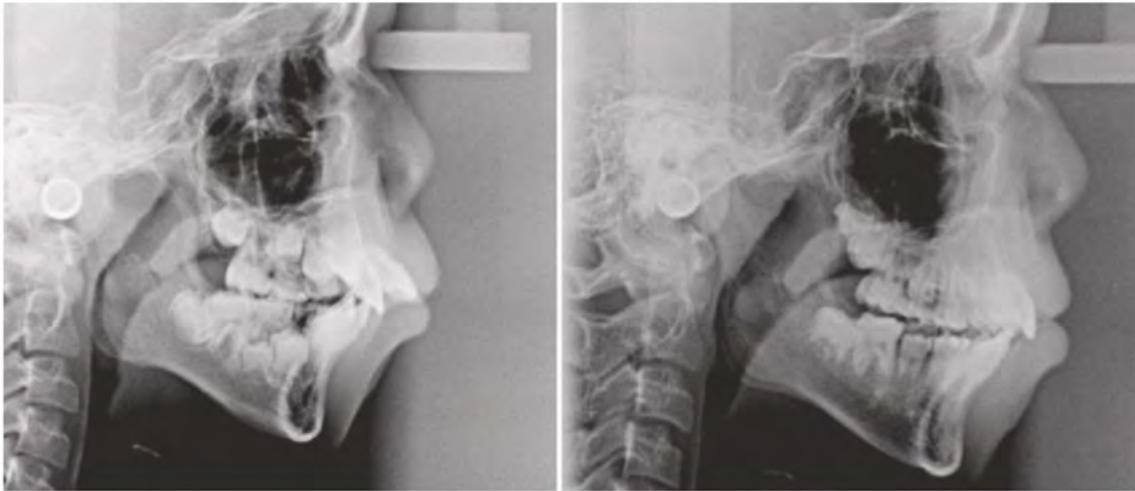


Figure 19: Téléradiographies de profil du même patient montrant les changements dans l'angulation des incisives (Sameshima et al.).

La téléradiographie de profil est une radiographie de projection latérale du crâne faisant partie du dossier orthodontique [87]. C'est une projection bidimensionnelle de structures tridimensionnelles. Elle permet la réalisation d'analyses céphalométriques de structures osseuses, dentaires et des tissus mous du profil cutané. Le plan sagittal médian du patient doit être parallèle au capteur. Le tube à rayons X est orthogonal au plan sagittal médian et au capteur. Une distance de 4 mètres entre le foyer d'émission de rayons X et l'objet est cliniquement considérée comme pratiquement sans agrandissement du cliché obtenu [81], [87].

Les avantages [81], [85], [88] :

- Visualisation globale des structures osseuses basales ou alvéolaires et des tissus mous sur un même cliché ;
- Facteur d'agrandissement allant de 5 à 12% en fonction de la configuration (varie avec la distance tube à rayons X – patient et la distance patient – capteur). Il s'agit d'un avantage car ce facteur reste assez faible en fonction de la configuration.

Les inconvénients :

- La superposition de plusieurs structures peut rendre difficile l'interprétation ;
- Des problèmes positionnels (décalage à droite, à gauche ou bascule de tête) peuvent conduire à un dédoublement des structures, aux tangages et roulis ;
- Problèmes de distorsions de l'image.

Cette superposition des structures droites et gauches peut rendre difficile l'évaluation précise des résorptions radiculaires d'origine orthodontique. Cependant, la téléradiographie peut être utilisée en complément d'autres clichés en orthodontie, notamment l'orthopantomogramme pour évaluer l'atteinte radiculaire dans plusieurs dimensions [85].

3. Examens complémentaires : intérêt en ODF pour le diagnostic des résorptions

3.1. La tomographie volumique à faisceau conique (CBCT)

Il s'agit d'une technique apparue dans les années 90 [89] utilisant le principe de la tomographie : mouvement synchrone du tube radiogène et du récepteur à rayons X autour de l'objet étudié. Plusieurs incidences radiographiques sont acquises autour d'un axe vertical, puis le logiciel informatique analyse les incidences et localise les différents coefficients d'absorption dans l'espace. Les voxels de la matrice tridimensionnelle acquise sont cubiques et isotropiques (résolution identique dans les 3 sens de l'espace) ; on visualise ensuite la projection en pixels des voxels selon la reconstruction choisie [81].

Il n'existe actuellement aucune recommandation spécifique quant à l'utilisation de la tomographie volumique à faisceau conique en orthodontie. Il convient de suivre le principe ALARA mentionné ci-dessus. Il faut évaluer au cas par cas en fonction du ratio bénéfice/risque la prescription de cet examen à la place des techniques traditionnelles [81].

Le champ d'acquisition doit se limiter à la zone informative. Toutes les zones imagées doivent être interprétées. Il faut donc limiter les structures visées par l'examen radiologique prescrit et bien choisir les paramètres de l'appareil (par exemple la précision) en fonction de ce que l'on cherche à mettre en évidence [81], [90].

Les avantages et les indications de la tomographie [70], [72], [83], [90]:

- Rapport 1 :1 possible pour éviter les erreurs liées à l'agrandissement ;
- Amélioration possible de l'acquisition avec des outils informatiques : modifier les contrastes, agrandir les images, effectuer des mesures dont les mesures céphalométriques 3D ;
- Analyse tridimensionnelle des dents incluses, surnuméraires, des résorptions radiculaires, des rapports des dents entre elles ou avec les structures adjacentes, des ankyloses dentaires ;
- Évaluation des lyses osseuses alvéolaires dans certains cas en substitution des clichés rétroalvéolaires multiples ;
- Analyse des fentes palatines, de l'anatomie osseuse en cas d'utilisation de minivis ou de miniplaques ;
- Éventuellement, et peut être de plus en plus, l'utilisation de CBCT dans l'analyse des voies aériennes, du sens transversal (en cas d'expansion maxillaire) et de la céphalométrie tridimensionnelle des cas complexes ;
- Visualisation des tissus mous ;
- Planification de chirurgie orthognathique ;
- Visualisation des articulations temporo-mandibulaires.

Les inconvénients :

- Présence d'artéfacts métalliques, même s'ils sont souvent réduits grâce aux algorithmes développés et moins fréquents chez les adolescents (cependant, les brackets métalliques peuvent créer des artéfacts) ;
- Nécessite l'immobilité du patient pendant l'acquisition ;
- Performances disparates des appareils en fonction des réglages (limitation de champ, définitions...).

Actuellement, le CBCT reste une technique précise et fiable pour le diagnostic *in vivo* des résorptions radiculaires [72].

3.2. Rétroalvéolaires

Deux techniques de radiographies rétroalvéolaires existent.

3.2.1. Techniques des parallèles

Comme son nom l'indique, cette technique requiert l'utilisation d'un angulateur pour le capteur intra-oral. Celui-ci est placé parallèle aux dents examinées. Le tube à rayons X est placé orthogonalement au film et à la dent [85].

Le grand avantage de cette technique est qu'elle reste reproductible, permettant ainsi de suivre la progression des résorptions radiculaires lorsque plusieurs rétroalvéolaires sont réalisées à des moments différents [85].

L'inconvénient de cette technique provient de la difficulté à placer le film le plus proche possible de la dent tout en le gardant parallèle à la dent [85].

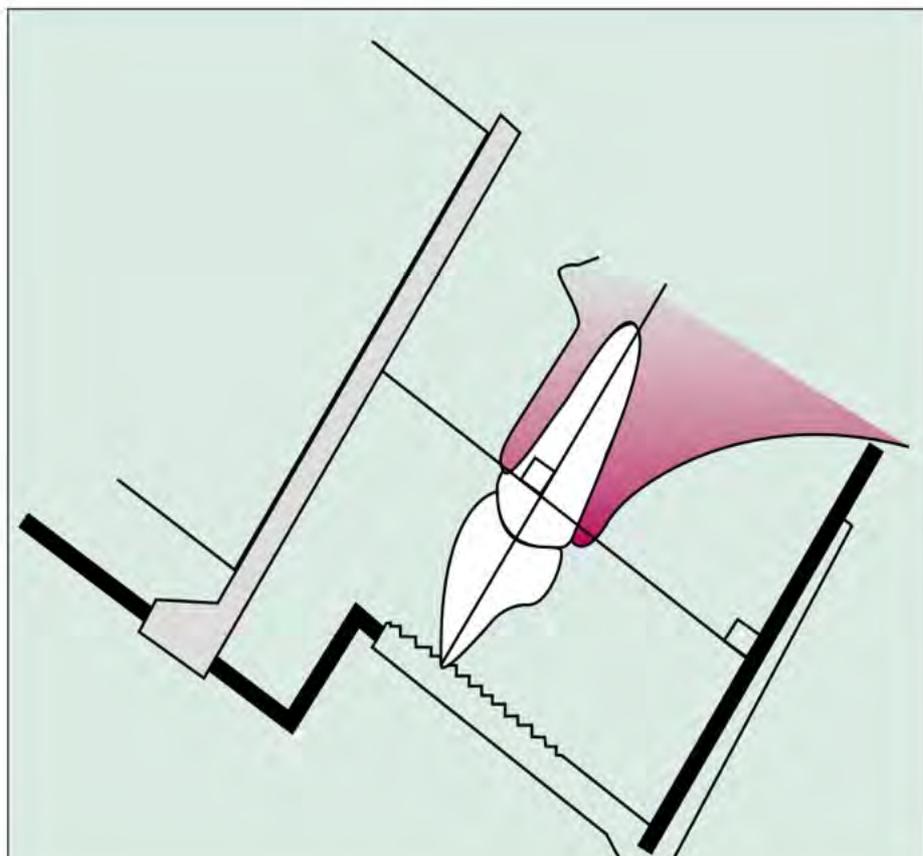


Figure 20: Illustration du positionnement idéal du capteur et du tube à rayons X dans la technique des parallèles (Leach et al.).

3.2.2. Technique de la bissectrice

Le capteur est placé le plus proche possible des dents examinées sans le déformer. Les rayons X doivent arriver de façon orthogonale à la bissectrice de l'angle formé par le grand axe de la dent et du film, en passant par l'apex de la dent [85]. Dans cet arrangement géométrique, la longueur de la dent dans la bouche est égale à la longueur de l'image sur le capteur.

L'inconvénient de cette technique provient de sa difficulté à être reproductible. Une légère variation de l'axe vertical des rayons X peut provoquer un allongement ou raccourcissement de l'image obtenue de la dent [85], comme décrit sur les figures ci-dessous. Ainsi, il est plus difficile de comparer l'évolution des résorptions radiculaires sur le temps [91].

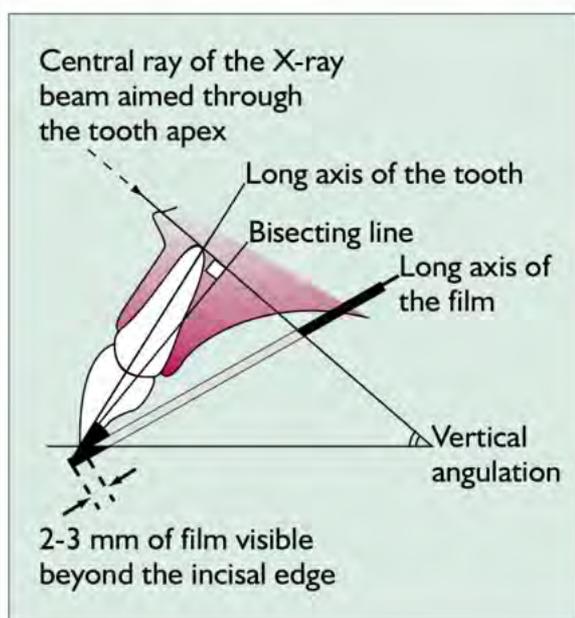


Figure 21: Illustration de la technique de la bissectrice de l'angle formé par l'axe de la dent et l'axe du film (ndlr: bissectrice mal schématisée). Les rayons X doivent viser l'apex de la dent en restant perpendiculaire à la bissectrice (Leach et al.).

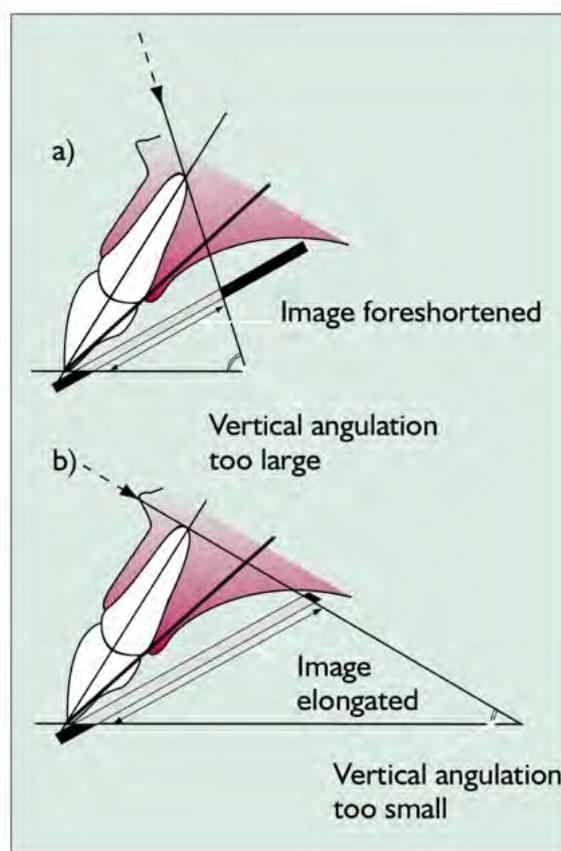


Figure 22: Illustration montrant les effets d'un mauvais positionnement vertical du tube à rayons X. a) Image obtenue raccourcie par rapport à la longueur de la dent en bouche ; b) image obtenue allongée (Leach et al.).

3.2.3. Mesures sur les rétroalvéolaires

Des méthodes de mesures des résorptions radiculaires sur les rétroalvéolaires ont été développées par certains auteurs.

Linge et Linge [92]–[94] mesurent les longueurs radiculaires et coronaires entre deux radiographies rétroalvéolaires, l'une réalisée avant le début du traitement orthodontique et l'autre à la fin du traitement. Les longueurs coronaires, considérées comme invariables, sont prises comme référence pour calculer un facteur de correction d'agrandissement du cliché réalisé après le traitement. La jonction émail-cément sépare les deux longueurs. Le facteur de correction est calculé comme suit : $f=C1/C2$. La quantité de résorption radiculaire est ensuite déterminée : $\text{résorption} = r_1 - r_2f$.

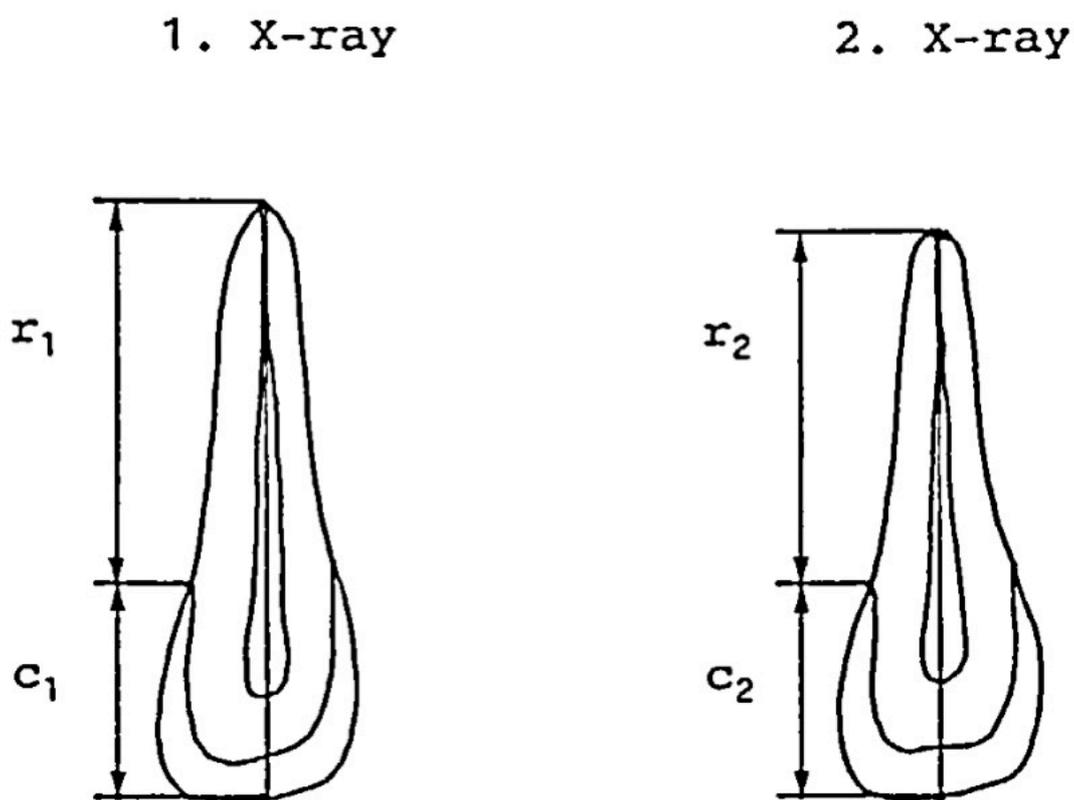


Figure 23: Mesure des longueurs radiculaires (r) et coronaires (c) et calcul des facteurs de correction d'agrandissement (Linge et Linge).

Baumbrind et al. [95] développent une technique plus complexe permettant de mesurer la quantité des résorptions sur trois clichés rétroalvéolaires ou plus. Cependant, il s'agit d'une méthode plus complexe à mettre en œuvre.

Quelle que soit la méthode, le problème d'évaluation quantitative des résorptions radiculaires apicales externes reste à soulever. Plusieurs études ont été réalisées avec la technique de la bissectrice ou des parallèles et elles concluent à une évaluation quantitative peu précise des longueurs radiculaires ; ceci étant dû aux erreurs de reproductibilité de ces techniques [88].

Si la dent n'est pas parallèle aux capteurs, l'interprétation peut être sujette à l'erreur de parallaxe [88].

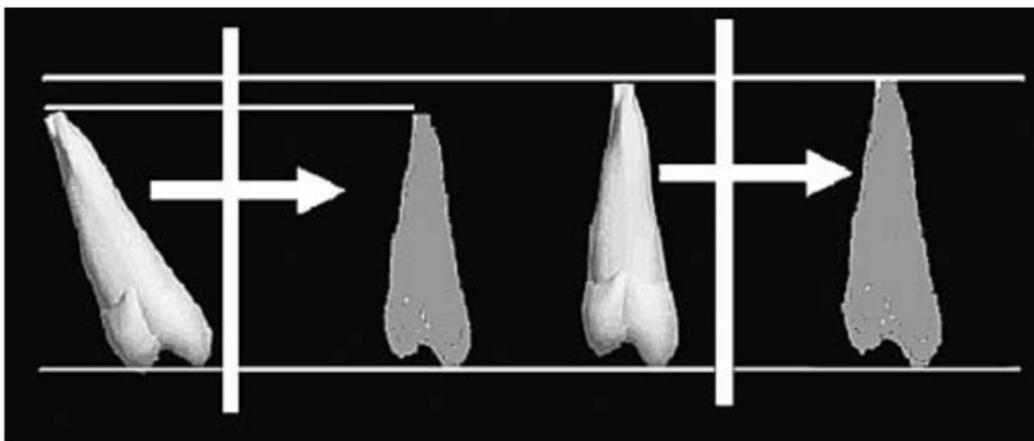


Figure 24 : Illustration de l'erreur de parallaxe qui se produit lors des radiographies 2D. La dent doit être parallèle au capteur pour avoir une évaluation quantitative correcte (Chan et al.).

3.3. Cliché occlusal

L'utilisation d'un cliché occlusal reste similaire à l'utilisation des rétroalvéolaires par la technique de la bissectrice. Cette technique est donc sujette aux mêmes inconvénients de distorsions d'image [85].

Ce cliché peut cependant permettre d'évaluer les résorptions des dents antérieures, la présence ou l'absence de dents surnuméraires ou d'autres anomalies [85].

3.4. Cliché latéral

Utilisation possible lors des traumatismes dentaires en complément des rétroalvéolaires [96].
Peu d'intérêt diagnostique en orthodontie pour évaluer les résorptions radiculaires.

3.5. Microscopie

L'utilisation de la microscopie est décrite très tôt dans la littérature pour l'évaluation des résorptions radiculaires après applications de forces orthodontiques. Cette technique permet l'évaluation topographique des surfaces radiculaires.

Cela peut être par microscopie optique [97] ou par l'utilisation de la microscopie électronique à balayage [98]–[101]. Son usage reste bien sûr limité à *l'ex vivo*.

3.6. Microtomographie aux rayons X

Il s'agit d'une technique d'imagerie à rayons X utilisée pour visualiser des tissus minéralisés en trois dimensions et à haute résolution (jusqu'à 3 microns) [102], [103]. C'est une variante de la tomodensitométrie à haute résolution.

Par rapport à la microscopie, cette technique permet l'évaluation de la structure interne de la dent sans se limiter à la topographie radiculaire.

L'utilisation *in vivo* est limitée au laboratoire sur des animaux du fait des caractéristiques techniques de l'appareil, mais également de très hautes doses d'irradiations nécessaires pour obtenir des résultats de haute résolution. Ceci limite son utilisation à *l'ex vivo*, par exemple sur des dents humaines post-avulsion [102]–[104].

III. COMPARAISON ET DISCUSSION

1. CBCT : quand le prescrire ? quelle précision ?

Existe-t-il un consensus dans la littérature quant à l'utilisation du CBCT en orthodontie ? Quel est son apport au diagnostic des résorptions radiculaires d'origine orthodontique ? Il faut prendre en compte les réglages de l'appareil (subjectivité de l'appareil de mesure en fonction de la précision choisie).

L'avènement de la tomographie volumique à faisceau conique a révolutionné les sciences médicales, et plus particulièrement les spécialités d'odontologie et maxillofaciale. Une évaluation précise et en trois dimensions des structures et lésions est désormais possible [105].

Liedke et al. [106] évaluent l'effet de la résolution du CBCT sur la détection des résorptions radiculaires externes. Ils démontrent qu'une résolution de 0,3mm des voxels est la meilleure configuration pour détecter les résorptions radiculaires. Cela associe une grande performance diagnostique à une moindre exposition du patient aux irradiations. Le champ doit évidemment se limiter à la zone d'intérêt [5].

Une étude transversale a été menée sur 6 patients comprenant leur dossier orthodontique (photographies endo- et exobuccales ; téléradiographie de profil ; orthopantomogramme ; modèles d'étude) [90]. Cette étude vise à évaluer l'outil qu'est le CBCT lors du diagnostic orthodontique et du plan de traitement. Pour ce faire, ils interrogent 24 orthodontistes d'expérience variable. Les praticiens devaient établir un diagnostic puis un plan de traitement à partir du dossier orthodontique. Ensuite des coupes CBCT de ces mêmes cas leur ont été fournis. Il a été demandé aux praticiens si, en ayant le CBCT, ils apportaient des modifications à leur diagnostic et plan de traitement établis. Les résorptions radiculaires, les dents incluses ou un décalage squelettique important étaient les raisons les plus fréquentes de changements apportés aux diagnostic et plan de traitement. L'évaluation des ATM, les dysharmonies dents-arcades et l'évaluation des voies aériennes ne constituent pas une raison valable de prescription de CBCT d'après les auteurs. Ils ne recommandent la prescription d'un CBCT qu'en cas de justification claire, spécifique et clinique pour le patient sans généraliser.

Chez 152 patients d'une étude prospective, Lund et al. [70] décrivent une résorption radiculaire oblique dans 15% surfaces radiculaires palatines des incisives centrales maxillaires (soit 304 incisives). Parmi ces patients, un peu plus de la moitié avait ce type de résorption de surface sur au moins une dent. Les auteurs estiment que ce type de résorption radiculaire ne peut être détecté que par des imageries tomographiques.

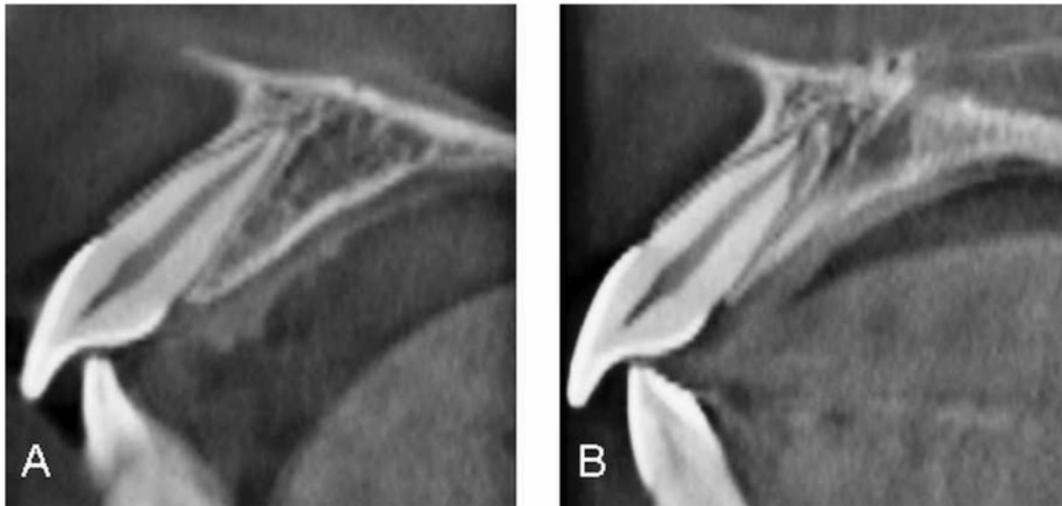


Figure 25 : (A) Exemple d'une incisive centrale supérieure avant le début de traitement - (B) Résorption radiculaire oblique en fin de traitement.

Dans l'étude de Dudic et al. [6] deux orthodontistes évaluent séparément la présence ou l'absence des résorptions radiculaires (selon la classification de Levander et Malmgren) sur 275 incisives maxillaires ou mandibulaires chez des patients ayant un orthopantomogramme de réévaluation et un CBCT. Des différences statistiques ont été retrouvées : 56,5% versus 31% de dents n'avaient pas de résorption par CBCT versus OPT respectivement. Cela soulignerait le fait que les résorptions radiculaires sont surestimées en radiographie 2D. Les auteurs ne prônent pas pour une généralisation de l'utilisation du CBCT, mais recommandant sa réalisation dans le cas de prise de décision concernant la poursuite ou non du traitement après diagnostic des résorptions radiculaires d'origine orthodontique.

Da Silva Campos et al. [91] évaluent 82 incisives présentant des résorptions radiculaires diagnostiquées par rétroalvéolaires après traitement orthodontique par multiattaches en technique Edgewise. Des clichés CBCT sont réalisés et les incisives sont évaluées sur une coupe

sagittale passant par le centre de la distance mésiodistale de la dent. Les auteurs définissent trois points de référence comme indiqué sur l'image ci-dessous :

- L (*labial*) : point le plus apical et vestibulaire où débute la résorption radiculaire.
- Li (*lingual*) : point le plus apical et lingual où débute la résorption.
- A (*apical*) : point le plus apical de la racine.

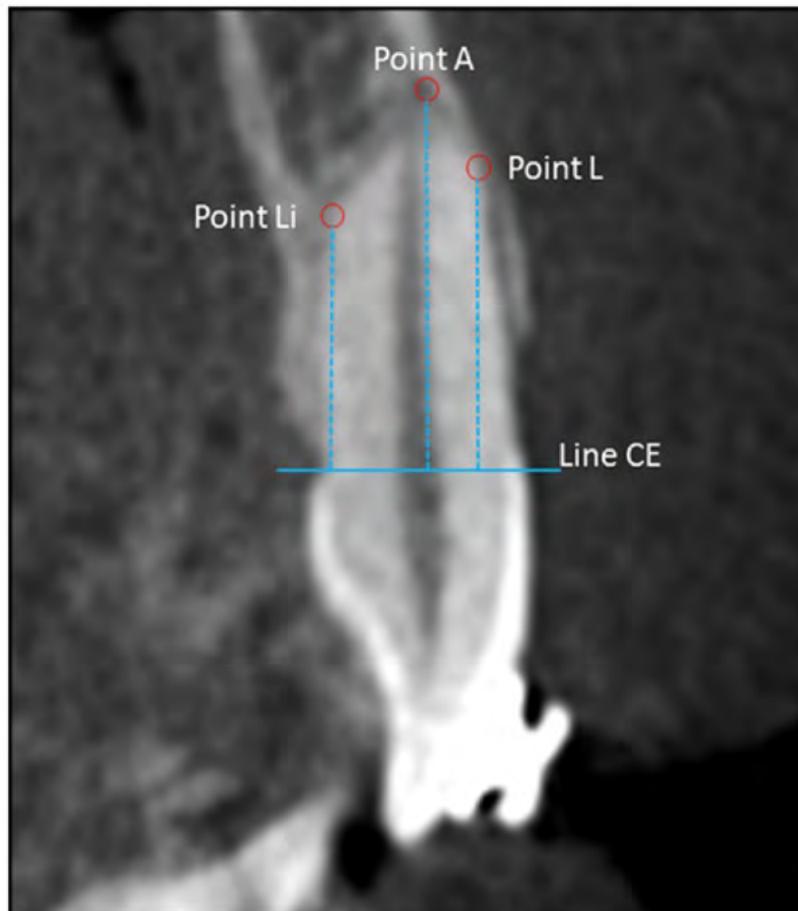


Figure 26 : Description des points utilisés pour l'évaluation (Da Silva Campos et al.).

Puis la ligne cémento-amélaire (CE, *cementoenamel*) perpendiculaire au grand axe de la dent est tracée et les longueurs des racines mesurées entre les points L, Li et A et leurs projections orthogonales sur la ligne CE.

La différence moyenne entre les parties les plus longues et les plus courtes des racines des incisives étaient de 1,35mm, soit 11,6% de la longueur totale de la racine serait affectée par une résorption non décelable par des radiographies bidimensionnelles. Dans la majorité des

incisives évaluées (92,7%), la résorption était plus importante en vestibulaire ou en lingual de la racine par rapport à la partie la plus longue, et cette différence était significative. Les auteurs concluent donc que ces superpositions sous-estiment l'étendue des résorptions radiculaires et peuvent modifier les objectifs du traitement et les résultats obtenus.

Freitas et al. [105] évaluent la fréquence des résorptions radiculaires apicales juste après le traitement et pendant la période de suivi de contention (suivi de 52 à 288 mois). Ils analysent les rétroalvéolaires et CBCT sur toutes les dents sauf les deuxièmes et troisièmes molaires chez 58 patients (1392 dents). Les dents étaient divisées en trois groupes : les dents antérieures, les prémolaires et les molaires. Ils retrouvent une plus grande fréquence de résorptions radiculaires apicales externes (RRAE) par rétroalvéolaires des prémolaires maxillaires et des prémolaires et molaires mandibulaires comparativement au CBCT. Cela suggère donc une surestimation des RRAE par rétroalvéolaires versus CBCT. Ces résultats sont en concordance avec les résultats de Dudic et al. mais pas avec les résultats de Da Silva Campos et al. [91]. Les auteurs expliquent cette différence par l'analyse réalisée sur un groupe de dents et non sur des dents individuelles. Les variations morphologiques, la densité osseuse et la superposition des structures peuvent influencer les interprétations radiographiques.

La méta-analyse d'une revue systématique plus récente avec diagnostic des RR par CBCT apporte une réponse plus nuancée : dans la région antérieure maxillaire, les RR sont surestimées lorsqu'elles sont diagnostiquées par rétroalvéolaires [79].

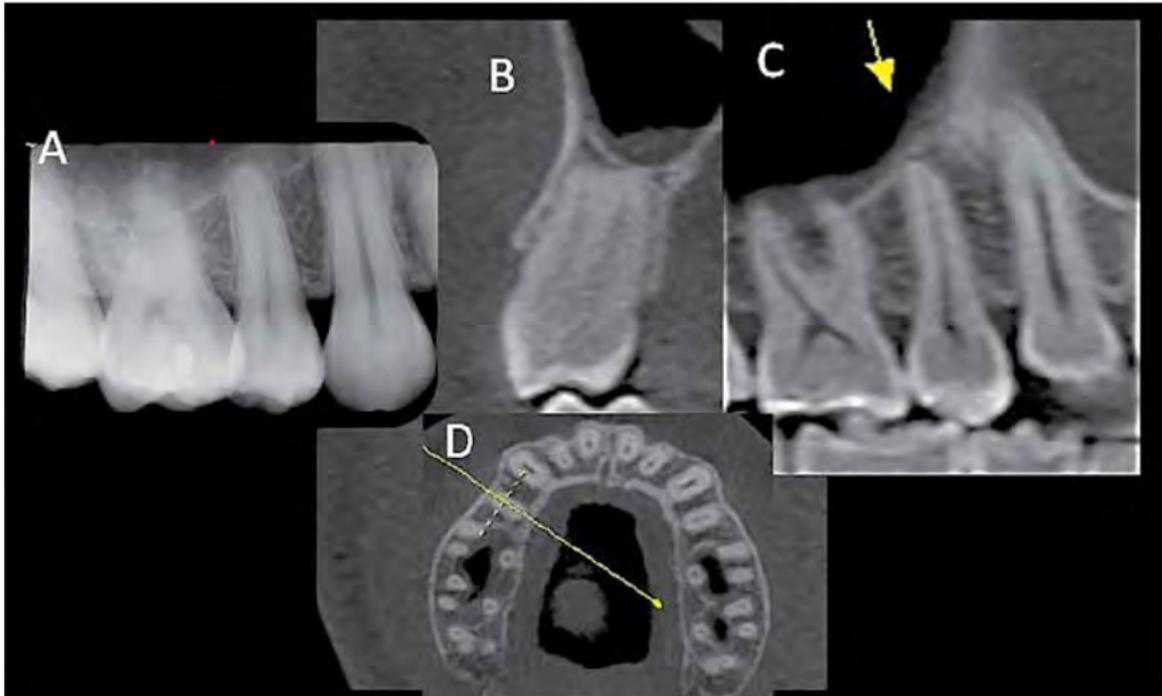


Figure 27: Rétroalvéolaire d'une prémolaire maxillaire droite montrant une RR de score 2 de Levander et Malmgren (A). La même dent sur CBCT montrant une absence de RR (B à D) (Freitas et al.).

Une autre méta-analyse évaluant le diagnostic radiologique des RR par CBCT versus rétroalvéolaires a été retrouvée dans la littérature [107]. Elle est cependant réalisée sur des études *in vitro*. D'après les auteurs, analyser les études *in vitro* permet d'avoir une meilleure simulation des RR ainsi que des résultats plus fiables. La méta-analyse est réalisée sur 15 articles. Les auteurs concluent à une sensibilité plus élevée du CBCT (0,89 IC95% [0,77-0,96]) comparativement aux rétroalvéolaires (0,68 IC95% [0,56-0,78]). L'avantage du CBCT réside dans la possibilité d'explorer en trois dimensions les dents suspectées. Donc le CBCT semble à privilégier pour diagnostiquer les RR lorsqu'elles sont réellement présentes. Il n'y avait pas de différence significative pour la spécificité entre les deux techniques ; les deux types d'examen sont équivalents en termes de diagnostic d'absence de RR lorsqu'elles sont réellement absentes. L'aire sous la courbe était de 0,96 (IC95% [0,94-0,98]) pour le CBCT versus 0,88 (IC95% [0,85-0,90]) pour les rétroalvéolaires. Cela témoigne d'une précision et d'un pouvoir diagnostic important du CBCT qui reste néanmoins assez important pour les rétroalvéolaires.

Le CBCT trouve en particulier son intérêt en cas des résorptions radiculaires associées aux canines incluses [108]. Il apporte des informations nécessaires voire indispensables à l'établissement du plan de traitement. On peut en déduire la position précise dans l'espace des canines incluses, la proximité avec les autres dents et le degré de sévérité des résorptions radiculaires éventuelles, ainsi que planifier l'abord chirurgical et la direction de traction. Ces informations restent limitées en radiographies 2D.

Les résorptions radiculaires externes (RRE) associées aux canines incluses sont assez fréquentes. D'après la revue systématique et méta-analyses de Schroder et al. [109], la prévalence des RRE varie entre 8,20% et 89,6% pour les incisives latérales maxillaires et entre 1,2% et 35,1% pour les incisives centrales maxillaires. Une autre méta-analyse plus récente trouve une prévalence des RRE pour les incisives latérales de 25% à 70% [110].

Ainsi, pour ces RRE associées aux canines incluses, l'intérêt du CBCT a largement été démontré [108], [111]–[115]. Celui-ci apporte des informations précises sans superpositions des structures et permet également d'évaluer les résorptions radiculaires vestibulaires et palatines qui ne sont pas identifiables par radiographie conventionnelle en 2D.

Quant aux résorptions cervicales, dans leur étude prospective, Villefrance et al. ont montré que plus d'un tiers des résorptions cervicales sur 254 dents étaient classifiées avec une sévérité plus importante sur CBCT (sur la classification de Heithersay) par rapport aux rétroalvéolaires. Des résultats similaires ont été trouvés quand ils ont évalué l'atteinte pulpaire ; celle-ci était plus précise par CBCT [116].

D'autres études confirment les résultats de Villefrance et al. ; le CBCT a une sensibilité et une spécificité plus élevées pour le diagnostic des résorptions cervicales comparé aux rétroalvéolaires périapicales [117]–[120]. Le CBCT semble aujourd'hui indispensable pour le diagnostic des résorptions cervicales : il permet de décrire l'étendue en trois dimensions, d'évaluer l'atteinte pulpaire éventuelle, de déterminer le traitement adapté et d'envisager pronostic [121].

Alamadi et al. [89] apportent une réponse nuancée en comparant le diagnostic des résorptions apicales entre les différents examens radiologiques (rétroalvéolaires périapicales, orthopantomogramme et CBCT) avec le diagnostic histologique (qu'ils considèrent comme le gold-standard):

- Il y avait une différence significative entre les stades de résorptions apicales (classification de Malmgren et al. modifiée) déterminées sur l'orthopantomogramme et les rétroalvéolaires périapicales versus le gold-standard ;
- Il n'y avait pas de différence significative du diagnostic des stades de résorptions entre CBCT et gold-standard ;
- Pour des mesures linéaires, il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les rétroalvéolaires et le CBCT versus le gold-standard. Les mesures trouvées sur l'orthopantomogramme étaient cependant différentes de façon significative par rapport à celles trouvées par CBCT et rétroalvéolaires. L'orthopantomogramme sous-estimerait donc les résorptions ;
- Le rétroalvéolaires sont comparables au CBCT mais n'apportent pas d'informations tridimensionnelles sur les résorptions radiculaires.

Plusieurs auteurs confirment que la tomographie volumique à faisceau conique ne peut être utilisée en première intention en substitution des examens radiologiques classiques utilisés en orthodontie qui restent assez informatifs [83], [122].

En 2009, la HAS conclue que les mesures céphalométriques obtenues avec le CBCT sont comparables à celles obtenue en radiographie conventionnelle. Elle conseille l'utilisation du CBCT en substitution du scanner quand une analyse 3D est indispensable, au regard du principe de radioprotection et selon des règles d'optimisation [123].

2. Microtomographie à rayons X – microscopie : exploration *ex vivo*

Dans un essai clinique contrôlé randomisé, Harris et al. évaluent l'effet des forces d'ingression (lourdes 225g ; légères 25g et contrôle 0g) sur les résorptions radiculaires. Ils analysent les premières prémolaires maxillaires par l'utilisation de la microtopographie à rayons X (après l'avulsion de ces prémolaires dans le cadre du traitement orthodontique). Ils concluent à une

différence statistiquement significative entre le volume moyen des lacunes de résorptions sur les prémolaires ayant reçues des forces lourdes versus légères et contrôle [124]. Cela n'aurait pas pu être évalué avec l'utilisation des examens radiologiques conventionnels.

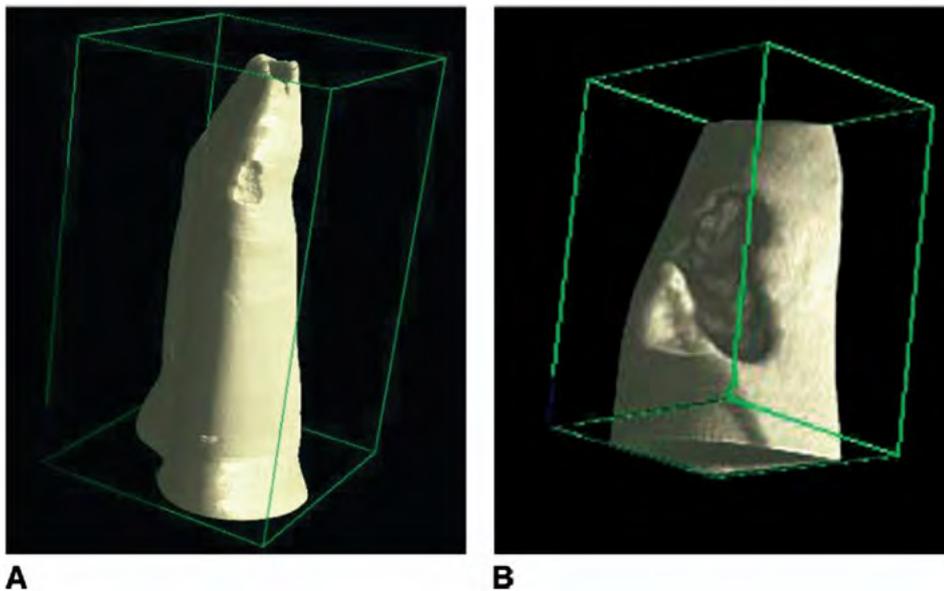


Figure 28: A. Image d'une première prémolaire maxillaire par microtomographie aux rayons X montrant une lacune de résorption radiculaire au tiers apical de la surface linguale. B. Lacune de résorption radiculaire en détail (Harris et al).

Harry et Sims [98] évaluent également les résorptions par microscopie électronique à balayage après applications de différents niveaux de forces ingressives sur des prémolaires et sur une durée plus ou moins longue. Des résorptions sont observées même pour une durée courte (14jours) et pour des forces légères (50g). On peut en conclure que les résorptions radiculaires sont quasi ubiquitaires lors d'un traitement orthodontique [3], [18], [47]–[49].

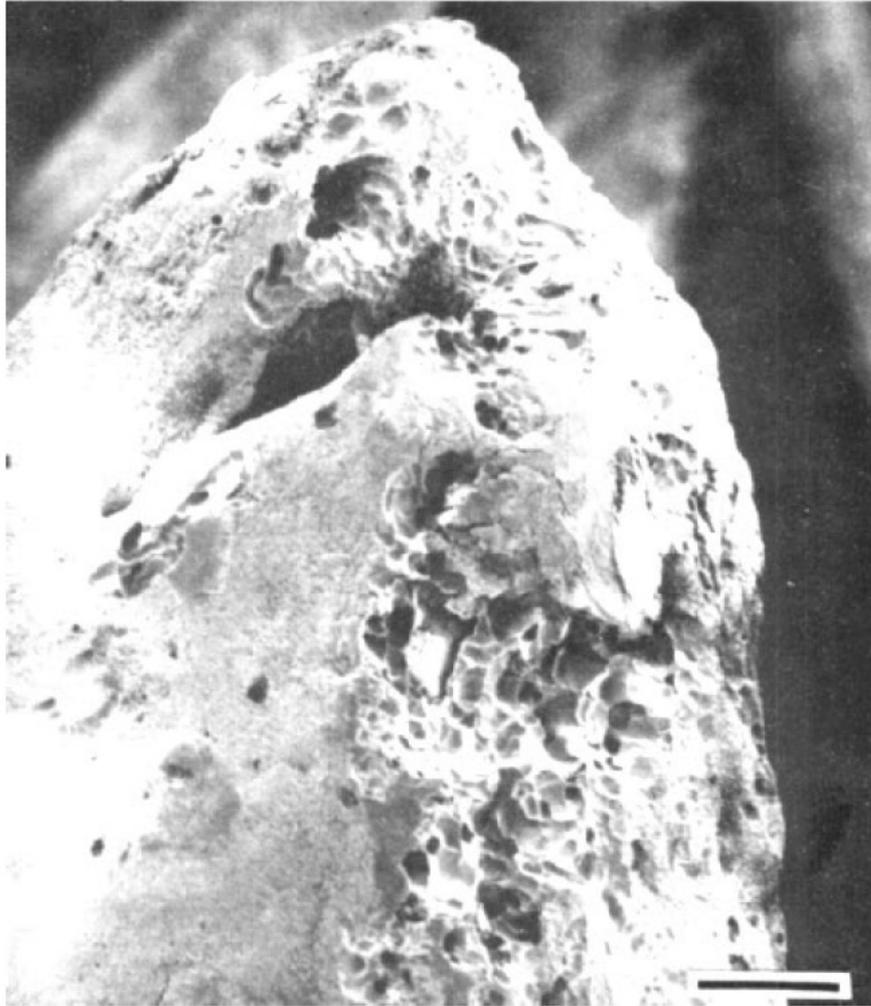


Figure 29: Résorption apicale après 14 jours d'application de forces d'ingression à 50 grammes. Aspect lingual d'une prémolaire maxillaire. Préparation anorganique. Barre noire = 200 μ m. Grossissement initialx40 (Harry et Sims). Microscopie électronique à balayage.

Que ce soit par microscopie ou par microtomographie, ces résultats s'appuient sur des études de dents avulsées après application de forces expérimentales [26].

Un raccourcissement radiculaire conduit à une modification du rapport couronne/racine. Il est étudié dans la littérature qu'un raccourcissement radiculaire de 3mm équivaut à une perte osseuse crestale de 1mm [125]; et un raccourcissement de 4mm équivaut à 20% de perte d'attache, ce qui pourrait accélérer la maladie parodontale [4], [72], [126], [127].

D'après Chan et al., avec une utilisation optimale, l'imagerie 2D pourrait être un bon outil de diagnostic des résorptions radiculaires [88].

3. La région apicale

La plupart des études se concentrent sur l'effet des forces orthodontiques lourdes sur les résorptions radiculaires. Nous avons vu que d'après les études de Brudvik et al. [29]–[32], [37], la zone hyaline semble jouer un rôle dans les résorptions radiculaires. Au niveau biomécanique, le déplacement orthodontique des dents est rarement un mouvement de translation pure [128], [129]. De ce fait, des forces lourdes peuvent rapidement être néfastes en raison de l'augmentation biomécanique du stress apical.

Plusieurs théories tentent d'expliquer pourquoi les résorptions radiculaires apicales se produisent irréversiblement par rapport aux résorptions de surface qui connaissent une réparation [19], [128]–[130]:

- Le centre de résistance (qui est occlusal au tiers radiculaire apical) et l'orientation différente des fibres du desmodonte pourraient augmenter le traumatisme dans les tiers radiculaires moyen et apical lors des mouvements orthodontiques.
- Le tiers radiculaire apical est recouvert de ciment cellulaire tandis que les tiers médian et occlusal sont recouverts de ciment acellulaire. Le ciment cellulaire dépend de cellules actives et d'un support vasculaire par le desmodonte, ce qui le rend plus vulnérable aux traumatismes et aux lésions cellulaires.
- Le ligament parodontal présente une vascularisation plus importante en apical avec une demande métabolique plus élevée pour assurer un rôle protecteur des tissus dento-parodontaux [131]. Cela est démontré chez l'animal.
- La différence du module d'élasticité des deux types de ciment pourrait également intervenir. La dureté du ciment d'une prémolaire est décroissante de cervical en apical. [132]

Plus récemment, Brezniak et Wasserstein [47], [50] proposent d'autres théories :

- Le paquet vasculo-nerveux du foramen apical ne serait pas indifférent aux forces orthodontiques délivrées. Le lien entre le paquet vasculonerveux et les résorptions radiculaires apicales n'est pas établi. Cependant, la protection de ce paquet pourrait jouer un rôle important dans le processus de résorption apicale.

- L'apex est le seul endroit où la dentine/pré-dentine et le cément/précément se rejoignent, pouvant constituer une zone de faiblesse. La pré-dentine et dentine apicale qui constituent l'échafaudage de la racine, peuvent être éliminées par des cellules inflammatoires clastiques, écartant ainsi toute possibilité de réparation radiculaire. L'apex reste une région complexe qui ne se résume pas à un seul foramen apical dans la majorité des cas.
- L'os alvéolaire de la région apicale est plus dense et moins déformable que l'os cervical, empêchant la dissipation immédiate des pressions exercées par les forces orthodontiques.

Même sous l'effet de forces d'ingression, d'égression ou de déplacement de plusieurs millimètres, la dent ne perd pas sa sensibilité pulpaire. Le phénomène de résorption apicale pourrait être un mécanisme protecteur de ce paquet afin d'éviter sa lésion lorsqu'il est comprimé, étiré ou déplacé [47].

Ces mêmes auteurs proposent un nouveau terme pour définir l'inflammation ayant lieu dans le desmodonte après application de forces orthodontiques : l'orthodontite. Celle-ci serait un mécanisme de défense de l'organisme face aux forces orthodontiques. Elle permet le mouvement orthodontique des dents par remodelage osseux et intervient dans le remodelage du cément[48].

Ils divisent l'orthodontite en deux sous-types :

- Réversible : inévitable pendant le traitement orthodontique. On observe un remodelage osseux et des lacunes de résorption qui peuvent se produire sur toute la surface radiculaire. Elles sont ensuite réparées par apposition de cément.
- Irréversible : similaire à la première mais induit des résorptions radiculaires apicales externes avec raccourcissement radiculaire.

Ils proposent de différencier les résorptions radiculaires inflammatoires externes d'origine orthodontique (terme proposé par eux initialement) en deux : celles conduisant à un raccourcissement radiculaire visible par imagerie conventionnelle et celles ne conduisant pas au raccourcissement radiculaire [47], [49]. ***In fine, les forces orthodontiques s'accompagnent toujours d'un certain degré de résorptions radiculaires non visibles par imagerie***

conventionnelle comme le montrent les études par microscopie et microtomographie aux rayons X [98], [124].

En 1942, Oppenheim [133] écrivait : « Je suggère que les termes de résorption radiculaire et résorption cémentaire ne soient pas utilisés de manière interchangeable. Alors que la résorption radiculaire désigne un véritable raccourcissement de la racine, dont la cause n'est pas encore connue, la résorption cémentaire désigne uniquement une perte de substance dentaire qui n'est pas nécessairement localisée à l'apex. La cause de son apparition est bien connue. Alors que les résorptions radiculaires sont relativement rares, les résorptions cémentaires sont toujours présentes dans les traitements orthodontiques. »

Wasserstein et Brezniak essaient de s'appuyer sur ce qui a été dit avant pour changer la façon dont nous considérons les résorptions radiculaires d'origine orthodontique [47]–[50].

Il faut donc distinguer **le raccourcissement radiculaire apical (RRA)** des **résorptions radiculaires de surface** qui sont deux processus **différents** [134]. Le premier processus est un phénomène irréversible qui préoccupe particulièrement les orthodontistes ; le deuxième est toujours présent au niveau histologique lorsqu'on applique des forces orthodontiques [47]–[49], [98], [124], [134], [135].

4. Les résorptions cervicales

Dans leur revue systématique en 2022, Khalaf et al. [136] arrivent à la conclusion suivante : l'orthodontie peut avoir un potentiel de déclenchement des résorptions radiculaires cervicales, cependant l'association entre les deux reste floue par manque d'études de bonne qualité. Ce sont en majorité des études transversales ou des séries de cas.

Les manifestations cliniques des résorptions cervicales apparaissant longtemps après stimulus initial ; de ce fait, il existe peu d'études sur l'orthodontie comme facteur de risque de développement des résorptions radiculaires cervicales [137]. Quoi qu'il en soit, les traitements orthodontiques et les raisons traumatiques semblent être souvent évoqués mais il manque des études avec un niveau de preuve plus élevé [138].

5. Interruption temporaire du traitement orthodontique

Cheng et al. [42], [139] réalisent une étude histologique et radiologique sur des prémolaires auxquelles des forces orthodontiques sont appliquées avant une période de contention (4 ou 8 semaines). Les prémolaires ont été ensuite avulsées dans le cadre du traitement orthodontique. Huit semaines d'arrêt de forces orthodontiques sont nécessaires pour avoir une réparation anatomique des cavités de résorption, contre seulement quatre à six semaines pour les réparations partielle et fonctionnelle (cf. 3.2). A quatre semaines, la réparation était continue et régulière avec un infiltrat inflammatoire laissant présager une présence latente de cellules clastiques (cela concorde avec la notion de résorption/cicatrisation) ; celles-ci n'ont pas été retrouvées à huit semaines. Ils concluent qu'une période de repos de minimum quatre semaines était essentielle pour l'initiation du processus de réparation des résorptions. Ceci vient corroborer l'étude initiale d'Owman-Mall et al. [36] qui remarque une réparation anatomique des résorptions radiculaires à 8 semaines. Cependant, il est difficile d'expliquer pourquoi certaines dents n'ont pas de réparation anatomique même après une période de repos de 8 semaines.

L'étude plus récente de Mehta et al. [39] vient confirmer ces résultats trouvés auparavant : une période de 8 semaines est nécessaire pour avoir une réparation anatomique. A 6 semaines, on retrouve des réparations partielles et/ou fonctionnelles mais pas anatomiques.

Ces études sont cependant réalisées sur des prémolaires soumises à des forces orthodontiques sur une période courte (quatre semaines). Cela ne reflète donc pas forcément la réalité des traitements orthodontiques qui durent, d'après une méta-analyse de 2020, en moyenne 30,1 mois pour un traitement complet par multiattaches [140]. Cliniquement, des études de cette durée ne sont pas envisageables pour des raisons éthiques entre autres.

En 1995, Levander et Malmgren [141] évaluent l'effet d'une pause de 2 à 3 mois dans le traitement orthodontique après diagnostic de résorptions radiculaires apicales. Ils ont divisé en deux groupes des patients traités en technique Edgewise : groupe I : 30 dents, sans pause ; groupe II : 32 dents, avec une pause de 2 à 3 mois dans le traitement. Les résorptions radiculaires apicales sont évaluées sur des rétroalvéolaires avec angulateurs individualisés (empreinte des bords incisifs) pour chaque patient afin d'améliorer la reproductibilité. Dans le groupe I les résorptions apicales étaient plus importantes que dans le groupe II de façon

significative. Cet arrêt du processus de résorption après une pause dans le traitement pourrait provenir d'un ciment réparé plus résistant que le ciment initial mais cela reste à démontrer.

Les recommandations de bonne pratique de la Haute Autorité de Santé (HAS) préconisent la recherche d'un compromis et la réévaluation des objectifs initiaux des traitements en cas de résorptions radiculaires apicales externes considérées comme anormaux, excessives et/ou sévères (>4mm) [142].

Après la fin du traitement, une surveillance annuelle est nécessaire chez tous les patients traités orthodontiquement avec une attention portée sur la recherche de zones résorptives [142]. Une surveillance plus rapprochée en début de traitement est conseillée au moindre doute. **En cas de résorption avérée, une pause de 2 à 3 mois du traitement est généralement recommandée** en maintenant des arcs passifs [143], [144]. Cette période est déterminée d'après les publications de la littérature et varie entre 2 et 6 mois [19], [36], [39], [42], [128], [139], [145], [146]. Il faut néanmoins s'assurer de l'absence de forces parafunctionnelles ou d'autres forces occlusales qui pourraient aggraver le processus de résorption pendant la période d'arrêt.

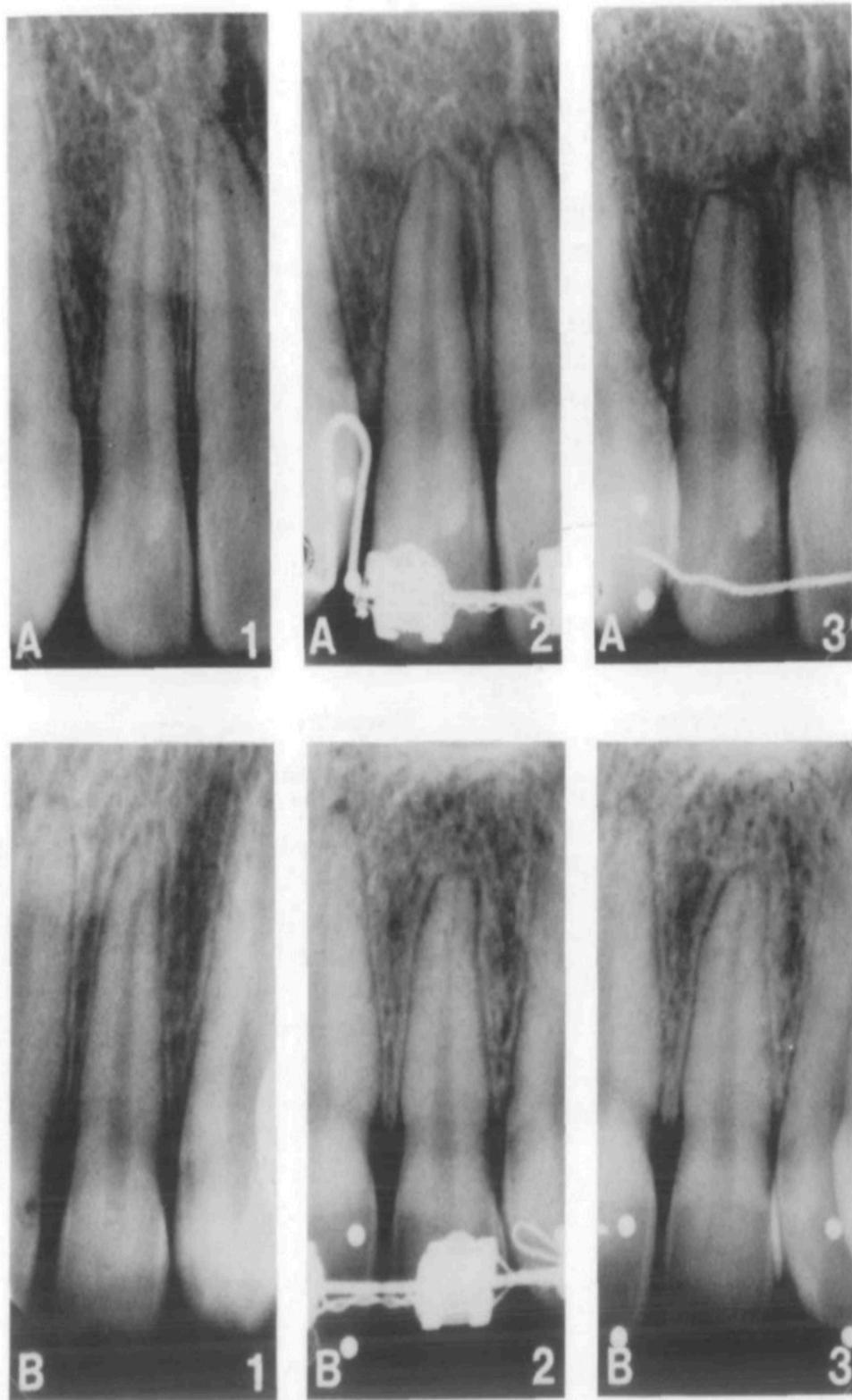


Figure 30: Effet d'une résorption radulaire. (A) Traitement sans pause : (1) avant traitement, (2) lors du diagnostic initial de la résorption radulaire, et (3) après traitement. (B) Avec une pause dans le traitement : (1) avant traitement, (2) lors du diagnostic initial de la résorption radulaire, et (3) après traitement (*Levander et Malmgren*).

IV. GESTION CLINIQUE

1. Avant le traitement

Il faut constituer le dossier orthodontique avec des radiographies de bonne qualité. Identifier les facteurs de risque éventuels des résorptions sur les radiographies. S'il persiste des doutes, réaliser d'autres examens qui semblent nécessaires au cas par cas (rétroalvéolaires ou CBCT par exemple si les informations sont insuffisantes sur l'orthopantomogramme et la téléradiographie de profil) [38], [130].

Réaliser l'anamnèse médicale complète et identifier les risques liés aux antécédents des patients ainsi qu'à leur état de santé.

Informez les patients sur tous les risques inhérents à l'orthodontie [147]. Il n'existe pas de traitement sans risque. Il est conseillé de remettre aux patients des plaquettes d'information sur les avantages, inconvénients et risques liés à l'orthodontie. L'obtention du consentement libre et éclairé est indispensable.

2. Pendant le traitement

Des radiographies de contrôle sont nécessaires pendant le traitement. Chez les patients considérés comme plus à risque de développer des résorptions radiculaires, des radiographies de contrôle peuvent être réalisées à 6 mois. Sinon, il faut réaliser un cliché de contrôle à 12 mois du début de traitement au plus tard [38], [148], [149]. Ces radiographies doivent être comparées aux radiographies initiales.

Si des résorptions inférieures à 2mm sont diagnostiquées : évaluer l'amplitude de mouvement qui reste à réaliser et décider de la suite [38], [148] :

- Continuer le traitement si les mouvements restent minimales ;
- Arrêter le traitement pendant une période de 2 à 6 mois et/ou modifier les objectifs initiaux.

Si des résorptions supérieures à 3 mm sont diagnostiquées : une pause dans le traitement est fortement recommandée (de 2 à 6 mois)[38].

Si des résorptions supérieures à 4mm sont diagnostiquées :

- Une pause dans le traitement est indispensable, d'une durée de 2 à 6 mois ;
- Il faut réévaluer les objectifs fixés et terminer le traitement au plus tôt possible.

Après une pause chez des patients diagnostiqués avec des résorptions radiculaires externes à la suite du traitement orthodontique, une réévaluation radiographique est recommandée tous les 6 mois après la reprise [148]. Il faut donc une surveillance radiologique pour apprécier l'évolution du phénomène résorptif.

Dans tous les cas, le patient doit être informé de la présence des résorptions radiculaires ; il faut discuter des conséquences éventuelles [38], [128], [148]. Dans l'optique d'une approche centrée sur la personne, la prise de décision doit être partagée entre le patient et le praticien après information claire et loyale afin d'obtenir le consentement libre et éclairé [147]. Le chirurgien-dentiste traitant du patient doit être tenu au courant de la décision.

Il est généralement recommandé de garder les arcs déjà en bouche. Si des mouvements orthodontiques sont encore susceptibles d'être induits par ces arcs, il est conseillé de mettre en place un arc rond, non acier et de faible section. Il convient de vérifier l'absence d'interférences occlusales pendant la pause. Des ligatures longues peuvent être mises en place pour les espaces d'avulsions [38].

3. Après le traitement

Si les résorptions radiculaires sont diagnostiquées en fin de traitement :

- Informer le patient et le chirurgien-dentiste traitant du patient ; il faut souligner que les résorptions radiculaires ne continuent pas après le traitement orthodontique [150]. Un émoussement apical des racines peut être plus tard observé par radiographie (apposition cémentaire). Informer le patient [38], [148] :
 - o qu'il ne perdra pas ses dents si le parodonte reste sain [151] ;
 - o qu'il n'y aura pas de sensibilité ou de douleurs à cause de ces résorptions [17] ;
 - o qu'une mobilité des dents peut être observée en fonction de l'étendue des résorptions radiculaires externes.
- Il n'a pour le moment pas été décrit de perte dentaire à la suite de résorptions radiculaires d'origine orthodontique, même sévères [18], [152]–[157] ;

- Mettre en place le protocole de contention habituellement utilisé et réaliser un suivi de contention habituel pour vérifier que les fils de contention restent passifs. Si les résorptions sont très sévères (avec un rapport couronne/racine de 1 par exemple), des contentions collées peuvent être placées sur les dents concernées en fonction de l'appréciation clinique de la situation [17].

CONCLUSION

Les traitements orthodontiques s'accompagnent toujours de résorptions radiculaires. Il faut cependant distinguer les résorptions de surface qui sont réversibles des résorptions apicales conduisant au raccourcissement irréversible des racines.

Les patients et leurs parents doivent, dans tous les cas, être informés des risques liés au traitement orthodontique par recueil de consentement éclairé.

Les méthodes tridimensionnelles de diagnostic et de quantification des résorptions radiculaires s'avèrent plus précises que celles utilisées en imagerie conventionnelle en deux dimensions [5], [102], [103]. *In vivo*, il manque toujours un gold-standard dans la détection des résorptions radiculaires externes d'origine orthodontique.

Si des résorptions sont diagnostiquées pendant un traitement orthodontique, il est impératif d'interrompre le traitement et les forces pendant deux à trois mois pour permettre une certaine cicatrisation cémentaire. Si les résorptions radiculaires s'aggravent après la reprise du traitement, les objectifs et le plan de traitement seraient à modifier au cas par cas [26], [73].

Des pistes d'explorations existent pour réduire le phénomène de résorption par l'administration de certains composés chimiques ou par photobiomodulation [158]–[160]. Néanmoins, il serait intéressant d'explorer la variabilité interindividuelle ainsi que le moment critique où les résorptions radiculaires de surface se traduisent par un raccourcissement radiculaire.

Vu, le président du jury :

Pr F. Vaysse



Vu, les directeurs de thèse :

Dr M. Rotenberg



Dr M. Gurgel-Georgelin



LISTES DES ILLUSTRATIONS ET TABLEAUX

FIGURE 1: COUPE HISTOLOGIQUE DU DESMODONTE (PDL) COMPRIME APRES PLUSIEURS JOURS D'APPLICATION DE FORCES. NOTEZ LA BORDURE IRRÉGULIÈRE DE LA LAMINA DURA DU CÔTÉ DE LA MOELLE OSSEUSE, RESULTAT DE LA RESORPTION PAR LES OSTEOCLASTES. (PROFFIT ET AL.) – TOOTH : DENT ; NECROTIC PDL OU PERIODONTAL LIGAMENT : DESMODONTE NECROTIQUE ; LAMINA DURA : LAMINA DURA ; BONE MARROW SPACE : MOELLE OSSEUSE.	17
FIGURE 2: SECTION CORONAIRE DE L'OS ALVEOLAIRE D'UNE RACINE DE PREMOLAIRE BOUGÉE VERS LA GAUCHE (GRANDE FLECHE CENTRALE). NOTEZ LA ZONE DE COMPRESSION DU DESMODONTE A GAUCHE ET DE DILATATION A DROITE. NOTEZ EGALEMENT LA DILATATION DES VAISSEAUX A DROITE ET L'ACTIVITE OSTEOBLASTIQUE (A). DES CELLULES OSTEOCLASTIQUES SONT PRESENTES A GAUCHE (B). ZONES DE RESORPTION RADICULAIRE DANS LA DENTINE, QUI SERONT PAR LA SUITE REPARÉES PAR APPPOSITION CEMENTAIRE (C) (PROFFIT ET AL.).	20
FIGURE 3: LACUNES DE RESORPTIONS SANS REPARATION, CONDUISANT A LA RESORPTION RADICULAIRE APICALE EXTERNE PAR CONFLUENCE (ABBAS ET AL.).	21
FIGURE 4: CYCLE DE RESORPTION RADICULAIRE DE SURFACE ET DE REPARATION LORS DU MOUVEMENT ORTHODONTIQUE (SAMESHIMA ET AL.).	22
FIGURE 5: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES NIVEAUX DE REPARATION CEMENTAIRE. LACUNES DE RESORPTION MONTRANT L'ABSENCE DE REPARATION (A) ; UNE REPARATION PARTIELLE (B) AVEC SEULEMENT UNE PARTIE DE LA SURFACE COUVERTE DE CEMENT DE REPARATION (FLECHE) ET LA SURFACE RESTANTE EXPOSÉE (TRIANGLE) ; UNE REPARATION FONCTIONNELLE (C) AVEC LA TOTALITE DE LA SURFACE COUVERTE DE CEMENT DE REPARATION, SANS RESTAURER LE CONTOUR RADICULAIRE INITIAL ET REPARATION ANATOMIQUE (D) AVEC LA TOTALITE DE LA SURFACE COUVERTE DE CEMENT DE REPARATION, RETABLISSANT LE CONTOUR RADICULAIRE INITIAL (MEHTA ET AL.).	23
FIGURE 6: CYCLE DE REMODELAGE AU NIVEAU APICAL. CONTRAIREMENT A LA SURFACE RADICULAIRE, A L'APEX DE LA DENT LE CYCLE PEUT ETRE INTERROMPU LORSQU'UNE COMBINAISON INCONNUE DE FACTEURS PROVOQUE DES DOMMAGES IRREPARABLES. IL EN RESULTE UNE RESORPTION RADICULAIRE APICALE PERMANENTE ET IRREVERSIBLE. SI LES FORCES SONT MAINTENUES ET QUE LES FACTEURS DEMENTURENT, LE CYCLE SE REPETE ET LES DOMMAGES APICAUX S'AGGRAVENT (SAMESHIMA ET AL.).	24
FIGURE 7: ILLUSTRATION D'UNE RESORPTION INTERNE.	26
FIGURE 8: ILLUSTRATION DE LA SITUATION INITIALE (DENT INDEMNÉ DE RESORPTIONS RADICULAIRES). COUCHE DE PROTECTION INTERNE REPRESENTÉE EN VERT.	26
FIGURE 9: ILLUSTRATION DES RESORPTIONS EXTERNES DE SURFACE A) SITUATION INITIALE. LA COUCHE DE PROTECTION EXTERNE EST REPRESENTÉE EN VERT. B) LÉSION DE LA COUCHE DE PROTECTION EXTERNE (FLECHE NOIRE). C) INFLAMMATION LOCALE INDUITE PAR LA LÉSION DE LA COUCHE DE PROTECTION. D) ARRÊT DU PROCESSUS ET REPARATION.	26
FIGURE 10: ILLUSTRATION D'UNE RESORPTION EXTERNE CERVICALE. A) LÉSION DE LA COUCHE DE PROTECTION EXTERNE DE LA REGION CERVICALE INITIANT LE PROCESSUS DE RESORPTION. B) MAINTIEN DU PROCESSUS DE RESORPTION PAR LES BACTERIES PROVENANT DU SULCUS GINGIVAL ET/OU DE LA SURFACE DE LA DENT.	27
FIGURE 11: ILLUSTRATION D'UNE RESORPTION RADICULAIRE APICALE EXTERNE.	27
FIGURE 12 : ANKYLOSE ET RESORPTION DE REMPLACEMENT. A) REIMPLANTATION D'UNE DENT EXPULSÉE APRES UN TEMPS EXTRA-ORAL LONG AYANT ENTRAINE UNE NECROSE MASSIVE DES CELLULES DE LA COUCHE DE PROTECTION EXTERNE. B) CONTACT DIRECT ENTRE LA SURFACE RADICULAIRE ET L'OS ALVEOLAIRE (ANKYLOSE). C) LA RACINE RESORBÉE EST REMPLACÉE PAR DE L'OS ALVEOLAIRE (RESORPTION DE REMPLACEMENT).	27
FIGURE 13: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DES RESORPTIONS CERVICALES INVASIVES (HEITHERSAY).	28
FIGURE 14 : RESORPTION RADICULAIRE APICALE – CLASSIFICATION DE MALMGREN ET AL. (1 A 4) MODIFIÉE PAR LEVANDER ET AL. AVEC MISE EN PLACE DE STADE 0 (RACINE INTACTE).	30
FIGURE 15: LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE, MONTRANT LES PRINCIPALES ONDES ELECTROMAGNETIQUES AVEC LEURS LONGUEUR D'ONDE (WAVELENGTH) ET LEUR FREQUENCE (FREQUENCY). LES RAYONS X (X RAYS) SONT ENTOURÉS (WHAITES ET AL.).	36
FIGURE 16: EXEMPLE DE LIMITATION D'UN CHAMP D'EXPLORATION SUR UN ORTHOPANTOMOGRAMME. POUR LES REEVALUATIONS EN COURS DE TRAITEMENT ORTHODONTIQUE, CETTE TECHNIQUE PERMET UNE REDUCTION SIGNIFICATIVE DE L'IRRADIATION DU PATIENT (FELIZARDO ET AL.).	37
FIGURE 17: ÉQUIVALENCE DES RISQUES EN RADIODIAGNOSTIC ODONTOLOGIQUE (FELIZARDO ET AL.).	38
FIGURE 18: ORTHOPANTOMOGRAMME INITIAL AVANT TRAITEMENT ORTHODONTIQUE D'INTERCEPTION (HAUT) ET FINAL (BAS) ILLUSTRANT L'IMPACT DE LA POSITION DES INCISIVES SUR LA LONGUEUR RADICULAIRE (SAMESHIMA ET AL.).	40
FIGURE 19: TELERADIOGRAPHIES DE PROFIL DU MEME PATIENT MONTRANT LES CHANGEMENTS DANS L'ANGULATION DES INCISIVES (SAMESHIMA ET AL.).	41

FIGURE 20: ILLUSTRATION DU POSITIONNEMENT IDEAL DU CAPTEUR ET DU TUBE A RAYONS X DANS LA TECHNIQUE DES PARALLELES (LEACH ET AL.).....	44
FIGURE 21: ILLUSTRATION DE LA TECHNIQUE DE LA BISSECTRICE DE L'ANGLE FORME PAR L'AXE DE LA DENT ET L'AXE DU FILM (NDLR: BISSECTRICE MAL SCHEMATISEE). LES RAYONS X DOIVENT VISER L'APEX DE LA DENT EN RESTANT PERPENDICULAIRE A LA BISSECTRICE (LEACH ET AL.).....	45
FIGURE 22: ILLUSTRATION MONTRANT LES EFFETS D'UN MAUVAIS POSITIONNEMENT VERTICAL DU TUBE A RAYONS X. A) IMAGE OBTENUE RACCOURCIE PAR RAPPORT A LA LONGUEUR DE LA DENT EN BOUCHE ; B) IMAGE OBTENUE ALLONGEE (LEACH ET AL.).....	45
FIGURE 23: MESURE DES LONGUEURS RADICULAIRES (R) ET CORONAIRES (C) ET CALCUL DES FACTEURS DE CORRECTION D'AGRANDISSEMENT (LINGE ET LINGE).....	46
FIGURE 24 : ILLUSTRATION DE L'ERREUR DE PARALLAXE QUI SE PRODUIT LORS DES RADIOGRAPHIES 2D. LA DENT DOIT ETRE PARALLELE AU CAPTEUR POUR AVOIR UNE EVALUATION QUANTITATIVE CORRECTE (CHAN ET AL.).....	47
FIGURE 25 : (A) EXEMPLE D'UNE INCISIVE CENTRALE SUPERIEURE AVANT LE DEBUT DE TRAITEMENT - (B) RESORPTION RADICULAIRE OBLIQUE EN FIN DE TRAITEMENT.....	50
FIGURE 26 : DESCRIPTION DES POINTS UTILISES POUR L'EVALUATION (DA SILVA CAMPOS ET AL.).....	51
FIGURE 27: RETROALVEOLAIRE D'UNE PREMOLAIRE MAXILLAIRE DROITE MONTRANT UNE RR DE SCORE 2 DE LEVANDER ET MALMGREN (A). LA MEME DENT SUR CBCT MONTRANT UNE ABSENCE DE RR (B A D) (FREITAS ET AL.).....	53
FIGURE 28: A. IMAGE D'UNE PREMIERE PREMOLAIRE MAXILLAIRE PAR MICROTOMOGRAPHIE AUX RAYONS X MONTRANT UNE LACUNE DE RESORPTION RADICULAIRE AU TIERS APICAL DE LA SURFACE LINGUALE. B. LACUNE DE RESORPTION RADICULAIRE EN DETAIL (HARRIS ET AL.).....	56
FIGURE 29: RESORPTION APICALE APRES 14 JOURS D'APPLICATION DE FORCES D'INGRESSION A 50 GRAMMES. ASPECT LINGUAL D'UNE PREMOLAIRE MAXILLAIRE. PREPARATION ANORGANIQUE. BARRE NOIRE = 200µM. GROSSISSEMENT INITIALX40 (HARRY ET SIMS). MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.....	57
FIGURE 30: EFFET D'UNE RESORPTION RADICULAIRE. (A) TRAITEMENT SANS PAUSE : (1) AVANT TRAITEMENT, (2) LORS DU DIAGNOSTIC INITIAL DE LA RESORPTION RADICULAIRE, ET (3) APRES TRAITEMENT. (B) AVEC UNE PAUSE DANS LE TRAITEMENT : (1) AVANT TRAITEMENT, (2) LORS DU DIAGNOSTIC INITIAL DE LA RESORPTION RADICULAIRE, ET (3) APRES TRAITEMENT (LEVANDER ET MALMGREN).....	63
TABLEAU 1: FORCES OPTIMALES POUR LE MOUVEMENT ORTHODONTIQUE / ¹ LES VALEURS DEPENDENT DE LA TAILLE DES DENTS : LES PETITES VALEURS SONT ADAPTEES POUR LES INCISIVES, LES GRANDES VALEURS POUR LES DENTS PLURIRADICULEES (PROFFIT ET AL.).....	19
TABLEAU 2: LES FACTEURS DE RISQUE MECANIQUES (D'APRES SAMADET ET AL.) RR : RESORPTION RADICULAIRE.....	34
TABLEAU 3: LES FACTEURS DE RISQUES BIOLOGIQUES (D'APRES SAMADET ET AL.). RR : RESORPTION RADICULAIRE ; ODF : ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE ; OA : OS ALVEOLAIRE. RISQUE FAIBLE : RR LOCALISEE ET/OU GENERALISEE D'INTENSITE MINEURE. RISQUE MODERE : RR LOCALISEE ET/OU GENERALISEE ET D'INTENSITE MINEURE A SEVERE. RISQUE SEVERE : RR LOCALISEE ET/OU GENERALISEE ET D'INTENSITE SEVERE A EXTREME.....	34

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part II: The Clinical Aspects," *The Angle Orthodontist*, vol. 72, no. 2, pp. 180–184, Apr. 2002, doi: 10.1043/0003-3219(2002)072<0180:OIIRRP>2.0.CO;2.
- [2] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part I: The Basic Science Aspects," *Angle Orthodontist*, vol. 72, no. 2, p. 5, 2002.
- [3] S. Kundal, "An Insight into the Ubiquity of Root Resorption in Orthodontics- A Review," *IJDM*, vol. 5, no. 1, p. 29, 2019, doi: 10.11648/j.ijdm.20190501.15.
- [4] D. M. Killiany, "Root resorption caused by orthodontic treatment: an evidence-based review of literature," *Semin Orthod*, vol. 5, no. 2, pp. 128–133, Jun. 1999, doi: 10.1016/s1073-8746(99)80032-2.
- [5] A. B. N. Pereira, R. Almeida, F. Artese, C. Dardengo, C. Quintão, and F. Carvalho, "External root resorption evaluated by CBCT 3D models superimposition," *Dental Press J Orthod*, vol. 27, no. 2, p. e2219315, 2022, doi: 10.1590/2177-6709.27.2.e2219315.oar.
- [6] A. Dudic, C. Giannopoulou, M. Leuzinger, and S. Kiliaridis, "Detection of apical root resorption after orthodontic treatment by using panoramic radiography and cone-beam computed tomography of super-high resolution," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 135, no. 4, pp. 434–437, Apr. 2009, doi: 10.1016/j.ajodo.2008.10.014.
- [7] A. Abuabara, "Biomechanical aspects of external root resorption in orthodontic therapy," *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.*, p. 4, 2007.
- [8] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Orthodontically Induced Inflammatory Root Resorption. Part I: The Basic Science Aspects," *The Angle Orthodontist*, vol. 72, no. 2, pp. 175–179, Apr. 2002, doi: 10.1043/0003-3219(2002)072<0175:OIIRRP>2.0.CO;2.
- [9] A. Topkara, A. I. Karaman, and C. H. Kau, "Apical root resorption caused by orthodontic forces: A brief review and a long-term observation," *Eur J Dent*, vol. 06, no. 4, pp. 445–453, Oct. 2012, doi: 10.1055/s-0039-1698986.
- [10] S. D. Currell, A. Liaw, P. D. Blackmore Grant, A. Esterman, and A. Nimmo, "Orthodontic mechanotherapies and their influence on external root resorption: A systematic review," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 155, no. 3, pp. 313–329, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ajodo.2018.10.015.
- [11] Y.-G. Kang, J.-H. Nam, K.-H. Kim, and K.-S. Lee, "FAK Pathway Regulates PGE2 Production in Compressed Periodontal Ligament Cells:," *Journal of Dental Research*, Oct. 2010, doi: 10.1177/0022034510378521.
- [12] T. de Jong, A. D. Bakker, V. Everts, and T. H. Smit, "The intricate anatomy of the periodontal ligament and its development: Lessons for periodontal regeneration," *Journal of Periodontal Research*, vol. 52, no. 6, pp. 965–974, Dec. 2017, doi: 10.1111/jre.12477.
- [13] N. Zhao, B. L. Foster, and L. F. Bonewald, "The Cementocyte—An Osteocyte Relative?," *J Dent Res*, vol. 95, no. 7, pp. 734–741, Jul. 2016, doi: 10.1177/0022034516641898.
- [14] K. Gulabivala and Y.-L. Ng, "1 - Tooth organogenesis, morphology and physiology," in *Endodontics (Fourth Edition)*, K. Gulabivala and Y.-L. Ng, Eds., Mosby, 2014, pp. 2–32. doi: 10.1016/B978-0-7020-3155-7.00001-1.
- [15] N. Lynnerup and H. D. Klaus, "Chapter 4 - Fundamentals of Human Bone and Dental Biology: Structure, Function, and Development," in *Ortner's Identification of Pathological Conditions in Human*

Skeletal Remains (Third Edition), J. E. Buikstra, Ed., San Diego: Academic Press, 2019, pp. 35–58. doi: 10.1016/B978-0-12-809738-0.00004-1.

- [16] S. Simon and P. M. Pertot Willy, *Endodontie - Editions CdP*. Initiatives Sante, 2015.
- [17] Z. Ahangari, M. Nasser, M. Mahdian, Z. Fedorowicz, and M. A. Marchesan, “Interventions for the management of external root resorption,” *Cochrane Database of Systematic Reviews*, vol. 2016, no. 1, Nov. 2015, doi: 10.1002/14651858.CD008003.pub3.
- [18] G. T. Sameshima, Ed., *Clinical Management of Orthodontic Root Resorption*. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-58706-2.
- [19] S. K. Abass and J. K. Hartsfield, “Orthodontics and External Apical Root Resorption,” *Seminars in Orthodontics*, vol. 13, no. 4, pp. 246–256, Dec. 2007, doi: 10.1053/j.sodo.2007.08.006.
- [20] C. Jiang *et al.*, “Osteoimmunology in orthodontic tooth movement,” *Oral Diseases*, vol. 21, no. 6, pp. 694–704, Sep. 2015, doi: 10.1111/odi.12273.
- [21] W. R. Proffit, H. W. Fields, B. Larson, and D. M. Sarver, *Contemporary Orthodontics - E-Book*. Elsevier Health Sciences, 2018.
- [22] M. A. Darendeliler, A. Zea, G. Shen, and H. Zoellner, “Effects of pulsed electromagnetic field vibration on tooth movement induced by magnetic and mechanical forces: a preliminary study,” *Aust Dent J*, vol. 52, no. 4, pp. 282–287, Dec. 2007, doi: 10.1111/j.1834-7819.2007.tb00503.x.
- [23] J. Faure, *Biomécanique orthodontique*. Parresia, 2012.
- [24] F. Khouw and P. Goldhaber, “Changes in vasculature of the periodontium associated with tooth movement in the rhesus monkey and dog,” *Archives of oral biology*, vol. 15, no. 12, pp. 1125–IN11, 1970.
- [25] W. E. Roberts, “Bone physiology, metabolism and biomechanics in orthodontic practice,” *Orthodontics current principles and techniques*, vol. 5, pp. 287–343, 2011.
- [26] L. Feller, R. A. G. Khammissa, G. Thomadakis, J. Fourie, and J. Lemmer, “Apical External Root Resorption and Repair in Orthodontic Tooth Movement: Biological Events,” *BioMed Research International*, vol. 2016, pp. 1–7, 2016, doi: 10.1155/2016/4864195.
- [27] A. Iglesias-Linares and J. K. Hartsfield, “Cellular and Molecular Pathways Leading to External Root Resorption,” *J Dent Res*, vol. 96, no. 2, pp. 145–152, Feb. 2017, doi: 10.1177/0022034516677539.
- [28] M. Rumpler *et al.*, “Osteoclasts on Bone and Dentin In Vitro: Mechanism of Trail Formation and Comparison of Resorption Behavior,” *Calcif Tissue Int*, vol. 93, no. 6, pp. 526–539, Dec. 2013, doi: 10.1007/s00223-013-9786-7.
- [29] P. Brudvik and P. Rygh, “Transition and determinants of orthodontic root resorption-repair sequence,” *Eur J Orthod*, vol. 17, no. 3, pp. 177–188, Jun. 1995, doi: 10.1093/ejo/17.3.177.
- [30] P. Brudvik and P. Rygh, “Multi-nucleated cells remove the main hyalinized tissue and start resorption of adjacent root surfaces,” *European Journal of Orthodontics*, vol. 16, no. 4, pp. 265–273, Aug. 1994, doi: 10.1093/ejo/16.4.265.
- [31] P. Brudvik and P. Rygh, “Root resorption beneath the main hyalinized zone,” *European Journal of Orthodontics*, vol. 16, no. 4, pp. 249–263, Aug. 1994, doi: 10.1093/ejo/16.4.249.
- [32] P. RYGH, “Orthodontic Root Resorption Studied by Electron Microscopy,” *The Angle Orthodontist*, vol. 47, no. 1, pp. 1–16, Jan. 1977, doi: 10.1043/0003-3219(1977)047<0001:ORRSBE>2.0.CO;2.

- [33] “Dentisterie restauratrice Endodontie - Référentiel Internat,” *L’Information Dentaire*. <https://www.information-dentaire.fr/produit/dentisterie-restauratrice-endodontie-referentiel-internat/> (accessed Sep. 17, 2022).
- [34] S. Deane, A. S. Jones, P. Petocz, and M. A. Darendeliler, “Physical properties of root cementum: Part 12. The incidence of physiologic root resorption on unerupted third molars and its comparison with orthodontically treated premolars: A microcomputed-tomography study,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 136, no. 2, p. 148.e1-148.e9, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.ajodo.2009.03.010.
- [35] W. E. Roberts, J. A. Roberts, B. N. Epker, D. B. Burr, and J. K. Hartsfield, “Remodeling of Mineralized Tissues, Part I: The Frost Legacy,” *Seminars in Orthodontics*, vol. 12, no. 4, pp. 216–237, Dec. 2006, doi: 10.1053/j.sodo.2006.08.002.
- [36] P. Owman-Moll, J. Kuroi, and D. Lundgren, “Repair of orthodontically induced root resorption in adolescents,” *The Angle Orthodontist*, vol. 65, no. 6, pp. 403–408, Dec. 1995, doi: 10.1043/0003-3219(1995)065<0403:ROOIRR>2.0.CO;2.
- [37] P. Brudvik and P. Rygh, “The repair of orthodontic root resorption: an ultrastructural study,” *European Journal of Orthodontics*, vol. 17, no. 3, pp. 189–198, Jun. 1995, doi: 10.1093/ejo/17.3.189.
- [38] G. T. Sameshima and A. Iglesias-Linares, “Orthodontic root resorption,” *J World Fed Orthod*, vol. 10, no. 4, pp. 135–143, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ejwf.2021.09.003.
- [39] S. A. Mehta, S. V. Deshmukh, R. B. Sable, and A. S. Patil, “Comparison of 4 and 6 weeks of rest period for repair of root resorption,” *Prog Orthod.*, vol. 18, no. 1, p. 18, Jul. 2017, doi: 10.1186/s40510-017-0173-1.
- [40] A. D. Vardimon, T. M. Graber, and S. Pitaru, “Repair process of external root resorption subsequent to palatal expansion treatment,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 103, no. 2, pp. 120–130, Feb. 1993, doi: 10.1016/S0889-5406(05)81761-5.
- [41] G. S. Kumar, *Orban’s Oral Histology & Embryology - E-BOOK*. Elsevier Health Sciences, 2015.
- [42] L. L. Cheng, T. Türk, S. Elekdağ-Türk, A. S. Jones, Y. Yu, and M. A. Darendeliler, “Repair of root resorption 4 and 8 weeks after application of continuous light and heavy forces on premolars for 4 weeks: A histology study,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 138, no. 6, pp. 727–734, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.ajodo.2009.01.029.
- [43] L. H. M. Pinheiro, L. S. Guimarães, L. S. Antunes, E. C. Kuchler, C. Kirschneck, and L. A. A. Antunes, “Genetic variation involved in the risk to external apical root resorption in orthodontic patients: a systematic review,” *Clin Oral Investig*, vol. 25, no. 10, pp. 5613–5627, Oct. 2021, doi: 10.1007/s00784-021-04074-5.
- [44] R. A. Al-Qawasmi *et al.*, “Genetic predisposition to external apical root resorption,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 123, no. 3, pp. 242–252, Mar. 2003, doi: 10.1067/mod.2003.42.
- [45] S. Kalra, P. Gupta, T. Tripathi, and P. Rai, “External apical root resorption in orthodontic patients: molecular and genetic basis,” *J Family Med Prim Care*, vol. 9, no. 8, p. 3872, 2020, doi: 10.4103/jfmpc.jfmpc_802_20.
- [46] P. Iber-Díaz, R. Senen-Carramolino, A. Iglesias-Linares, P. Fernández-Navarro, C. Flores-Mir, and R. M. Yañez-Vico, “GWAS of Post-Orthodontic Aggressive External Apical Root Resorption Identified Multiple Putative Loci at X-Y Chromosomes,” *Journal of Personalized Medicine*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2020, doi: 10.3390/jpm10040169.

- [47] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Orthodontic Root Resorption: A New Perspective," *The Angle Orthodontist*, vol. 86, no. 6, pp. 1056–1057, Nov. 2016, doi: 10.2319/0003-3219-86.6.1056.
- [48] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Defining and framing orthodontitis: A new term in orthodontics," *The Angle Orthodontist*, vol. 84, no. 3, pp. 568–569, May 2014, doi: 10.2319/0003-3219-84.3.568.
- [49] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Effects of short-term in-vivo studies on orthodontic root resorption paradigms," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 152, no. 1, p. 11, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.ajodo.2017.04.014.
- [50] N. Brezniak and A. Wasserstein, "Root resorption revisited: The paradigm of force effect on root resorption: Is a 'paradigm shift' needed in order to learn more about the phenomenon?," *The Angle Orthodontist*, vol. 89, no. 3, pp. 518–520, May 2019, doi: 10.2319/0003-3219-89.3.518.
- [51] J. O. Andreasen, "External root resorption: its implication in dental traumatology, paedodontics, periodontics, orthodontics and endodontics," *International Endodontic Journal*, vol. 18, no. 2, pp. 109–118, Apr. 1985, doi: 10.1111/j.1365-2591.1985.tb00427.x.
- [52] W. DE, N. R, and J. Gutmann, "Tooth Resorption," *Quintessence international*, vol. 30. Jan. 01, 1999.
- [53] Z. Fuss, I. Tsesis, and S. Lin, "Root resorption—diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors," *Dental traumatology*, vol. 19, no. 4, pp. 175–182, 2003.
- [54] S. Patel, N. Saberi, T. Pimental, and P.-H. Teng, "Present status and future directions: Root resorption," *International Endodontic Journal*, vol. n/a, no. n/a, Mar. 2022, doi: 10.1111/iej.13715.
- [55] L. Tronstad, "Root resorption — etiology, terminology and clinical manifestations," *Dental Traumatology*, vol. 4, no. 6, pp. 241–252, 1988, doi: 10.1111/j.1600-9657.1988.tb00642.x.
- [56] R. F. Ne, D. E. Witherspoon, and J. L. Gutmann, "Tooth resorption," *QUINTESSENCE INTERNATIONAL-ENGLISH EDITION-*, vol. 30, pp. 9–26, 1999.
- [57] G. S. Heithersay, "Invasive Cervical Resorption Following Trauma," *Australian Endodontic Journal*, vol. 25, no. 2, pp. 79–85, 1999, doi: 10.1111/j.1747-4477.1999.tb00094.x.
- [58] G. S. Heithersay, "Invasive cervical resorption: an analysis of potential predisposing factors," *Quintessence Int*, vol. 30, no. 2, pp. 83–95, Feb. 1999.
- [59] G. S. Heithersay, "Invasive cervical resorption," *Endodontic Topics*, vol. 7, no. 1, pp. 73–92, 2004, doi: 10.1111/j.1601-1546.2004.00060.x.
- [60] S. Patel, F. Foschi, F. Mannocci, and K. Patel, "External cervical resorption: a three-dimensional classification," *Int Endod J*, vol. 51, no. 2, pp. 206–214, Feb. 2018, doi: 10.1111/iej.12824.
- [61] W. Sharpe, B. Reed, J. D. Subtelny, and A. Polson, "Orthodontic relapse, apical root resorption, and crestal alveolar bone levels," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 91, no. 3, pp. 252–258, 1987, doi: [https://doi-org-s.docadis.univ-tlse3.fr/10.1016/0889-5406\(87\)90455-0](https://doi-org-s.docadis.univ-tlse3.fr/10.1016/0889-5406(87)90455-0).
- [62] E. Levander and O. Malmgren, "Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: a study of upper incisors," *Eur J Orthod*, vol. 10, no. 1, pp. 30–38, Feb. 1988, doi: 10.1093/ejo/10.1.30.
- [63] V. Samadet and W. Bacon, "Les résorptions radiculaires : facteurs de risque et attitudes thérapeutiques," *Rev. Orthop. Dento-Faciale*, vol. 41, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2007, doi: 10.1051/odf:20074130263.

- [64] C. P. R. Maués, R. R. do Nascimento, and O. de V. Vilella, “Severe root resorption resulting from orthodontic treatment: Prevalence and risk factors,” *Dental Press J. Orthod.*, vol. 20, no. 1, pp. 52–58, Feb. 2015, doi: 10.1590/2176-9451.20.1.052-058.oar.
- [65] L. S. Marques, M. L. Ramos-Jorge, A. C. Rey, M. C. Armond, and A. C. de Oliveira Ruellas, “Severe root resorption in orthodontic patients treated with the edgewise method: Prevalence and predictive factors,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 137, no. 3, pp. 384–388, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.ajodo.2008.04.024.
- [66] F. Bayir and E. Bolat Gumus, “External apical root resorption after orthodontic treatment: Incidence, severity and risk factors,” *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects*, vol. 15, no. 2, pp. 100–105, May 2021, doi: 10.34172/joddd.2021.017.
- [67] Y. Li *et al.*, “Prevalence and severity of apical root resorption during orthodontic treatment with clear aligners and fixed appliances: a cone beam computed tomography study,” *Progress in orthodontics*, vol. 21, pp. 1–8, 2020.
- [68] I. O. Castro, A. H. G. Alencar, J. Valladares-Neto, and C. Estrela, “Apical root resorption due to orthodontic treatment detected by cone beam computed tomography,” *The Angle Orthodontist*, vol. 83, no. 2, pp. 196–203, Jul. 2012, doi: 10.2319/032112-240.1.
- [69] M. Mavragani, “A radiographic comparison of apical root resorption after orthodontic treatment with a standard edgewise and a straight-wire edgewise technique,” *The European Journal of Orthodontics*, vol. 22, no. 6, pp. 665–674, Dec. 2000, doi: 10.1093/ejo/22.6.665.
- [70] H. Lund, K. Gröndahl, K. Hansen, and H.-G. Gröndahl, “Apical root resorption during orthodontic treatment: A prospective study using cone beam CT,” *The Angle Orthodontist*, vol. 82, no. 3, pp. 480–487, Sep. 2011, doi: 10.2319/061311-390.1.
- [71] J. Kurol, P. Owman-Moll, and D. Lundgren, “Time-related root resorption after application of a controlled continuous orthodontic force,” *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, vol. 110, no. 3, pp. 303–310, Sep. 1996, doi: 10.1016/s0889-5406(96)80015-1.
- [72] Y. Deng, Y. Sun, and T. Xu, “Evaluation of root resorption after comprehensive orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a meta-analysis,” *BMC Oral Health*, vol. 18, no. 1, Art. no. 1, Dec. 2018, doi: 10.1186/s12903-018-0579-2.
- [73] B. Weltman, K. W. L. Vig, H. W. Fields, S. Shanker, and E. E. Kaizar, “Root resorption associated with orthodontic tooth movement: A systematic review,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 137, no. 4, pp. 462–476, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.ajodo.2009.06.021.
- [74] V. Samadet, M. Chouvin, W. Bacon, and P. Canal, “Les résorptions radiculaires : facteurs de risque et attitude thérapeutique,” *Rev Orthop Dento Faciale*, vol. 40, no. 4, Art. no. 4, Dec. 2006, doi: 10.1051/odf/2006033.
- [75] C. C. O. Dos Santos, S. A. Bellini-Pereira, M. C. G. Medina, and D. Normando, “Allergies/asthma and root resorption: a systematic review,” *Prog Orthod*, vol. 22, no. 1, p. 8, Mar. 2021, doi: 10.1186/s40510-021-00351-x.
- [76] H. Villaman-Santacruz, R. Torres-Rosas, A. Acevedo-Mascarua, and L. Argueta-Figueroa, “Root resorption factors associated with orthodontic treatment with fixed appliances: A systematic review and meta-analysis,” *Dent. Med. Probl.*, vol. 59, no. 3, pp. 437–450, Sep. 2022, doi: 10.17219/dmp/145369.
- [77] Y. A. Yassir, G. T. McIntyre, and D. R. Bearn, “Orthodontic treatment and root resorption: an overview of systematic reviews,” *European Journal of Orthodontics*, vol. 43, no. 4, pp. 442–456, Aug.

2021, doi: 10.1093/ejo/cjaa058.

[78] A. Samandara, S. N. Papageorgiou, I. Ioannidou-Marathiotou, S. Kavvadia-Tsatala, and M. A. Papadopoulos, "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*, vol. 41, no. 1, pp. 67–79, Jan. 2019, doi: 10.1093/ejo/cjy027.

[79] A. Samandara, S. N. Papageorgiou, I. Ioannidou-Marathiotou, S. Kavvadia-Tsatala, and M. A. Papadopoulos, "Evaluation of orthodontically induced external root resorption following orthodontic treatment using cone beam computed tomography (CBCT): a systematic review and meta-analysis," *European Journal of Orthodontics*, vol. 41, no. 1, pp. 67–79, Jan. 2019, doi: 10.1093/ejo/cjy027.

[80] E. Whaites and N. Drage, *Essentials of Dental Radiography and Radiology*. Elsevier Health Sciences, 2013.

[81] R. Felizardo, A. Thomas, and J.-M. Foucart, "Techniques radiographiques utiles en orthodontie," *Orthod Fr*, vol. 83, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1051/orthodfr/2012003.

[82] R. Cavézian and G. Pasquet, "Imagerie et orthopédie dento-faciale : évolution, présent et avenir," *Orthod Fr*, vol. 79, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2008, doi: 10.1051/orthodfr:2007043.

[83] J.-M. Foucart, R. Felizardo, and C. Pizelle, "La radioprotection en orthodontie : données utiles," *Orthod Fr*, vol. 83, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2012, doi: 10.1051/orthodfr/2011147.

[84] "ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 2007; 37(2- 4):35-332."

[85] H. A. Leach, A. J. Ireland, and E. J. Whaites, "Radiographic diagnosis of root resorption in relation to orthodontics," *BRITISH DENTAL JOURNAL*, vol. 190, no. 1, p. 7, 2001.

[86] "Autorité de Sûreté Nucléaire, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Haute Autorité de Santé. Guide des indications et des procédures des examens radiologiques en odontostomatologie. Paris, 2006, 109 p."

[87] R. Molteni, "2.04 - Oral and Maxillofacial Radiology," in *Comprehensive Biomedical Physics*, A. Brahme, Ed., Oxford: Elsevier, 2014, pp. 89–120. doi: 10.1016/B978-0-444-53632-7.00205-7.

[88] E. Chan and M. Darendeliler, "Exploring the third dimension in root resorption," *Orthodontics & Craniofacial Research*, vol. 7, no. 2, pp. 64–70, May 2004, doi: 10.1111/j.1601-6343.2004.00280.x.

[89] E. Alamadi, H. Alhazmi, K. Hansen, T. Lundgren, and J. Naoumova, "A comparative study of cone beam computed tomography and conventional radiography in diagnosing the extent of root resorptions," *Prog Orthod.*, vol. 18, no. 1, p. 37, Nov. 2017, doi: 10.1186/s40510-017-0191-z.

[90] R. J. Hodges, K. A. Atchison, and S. C. White, "Impact of cone-beam computed tomography on orthodontic diagnosis and treatment planning," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 143, no. 5, pp. 665–674, May 2013, doi: 10.1016/j.ajodo.2012.12.011.

[91] M. J. da Silva Campos, K. S. Silva, M. A. Gravina, M. R. Fraga, and R. W. F. Vitral, "Apical root resorption: The dark side of the root," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 143, no. 4, pp. 492–498, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.ajodo.2012.10.026.

[92] L. Linge and B. O. Linge, "Patient characteristics and treatment variables associated with apical root resorption during orthodontic treatment," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 99, no. 1, pp. 35–43, Jan. 1991, doi: 10.1016/S0889-5406(05)81678-6.

[93] B. O. Linge and L. Linge, "Apical root resorption in upper anterior teeth," *European Journal of Orthodontics*, vol. 5, no. 3, pp. 173–183, Aug. 1983, doi: 10.1093/ejo/5.3.173.

- [94] W. M. McFadden, C. Engstrom, H. Engstrom, and J. M. Anholm, "A study of the relationship between incisor intrusion and root shortening," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 96, no. 5, pp. 390–396, Nov. 1989, doi: 10.1016/0889-5406(89)90323-5.
- [95] S. Baumrind, E. L. Korn, and R. L. Boyd, "Apical root resorption in orthodontically treated adults," *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 110, no. 3, pp. 311–320, Sep. 1996, doi: 10.1016/S0889-5406(96)80016-3.
- [96] G. Holan, D. Ram, and A. B. Fuks, "The diagnostic value of lateral extraoral radiography for intruded maxillary primary incisors," *Pediatr Dent*, vol. 24, no. 1, pp. 38–42, Feb. 2002.
- [97] K. REITAN, "Initial Tissue Behavior During Apical Root Resorption," *The Angle Orthodontist*, vol. 44, no. 1, pp. 68–82, Jan. 1974, doi: 10.1043/0003-3219(1974)044<0068:ITBDAR>2.0.CO;2.
- [98] M. R. HARRY and M. R. SIMS, "Root Resorption in Bicuspid Intrusion: A Scanning Electron Microscope Study," *The Angle Orthodontist*, vol. 52, no. 3, pp. 235–258, Jul. 1982, doi: 10.1043/0003-3219(1982)052<0235:RRIBI>2.0.CO;2.
- [99] E. Kvam, "Scanning electron microscopy of human premolars following experimental tooth movement," *Trans Eur Orthod Soc*, pp. 381–391, 1972.
- [100] E. Kvam, "Scanning electron microscopy of tissue changes on the pressure surface of human premolars following tooth movement," *European Journal of Oral Sciences*, vol. 80, no. 5, pp. 357–368, 1972, doi: 10.1111/j.1600-0722.1972.tb00303.x.
- [101] S. J. Jones and A. Boyde, "A study of human root cementum surfaces as prepared for and examined in the scanning electron microscope," *Z.Zellforsch*, vol. 130, no. 3, pp. 318–337, Sep. 1972, doi: 10.1007/BF00306946.
- [102] F. Dindaroglu and S. Dogan, "Root Resorption in Orthodontics," *Turk J Orthod*, vol. 29, no. 4, pp. 103–108, Mar. 2017, doi: 10.5152/TurkJOrthod.2016.16021.
- [103] T. Wierzbicki, T. El-Bialy, S. Aldaghreer, G. Li, and M. Doschak, "Analysis of Orthodontically Induced Root Resorption Using Micro-Computed Tomography (Micro-CT)," *The Angle Orthodontist*, vol. 79, no. 1, pp. 91–96, Jan. 2009, doi: 10.2319/112107-546.1.
- [104] M. Sawicka, R. Bedini, R. Pecci, C. H. Pameijer, and Z. Kmiec, "The application of X-ray microtomography for the assesment of root resorption caused by the orthodontic treatment of premolars," *Ann Ist Super Sanita*, vol. 48, no. 1, pp. 71–74, 2012, doi: 10.4415/ANN_12_01_12.
- [105] J. C. de Freitas, O. C. P. Lyra, A. H. G. de Alencar, and C. Estrela, "Long-term evaluation of apical root resorption after orthodontic treatment using periapical radiography and cone beam computed tomography," *Dental Press J. Orthod.*, vol. 18, no. 4, pp. 104–112, Aug. 2013, doi: 10.1590/S2176-94512013000400015.
- [106] G. S. Liedke, H. E. D. da Silveira, H. L. D. da Silveira, V. Dutra, and J. A. P. de Figueiredo, "Influence of voxel size in the diagnostic ability of cone beam tomography to evaluate simulated external root resorption," *J Endod*, vol. 35, no. 2, pp. 233–235, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.joen.2008.11.005.
- [107] J. Yi, Y. Sun, Y. Li, C. Li, X. Li, and Z. Zhao, "Cone-beam computed tomography versus periapical radiograph for diagnosing external root resorption: A systematic review and meta-analysis," *The Angle Orthodontist*, vol. 87, no. 2, pp. 328–337, Mar. 2017, doi: 10.2319/061916-481.1.
- [108] S. D. Kapila and J. M. Nervina, "CBCT in orthodontics: assessment of treatment outcomes and indications for its use," *Dentomaxillofac Radiol*, vol. 44, no. 1, p. 20140282, Jan. 2015, doi: 10.1259/dmfr.20140282.

- [109] A. G. D. Schroder, O. Guariza-Filho, C. M. de Araujo, A. C. Ruellas, O. M. Tanaka, and A. L. Porporatti, "To what extent are impacted canines associated with root resorption of the adjacent tooth?: A systematic review with meta-analysis," *The Journal of the American Dental Association*, vol. 149, no. 9, pp. 765-777.e8, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.adaj.2018.05.012.
- [110] A. Mitsea, G. Palikaraki, K. Karamesinis, H. Vastardis, S. Gizani, and I. Sifakakis, "Evaluation of Lateral Incisor Resorption Caused by Impacted Maxillary Canines Based on CBCT: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Children*, vol. 9, no. 7, Art. no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/children9071006.
- [111] A. Alqerban, R. Jacobs, P. Lambrechts, G. Loozen, and G. Willems, "Root resorption of the maxillary lateral incisor caused by impacted canine: a literature review," *Clin Oral Invest*, vol. 13, no. 3, pp. 247–255, Sep. 2009, doi: 10.1007/s00784-009-0262-8.
- [112] S. D. Kapila and J. M. Nervina, "3D Image-Aided Diagnosis and Treatment of Impacted and Transposed Teeth," in *Cone Beam Computed Tomography in Orthodontics: Indications, Insights, and Innovations*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014, pp. 349–381. doi: 10.1002/9781118674888.ch16.
- [113] S. Wriedt, J. Jaklin, B. Al-Nawas, and H. Wehrbein, "Impacted upper canines: examination and treatment proposal based on 3D versus 2D diagnosis," *J Orofac Orthop*, vol. 73, no. 1, pp. 28–40, Jan. 2012, doi: 10.1007/s00056-011-0058-8.
- [114] A. Alqerban, R. Jacobs, S. Fieuws, and G. Willems, "Comparison of two cone beam computed tomographic systems versus panoramic imaging for localization of impacted maxillary canines and detection of root resorption," *European Journal of Orthodontics*, vol. 33, no. 1, pp. 93–102, Feb. 2011, doi: 10.1093/ejo/cjq034.
- [115] S. Oberoi and S. Knueppel, "Three-dimensional assessment of impacted canines and root resorption using cone beam computed tomography," *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, vol. 113, no. 2, pp. 260–267, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.tripleo.2011.03.035.
- [116] J. Suhr Villefrance, L.-L. Kirkevang, A. Wenzel, M. Væth, and L. H. Matzen, "Impact of cone beam CT on diagnosis of external cervical resorption: the severity of resorption assessed in periapical radiographs and cone beam CT. A prospective clinical study," *Dentomaxillofacial Radiology*, vol. 51, no. 2, p. 20210279, Feb. 2022, doi: 10.1259/dmfr.20210279.
- [117] K. B. Goodell, P. Mines, and D. D. Kersten, "Impact of Cone-beam Computed Tomography on Treatment Planning for External Cervical Resorption and a Novel Axial Slice-based Classification System," *J Endod*, vol. 44, no. 2, pp. 239–244, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.joen.2017.10.001.
- [118] D. Vaz de Souza, E. Schirru, F. Mannocci, F. Foschi, and S. Patel, "External Cervical Resorption: A Comparison of the Diagnostic Efficacy Using 2 Different Cone-beam Computed Tomographic Units and Periapical Radiographs," *J Endod*, vol. 43, no. 1, pp. 121–125, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.joen.2016.09.008.
- [119] K. Patel, F. Mannocci, and S. Patel, "The Assessment and Management of External Cervical Resorption with Periapical Radiographs and Cone-beam Computed Tomography: A Clinical Study," *J Endod*, vol. 42, no. 10, pp. 1435–1440, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.joen.2016.06.014.
- [120] J. Cunliffe, A. Al-Hadidi, F. A. Sawair, and S. A. Mahasneh, "Comparison of imaging modalities in the diagnosis of external cervical resorption (ECR): an in-vitro study," *Odontology*, vol. 110, no. 1, pp. 157–163, Jan. 2022, doi: 10.1007/s10266-021-00651-y.
- [121] L. E. Matny, N. B. Ruparel, M. D. Levin, M. Noujeim, and A. Diogenes, "A Volumetric Assessment of External Cervical Resorption Cases and Its Correlation to Classification, Treatment Planning, and Expected Prognosis," *J Endod*, vol. 46, no. 8, pp. 1052–1058, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.joen.2020.04.012.

- [122] A. Heboyan *et al.*, “Tooth root resorption: A review,” *Science Progress*, vol. 105, no. 3, p. 003685042211092, Jul. 2022, doi: 10.1177/00368504221109217.
- [123] “Tomographie volumique a faisceau conique de la face (cone beam computerized tomography),” *Haute Autorité de Santé*. https://www.has-sante.fr/jcms/c_899074/fr/tomographie-volumique-a-faisceau-conique-de-la-face-cone-beam-computerized-tomography
- [124] D. A. Harris, A. S. Jones, and M. A. Darendeliler, “Physical properties of root cementum: Part 8. Volumetric analysis of root resorption craters after application of controlled intrusive light and heavy orthodontic forces: A microcomputed tomography scan study,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 130, no. 5, pp. 639–647, Nov. 2006, doi: 10.1016/j.ajodo.2005.01.029.
- [125] K. L. Kalkwarf, R. F. Krejci, and Y. C. Pao, “Effect of apical root resorption on periodontal support,” *Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 56, no. 3, pp. 317–319, Sep. 1986, doi: 10.1016/0022-3913(86)90011-9.
- [126] K. Lopatiene and A. Dumbravaite, “Risk factors of root resorption after orthodontic treatment,” *Stomatologija*, vol. 10, no. 3, pp. 89–95, 2008.
- [127] K. S. Lee, S. R. Straja, and O. C. Tuncay, “Perceived long-term prognosis of teeth with orthodontically resorbed roots,” *Orthodontics & Craniofacial Research*, vol. 6, no. 3, pp. 177–191, Aug. 2003, doi: 10.1034/j.1600-0544.2003.02276.x.
- [128] A. Pejčic, M. Bertl, and A. Čelar, “Extent and prognosis of apical root resorption due to orthodontic treatment,” *J. Stomat. Occ. Med.*, vol. 5, no. 4, pp. 147–154, Dec. 2012, doi: 10.1007/s12548-012-0056-5.
- [129] J. L. Henry and J. P. Weinmann, “The Pattern of Resorption and Repair of Human Cementum,” *The Journal of the American Dental Association*, vol. 42, no. 3, pp. 270–290, Mar. 1951, doi: 10.14219/jada.archive.1951.0045.
- [130] J. H. Steven Tan, F. Yazid, N. Abu Kasim, S. H. Zainal Ariffin, and R. Megat Abdul Wahab, “Orthodontic Induced Inflammatory Root Resorption: The Process Involved and its Management - A Review of Literature,” *JSM*, vol. 51, no. 10, pp. 3371–3381, Oct. 2022, doi: 10.17576/jsm-2022-5110-21.
- [131] N. Blaushild, Y. Michaeli, and S. Steigman, “Histomorphometric Study of the Periodontal Vasculature of the Rat Incisor,” *J Dent Res*, vol. 71, no. 12, pp. 1908–1912, Dec. 1992, doi: 10.1177/00220345920710121001.
- [132] W. Chutimanutskul, Ma. Darendeliler, M. V. Swain, G. Shen, and P. Petocz, “Physical properties of human premolar cementum: Hardness and elasticity,” *Australian Orthodontic Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 117–121, doi: 10.3316/informit.962751121890006.
- [133] A. Oppenheim, “Human tissue response to orthodontic intervention of short and long duration,” *American Journal of Orthodontics and Oral Surgery*, vol. 28, no. 5, pp. 263–301, May 1942, doi: 10.1016/S0096-6347(42)90492-7.
- [134] N. Brezniak and A. Wasserstein, “Apical root shortening versus root resorption—Is there a difference?,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 156, no. 2, pp. 164–165, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.ajodo.2019.04.028.
- [135] M. Yildirim and M. Akin, “Comparison of root resorption after bone-borne and tooth-borne rapid maxillary expansion evaluated with the use of microtomography,” *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, vol. 155, no. 2, pp. 182–190, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.ajodo.2018.03.021.
- [136] K. Khalaf, S. Mustafa, and T. Maarouf, “Is Orthodontic Treatment a Risk Factor of Cervical Root Resorption? A Systematic Review,” *Eur J Dent*, Feb. 2022, doi: 10.1055/s-0041-1742127.

- [137] Y. Chen, Y. Huang, and X. Deng, “External cervical resorption—a review of pathogenesis and potential predisposing factors,” *Int J Oral Sci*, vol. 13, no. 1, Art. no. 1, Jun. 2021, doi: 10.1038/s41368-021-00121-9.
- [138] R.-M. Talpos-Niculescu, L.-M. Nica, M. Popa, S. Talpos-Niculescu, and L. C. Rusu, “External cervical resorption: Radiological diagnosis and literature (Review),” *Exp Ther Med*, vol. 22, no. 4, p. 1065, Oct. 2021, doi: 10.3892/etm.2021.10499.
- [139] L. L. Cheng, T. Türk, S. Elekdag-Türk, A. S. Jones, P. Petocz, and M. A. Darendeliler, “Physical properties of root cementum: Part 13. Repair of root resorption 4 and 8 weeks after the application of continuous light and heavy forces for 4 weeks: A microcomputed-tomography study,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 136, no. 3, p. 320.e1-320.e10, Sep. 2009, doi: 10.1016/j.ajodo.2008.05.014.
- [140] A. Abbing, V. Koretsi, T. Eliades, and S. N. Papageorgiou, “Duration of orthodontic treatment with fixed appliances in adolescents and adults: a systematic review with meta-analysis,” *Progress in Orthodontics*, vol. 21, no. 1, p. 37, Oct. 2020, doi: 10.1186/s40510-020-00334-4.
- [141] E. Levander, O. Malmgren, and S. Eliasson, “Evaluation of root resorption in relation to two orthodontic treatment regimes. A clinical experimental study,” *The European Journal of Orthodontics*, vol. 16, no. 3, pp. 223–228, Jun. 1994, doi: 10.1093/ejo/16.3.223.
- [142] “Les critères d’aboutissement du traitement d’orthopédie dento-faciale,” *Haute Autorité de Santé*. https://www.has-sante.fr/jcms/c_272294/fr/les-criteres-d-aboutissement-du-traitement-d-orthopedie-dento-faciale
- [143] L. Frapier, L. Massif, M. Leplus, M. Chouvin, and P. Canal, “Conduite à tenir face aux résorptions radiculaires,” *Rev. Orthop. Dento-Faciale*, vol. 41, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2007, doi: 10.1051/odf:20074130295.
- [144] F. Luther, S. Dominguez-Gonzalez, and S. A. Fayle, “Teamwork in orthodontics: Limiting the risks of root resorption,” *Br Dent J*, vol. 198, no. 7, Art. no. 7, Apr. 2005, doi: 10.1038/sj.bdj.4812188.
- [145] G. T. Sameshima and P. M. Sinclair, “Predicting and preventing root resorption: Part I. Diagnostic factors,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 119, no. 5, pp. 505–510, May 2001, doi: 10.1067/mod.2001.113409.
- [146] G. T. Sameshima and P. M. Sinclair, “Predicting and preventing root resorption: Part II. Treatment factors,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 119, no. 5, pp. 511–515, 2001.
- [147] J. Perry, H. Popat, I. Johnson, D. Farnell, and M. Z. Morgan, “Professional consensus on orthodontic risks: What orthodontists should tell their patients,” *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, vol. 159, no. 1, pp. 41–52, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ajodo.2019.11.017.
- [148] C. F. W. Sondejker *et al.*, “Development of a clinical practice guideline for orthodontically induced external apical root resorption,” *European Journal of Orthodontics*, vol. 42, no. 2, pp. 115–124, Apr. 2020, doi: 10.1093/ejo/cjz034.
- [149] S. D. Currell, P. D. Blackmore Grant, A. Esterman, and A. Nimmo, “The clinical management of orthodontically-induced external root resorption: A questionnaire survey,” *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, vol. 160, no. 3, pp. 385–391, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.ajodo.2020.04.036.
- [150] S. Copeland and L. J. Green, “Root resorption in maxillary central incisors following active orthodontic treatment,” *American Journal of Orthodontics*, vol. 89, no. 1, pp. 51–55, Jan. 1986, doi: 10.1016/0002-9416(86)90111-9.
- [151] M. G. Roscoe, J. B. C. Meira, and P. M. Cattaneo, “Association of orthodontic force system and

root resorption: A systematic review,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 147, no. 5, pp. 610–626, May 2015, doi: 10.1016/j.ajodo.2014.12.026.

[152] D. N. Remington, D. R. Joondeph, J. Årtun, R. A. Riedel, and M. K. Chapko, “Long-term evaluation of root resorption occurring during orthodontic treatment,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 96, no. 1, pp. 43–46, Jul. 1989, doi: 10.1016/0889-5406(89)90227-8.

[153] R. R. Savage and V. G. Kokich, “Restoration and retention of maxillary anteriors with severe root resorption,” *The Journal of the American Dental Association*, vol. 133, no. 1, pp. 67–71, Jan. 2002, doi: 10.14219/jada.archive.2002.0023.

[154] V. G. Kokich, “Orthodontic and Nonorthodontic Root Resorption: Their Impact on Clinical Dental Practice,” *Journal of Dental Education*, vol. 72, no. 8, pp. 895–902, 2008, doi: 10.1002/j.0022-0337.2008.72.8.tb04565.x.

[155] A. Becker and S. Chaushu, “Long-term follow-up of severely resorbed maxillary incisors after resolution of an etiologically associated impacted canine,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 127, no. 6, pp. 650–654, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.ajodo.2004.03.031.

[156] A. Topkara, A. I. Karaman, and C. H. Kau, “Apical root resorption caused by orthodontic forces: A brief review and a long-term observation,” *Eur J Dent*, vol. 06, no. 04, pp. 445–453, Oct. 2012, doi: 10.1055/s-0039-1698986.

[157] L. S. Marques, K. C. T. Chaves, A. C. Rey, L. J. Pereira, and A. C. de Oliveira Ruellas, “Severe root resorption and orthodontic treatment: Clinical implications after 25 years of follow-up,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 139, no. 4, pp. S166–S169, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.ajodo.2009.05.032.

[158] R. Kunimatsu *et al.*, “Baicalin inhibits root resorption during tooth movement in a rodent model,” *Archives of Oral Biology*, vol. 116, p. 104770, 2020.

[159] N. Nayyer, T. Tripathi, P. Rai, and A. Kanase, “Effect of photobiomodulation on external root resorption during orthodontic tooth movement—a randomized controlled trial,” *International Orthodontics*, vol. 19, no. 2, pp. 197–206, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.ortho.2021.01.007.

[160] C. M. Ang Khaw, O. Dalci, M. Foley, P. Petocz, M. A. Darendeliler, and A. K. Papadopoulou, “Physical properties of root cementum: Part 27. Effect of low-level laser therapy on the repair of orthodontically induced inflammatory root resorption: A double-blind, split-mouth, randomized controlled clinical trial,” *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, vol. 154, no. 3, pp. 326–336, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ajodo.2018.04.022.

DIAGNOSTIC RADIOLOGIQUE DES RESORPTIONS RADICULAIRES EXTERNES EN ORTHODONTIE

RESUME EN FRANÇAIS :

Introduction : l'objectif de l'étude était d'évaluer la pertinence des différents examens radiologiques dans le diagnostic des résorptions radiculaires externes (RRE) en orthodontie. **Méthode** : une revue de littérature a été réalisée afin de comparer les différents examens : qu'ils soient systématiques en orthodontie (orthopantomogramme et téléradiographie de profil) ou complémentaires (tomographie volumique à faisceau conique, rétroalvéolaires, clichés occlusaux, microscopie et microtomographie aux rayons X). **Résultats** : l'orthopantomogramme n'est pas fiable pour le diagnostic des RRE. Les radiographies rétroalvéolaires sont plus précises mais restent limitées car en deux dimensions. Le CBCT apporte plus d'informations. **Conclusion** : les RRE sont un phénomène tridimensionnel dont le diagnostic par imagerie 3D semble plus pertinent.

TITRE EN ANGLAIS : RADIOLOGICAL DIAGNOSIS OF EXTERNAL ROOT RESORPTION IN ORTHODONTICS

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLES : résorption radiculaire externe ; résorption cervicale ; résorption apicale ; raccourcissement radiculaire ; diagnostic radiologique ; inflammation ; examens tridimensionnels ; orthodontie ; pronostic ; conduite à tenir ; orthopédie dento-faciale.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université Toulouse III-Paul Sabatier

Faculté de santé – Département d'Odontologie 3 chemin des Maraîchers 31062
Toulouse Cedex09

Directeurs de thèse : ROTENBERG Maxime et GURGEL-GEORGELIN Marie