

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N° 38

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 18 septembre 2020

par

de LAJUDIE Emilien
né le 09/10/1993 à COLMAR

INTÉRÊTS PÉDIATRIQUES ET PROTOCOLES OPÉRATOIRES
DES BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES SUR
DENTS PERMANENTES IMMATURES ET DENTS MATURES JEUNES

-

CONNAISSANCES ET PRATIQUES PROFESSIONNELLES DES
BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES EN FRANCE

Président	:	Professeur HAÏKEL Youssef
Assesseurs	:	<u>Professeur CLAUSS François</u> Docteur STRUB Marion Docteur MANCINO Davide
Membre invité	:	Docteur ROOS Thierry

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE DE STRASBOURG

Doyen : Professeur C. TADDEI-GROSS

**Doyens honoraires : Professeur R. FRANK
Professeur M. LEIZE
Professeur Y. HAIKEL**

Professeurs émérites : Professeur H. TENENBAUM

Responsable des Services Administratifs : Mme F. DITZ-MOUGEL

Professeurs des Universités

V. BALL	Ingénierie Chimique, Energétique - Génie des Procédés
A. BLOCH-ZUPAN	Sciences Biologiques
F. CLAUSS	Odontologie Pédiatrique
J-L. DAVIDEAU	Parodontologie
Y. HAÏKEL	Odontologie Conservatrice - Endodontie
O. HUCK	Parodontologie
M-C. MANIERE	Odontologie Pédiatrique
F. MEYER	Sciences Biologiques
M. MINOUX	Odontologie Conservatrice - Endodontie
A-M. MUSSET	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
C. TADDEI-GROSS	Prothèses
B. WALTER	Prothèses

Maîtres de Conférences

Y. ARNTZ	Biophysique moléculaire
S. BAHİ-GROSS	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
L. BIGEARD	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
Y. BOLENDER	Orthopédie Dento-Faciale
F. BORNERT	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
A. BOUKARI	Chirurgie Buccale - Pathologie et Thérapeutique - Anesthésiologie et Réanimation
O. ETIENNE	Prothèses
F. FIORETTI	Odontologie Conservatrice - Endodontie
C-I. GROS	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
S. JUNG	Sciences Biologiques
N. LADHARI	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques - Biomatériaux - Biophysique - Radiologie
D. OFFNER	Prévention - Epidémiologie - Economie de la Santé - Odontologie Légale
M. SOELL	Parodontologie
M. STRUB	Odontologie Pédiatrique
X. VAN BELLINGHEN	Prothèses
D. WAGNER	Orthopédie Dento-Faciale
E. WALTMANN	Prothèses

Equipes de Recherche

N. JESSEL	INSERM / Directeur de Recherche
Ph. LAVALLE	INSERM / Directeur de Recherche
H. LESOT	CNRS / Directeur de Recherche
M-H. METZ-BOUTIGUE	INSERM / Directeur de Recherche
P. SCHAAF	UdS / Professeur des Universités / Directeur d'Unité
B. SENGER	INSERM / Directeur de Recherche

REMERCIEMENTS...

Monsieur le Professeur Youssef HAIKEL

Docteur en Chirurgie Dentaire

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Département : Odontologie Conservatrice - Endodontie

Merci de me faire l'honneur de présider ce jury.

Vous avez été une balise tout au long de mon parcours odontologique : par votre enseignement dès le premier semestre de P2, votre intervention pour que je puisse suivre le Master de Biomorphologie et Biomatériaux, votre encadrement en service d'OCE... toujours avec ce regard bienveillant qui vous caractérise.

Veillez trouver ici le témoignage de ma reconnaissance et mon profond respect.

Monsieur le Professeur François CLAUSS

Docteur en Chirurgie Dentaire

Professeur des Universités – Praticien Hospitalier

Département : Odontologie Pédiatrique

Merci pour votre personnalité combinant sport intense, recherche, enseignement et encadrement bienveillant. C'est une association inspirante, qui m'a non seulement permis de réaliser un apprentissage serein en odontologie pédiatrique, mais également donné envie de réaliser ma thèse avec vous. Malgré votre disponibilité limitée, votre réactivité a été précieuse.

C'est un réel honneur que vous m'avez fait en acceptant la direction de cette thèse.

Madame le Docteur Marion STRUB

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de Conférence – Praticien Hospitalier

Département : Odontologie Pédiatrique

Merci de m'avoir introduit dans le monde de l'odontologie pédiatrique, qui a été le premier stage clinique où je me suis senti capable. Merci pour votre accompagnement instructif, votre encadrement jovial et votre confiance pour tous les patients que j'ai pu prendre en charge dans cette première année.

Votre présence dans ce jury revêt une valeur symbolique pour moi, et je vous en remercie grandement.

Monsieur le Docteur Davide MANCINO

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de Conférence – Praticien Hospitalier

Département : Odontologie Conservatrice - Endodontie

Merci pour votre enseignement riche d'une extrême compétence, et votre accompagnement bienveillant en clinique. Les petites musiques accompagnant vos vidéos d'opérations endodontiques font partie de ces détails qui donnent envie de suivre votre enseignement.

Merci de me faire l'honneur de siéger dans ce jury.

Monsieur le Docteur Thierry ROOS

Docteur en Chirurgie Dentaire

Attaché Hospitalo-Universitaire

Département : Odontologie Conservatrice - Endodontie

Vous avez été le premier à évoquer les biocéramiques endodontiques lors de vos trop rares cours. J'ai pleinement adhéré à votre abord pédagogique axé sur l'intelligence du praticien, passant par la compréhension et la réflexion.

Merci pour votre enthousiasme immédiat à m'accompagner sur ce sujet, vos conseils et pistes de réflexion, vos documents, vos invitations au cabinet et en formation... ainsi que vos encouragements sur facebook !

« - C'est une bonne situation, ça, Chirurgien-Dentiste ?

- Vous savez, moi je ne crois pas qu'il y ait de bonne ou de mauvaise situation. Moi, si je devais résumer ma vie aujourd'hui avec vous, je dirais que c'est d'abord des rencontres (1). Des gens qui m'ont tendu la main (2), peut-être à un moment où je ne pouvais pas, où j'étais seul chez moi. Et c'est assez curieux de se dire que les hasards, les rencontres (3) forgent une destinée... Parce que quand on a le goût de la chose, quand on a le goût de la chose bien faite, le beau geste, parfois on ne trouve pas l'interlocuteur en face je dirais, le miroir (4) qui vous aide à avancer. Alors ça n'est pas mon cas, comme je disais là, puisque moi au contraire, j'ai pu (5) : et je dis merci à la vie, je lui dis merci, je chante la vie, je danse la vie... je ne suis qu'amour ! Et finalement, quand beaucoup de gens (6) aujourd'hui me disent « Mais comment fais-tu pour avoir cette humanité ? », et bien je leur réponds très simplement, je leur dis que c'est ce goût de l'amour. Ce goût donc qui m'a poussé aujourd'hui à entreprendre une thèse, mais demain qui sait ? Peut-être simplement à me mettre au service de la communauté, à faire le don, le don de soi... »

(1) À ma Famille.

Maman, tu m'as transmis ta détermination, ta polyvalence, ton dévouement, ta fiabilité et la vision d'une vie limitée par notre seule volonté.

Papa, ton sens de l'idéal, de l'humour, de l'enthousiasme et de l'emphase m'a contaminé, de même que ton altruisme et ta recherche d'intelligence en toute circonstance.

Joseph, tu m'as appris l'organisation pour pouvoir développer toutes ses passions de front, tu as été mon modèle en me précédant dans celles-ci, avec une réussite polyvalente qui m'a toujours entraîné. Merci pour ton souci d'accompagnement !

Pierre-Philippe, tu m'as montré comment vivre détaché du regard des autres, à prendre du temps pour soi, et à avoir toujours des projets et des « plans » sur tout dans lesquels embarquer les autres.

Anaële, je me suis nourri de ton insouciance et ta joie de vivre pour savoir profiter des choses simples et vivre d'optimisme, mais aussi ta faculté de te retourner en toute situation et ta loyauté.

Josef, Dana, Katharina et Max : vous êtes les seuls mentionnés ici sans avoir directement pris part à cette période d'études. Vous avez été ma deuxième famille, j'ai appris à ne pas lécher le couteau et à rêver dans une autre langue, j'ai découvert que j'étais musicien, j'ai osé faire tellement de choses avec le simple jeu du « wenn ich du wäre... » qui me permet encore de réaliser des exploits aujourd'hui... Vous m'avez apporté tellement de choses que ces années d'étude n'auraient jamais été ce qu'elles ont été sans vous.

Anne-Marie, tu es ma tante toujours dynamique, à me soutenir et te porter garante dans nos projets de colocation. Merci pour ton attachement et l'accueil chaleureux que tu m'as toujours réservé dans ton foyer.

(2) Aux Flambeaux,

Amélie (Aracari), ta grande amitié a oxygéné le début de mes études, alternant entre livraison de gâteaux (pas cuits) et échanges littéraires. J'ai donné le meilleur de moi dans mes trois vies simultanées pour mériter tes encouragements.

Albane (Nandou), même si on ne s'accorde sur aucun sujet qu'on aborde, tu es une amie d'une constance remarquable. Merci pour les invitations tantôt au gala de l'ENS, tantôt dans un repaire underground anarchiste, avec un hébergement « à la carte », nos discussions à cœur ouvert en pleine nuit dans un kebab avant une course poursuite et l'achat de bière sans alcool... et surtout merci d'être l'objet de mon comique de répétition.

Yaël (Ourébi) et Emeline (Mangouste), vous avez décelé mes barrières et m'avez permis de me renforcer et devenir meilleur.

Nath, Pierre-Yves et Daniel, merci pour la sueur versée, la lutte contre les opposants du dab et du handspinner, les fous rires, l'organisation des plus belles randonnées que j'ai faites, les discussions parfois profondes, les soirées dans notre tente à 3000m... ce que j'ai vu ces soirs-là justifie toutes les tortures, même si la pire des tortures fut de ne pas en voir plus.

Louise (Pinson) et Luc, merci pour les boums en toute occasion, l'humour débridé et les grands moments qu'on a passés ensemble.

Aude, Mathieu et Antoine, vous avez égayé mes animations avec votre humour, votre affection et votre esprit non conformiste.

(3) Aux Dentaires,

Les Bouseux : merci pour votre fidélité tout au long de ces années et votre soutien dans mon redoublement. Sabine (tu as su trouver simplement les mots justes au bon moment, et nous rassemble toujours), Claire (ma camarade scoute, partenaire de danse et accompagnatrice de concerts), Célia B. (merci pour ton souci des autres et ton entrain constant pour se rassembler), Lucie (merci pour ta bonne humeur et tes réflexions toujours justes), Tiphaine (ma traductrice en master), Célia L. (merci pour ta présence systématique et tes bouteilles à chaque réunion), Kevin (mon grand partenaire de TP et master, et alter ego dans bien des domaines), le bon Seb (esthète artistique et vestimentaire, surfeur et trapéziste hors pair) et Maxime (fidèle pilier de bar, informateur officiel et éducateur politique).

L'équipe du cabinet de St Malo : Christophe, Céline, Florence, William et Pascal. Merci pour votre accueil, accompagnement, considération, bonne humeur, compliments, soutien... je me sentais si peu légitime avant de travailler avec vous, « en libéral », où j'étais heureux de me réveiller le matin et pour rejoindre une belle équipe. Grâce à vous, oui, je me sens chirurgien-dentiste et suis content de l'être !

Liloye, merci pour ton humour compréhensif, ton soutien opportun... et d'avoir préparé mon fauteuil tous les mercredis matin en prothèse.

Marie, Manal, Noémie et Marion : merci pour votre joie de vivre, nos marathons ou soirées film/ciné, nos discussions, nos expéditions (que ce soit dans le massif du Jura, sur un catamaran, dans les Alpes ou au lac de Brumath) et tous nos moments de qualité.

(4) À mes maîtres et compagnons de musique,

À Hervé Loing, mon guide dans le monde musical depuis mes 7 ans. Après m'avoir enseigné le piano et l'expressivité, tu m'as présenté l'opéra et m'as transmis tes propres balises musicales (Sonate de Liszt, Martha Argerich, Maria Callas...). Merci particulièrement pour ton ouverture et ton intelligence multiple, qui nous permettent de faire des soirées pizza-opéra, des déchiffrages symphoniques à 4 mains à 4h du matin après 3 bouteilles de champagne, ainsi que des discussions riches sur tous les sujets possibles !

À quelques professeurs du conservatoire de Strasbourg qui, après mon cursus en piano d'une rigidité incompatible avec mes études, m'ont ouvert les yeux sur la compréhension de la musique et de l'art, nourrissant ma passion musicale avec une bienveillance et une adaptabilité remarquables : Werner Strinz (qui m'a ouvert les voies de l'analyse, avec une ouverture trans-artistique d'une rare intelligence, et m'a invité dans le cursus d'analyse et d'écriture qui m'ont tant apporté), Rudolf Weber (qui m'a permis de comprendre la passionnante origine et évolution de la musique au sein de l'histoire, en me dispensant tellement de modules en cours individuels « à la carte » en s'adaptant à mon emploi du temps), Anaïs Loza'ch (qui a su réduire la théorie musicale à quelques enchaînements harmoniques pour m'initier à l'écriture de quatuor, avant de pouvoir appréhender la complexité de la polyphonie et du contrepoint).

L'équipe du restaurant du théâtre de Colmar qui m'a permis de partager mes plus beaux moments musicaux en piano-bar.

À Bach, Beethoven, Mahler, Schubert, Chopin, Liszt, Dvorak, Ravel, Schumann, Rachmaninov, John Williams, et Jean-Jacques Goldmann.

(5) À mes amis satellites,

Charles, Claire, Pauline, Margaux, Camille, Marie.

Vous êtes ma constellation d'inclassables auxquels la catégorie « divers » ne rend vraiment pas justice. Merci pour tous nos moments de partage, de confiance, de rires et de découvertes. Merci pour votre soutien au long de mes études et de la rédaction de cette thèse.

(6) À mes deux grands amis

Sam (Sif), merci pour tout ce qu'on a pu échanger pendant toutes ces années : moments de coloc, fous rires, épuisement dans un trou à eaux grasses ou à la veille d'une rando, duos musicaux, découverte de la vie marine, ... on s'est échangé jusqu'à certains de nos traits de caractère. Je souhaite qu'on puisse continuer toujours ce binôme parfait, fait de grande connivence et de petites différences. Je pense qu'ensemble, on n'a pas fini de découvrir la vie... et de la partager ;)

Raph (Narval), tu entres dans toutes les catégories : cousin, flambeau de la première heure, camarade de promo, musicien et tourneur de pages personnel, coloc, compagnon de rando, équipier de catamaran, ... Merci pour ton soutien indéfectible, ta sensibilité et notre humour commun. Merci de supporter tous mes défauts et d'encourager mes qualités. Merci pour tes réflexions existentielles qui me remettent toujours en question. Merci d'être toujours là.

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2020

N° 38

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 18 septembre 2020

par

de LAJUDIE Emilien
né le 09/10/1993 à COLMAR

INTÉRÊTS PÉDIATRIQUES ET PROTOCOLES OPÉRATOIRES DES
BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES SUR
DENTS PERMANENTES IMMATURES ET DENTS MATURES JEUNES

-

CONNAISSANCES ET PRATIQUES PROFESSIONNELLES DES
BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES EN FRANCE

Président : Professeur HAÏKEL Youssef
Assesseurs : Professeur CLAUSS François
Docteur STRUB Marion
Docteur MANCINO Davide
Membre invité : Docteur ROOS Thierry

Table des matières

I. INTRODUCTION	4
II. LA DENT : HISTOLOGIE ET PHYSIOLOGIE	6
1. L'émail	6
2. La dentine	7
3. Le complexe pulpo-dentinaire et la pulpe	8
A. La pulpe périphérique / pulpe marginale	8
B. La pulpe centrale	13
4. La réaction pulpaire	16
III. LES PULPOPATHIES ET LA CLASSIFICATION DE BAUME	20
IV. LES BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES	23
1. Cahier des charges du matériau idéal	23
2. Limites des ciments endodontiques conventionnels	24
3. Définitions	24
A. Biomatériaux.....	24
a. Définition	24
b. Classification	25
B. Biocéramiques.....	26
a. Définition	26
b. Classification	26
C. Les biocéramiques endodontiques.....	27
a. Définition	27
b. Historique.....	27
c. Classification	31
4. Principaux représentants	33
A. MTA	33
B. Biodentine	34
C. Les biocéramiques d'obturation canalaire.....	35
5. Propriétés physico-chimiques et biologiques	36
A. Propriétés physico-chimiques.....	36
a. Propriétés mécaniques	37
b. pH	40
c. Radio-opacité	42
d. Mouillabilité.....	44
e. Fluidité et Viscosité	44
f. Épaisseur de film	45
g. Porosité.....	46
h. Solubilité	47
i. Étanchéité.....	48
j. Expansion de prise.....	52
k. Coloration	52
l. Force d'adhésion.....	53
m. Résistance à la fracture.....	54
n. Temps de travail / temps de prise	55
B. Propriétés biologiques.....	56
a. Biocompatibilité / cytotoxicité.....	56
b. Bioactivité.....	61
c. Activité antibactérienne et antifongique.....	69
6. Limites	73

V. INDICATIONS PÉDIATRIQUES ET PROTOCOLES OPÉRATOIRES	74
1. Catégories I et II : conservation de la vitalité pulpaire.....	75
A. Définition et objectifs	75
B. Principes du maintien de la vitalité pulpaire	78
C. Coiffage pulpaire indirect	83
D. Coiffage pulpaire direct	84
E. Pulpotomie partielle	87
F. Pulpotomie totale / cervicale.....	89
G. Protocoles.....	90
2. Catégorie III et IV : conservation de l'organe dentaire	92
A. Pulpotomie.....	92
B. Apexification.....	92
a. Problématique des dents à apex ouvert	92
b. L'apexification.....	94
C. Revascularisation.....	104
D. Régénération pulpaire et ingénierie tissulaire.....	115
E. Fracture radiculaire horizontale du tiers moyen ou apical	119
F. Obturation endodontique orthograde	120
G. Obturation endodontique rétrograde – chirurgie apicale.....	124
3. Communications endo-parodontales	127
A. Communications iatrogènes (perforations).....	127
B. Communications pathologiques (résorption)	128
VI. ENQUÊTE D'ÉVALUATION DES PRATIQUES PROFESSIONNELLES PORTANT SUR LES CONNAISSANCES ET L'UTILISATION DES BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES..	132
1. Objectifs de l'étude	132
2. Matériel et méthodes	132
A. Questionnaire utilisé.....	132
B. Critères d'inclusion et d'exclusion des praticiens inclus dans l'étude	136
C. Diffusion du questionnaire	136
D. Analyses statistiques	137
3. Résultats.....	137
4. Discussion	144
5. Conclusion	147
VII. CONCLUSION.....	150
VIII. BIBLIOGRAPHIE	155
IX. ANNEXE : TABLEAUX DE PRODUITS CÉRAMIQUES.....	176

I. INTRODUCTION

La carie dentaire a été définie comme le troisième puis quatrième fléau mondial par l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé). Selon elle, 60 à 90% des enfants scolarisés dans le monde et près de 100% des adultes ont des caries (1)

La perte de dents naturelles et l'édentation sont l'une des dix premières causes d'années vécues avec un handicap (2).

Il s'agit d'une maladie bactérienne où de multiples facteurs de risque entrent en jeu : quantité de sucres, susceptibilité individuelle, régime alimentaire, tabac, alcool, hygiène bucco-dentaire...

Ainsi, outre la prévention comportementale, des thérapeutiques prophylactiques existent : compléments fluorés lors de la formation des dents, exposition constante aux fluorures en faibles concentrations (eau, sel, dentifrice, etc), scellement des puits et sillons anfractueux, etc...

Néanmoins, l'incidence de caries dentaires reste très forte, et elles sont trop souvent dépistées dans un stade avancé où l'interventionnisme est de mise. Cependant, selon le degré d'atteinte, la thérapeutique ne sera pas égale.

Bien que, sur le plan épidémiologique, la part d'enfants de 12 ans indemnes de caries soit passée de 12% à 56% entre 1987 et 2006, de nombreux enfants continuent à développer des caries sur leurs dents temporaires, mais également sur leurs dents permanentes dès l'âge de six ans (3).

D'après une étude menée en Corse sur les enfants de 6 ans et 12 ans en 2006 par Soumahoro, le principal motif de consultation reste la douleur (4). Lorsque l'atteinte carieuse est avancée et engendre des pathologies pulpaire, l'enjeu de préservation de ces dents est particulièrement important.

Le diagnostic de l'état pulpaire, acte routinier dans la pratique du chirurgien-dentiste, conduit à une multitude de prises en charge différentes ayant chacune ses indications et ses conséquences.

Les biocéramiques endodontiques sont apparues il y a plus de 25 ans avec le MTA (Mineral Trioxide Aggregate). Leurs indications d'utilisation se sont développées

jusqu'à s'adresser à toutes les procédures endodontiques. De nouveaux ciments biocéramiques sont apparus sur le marché, caractérisés par une composition proche du MTA. En conservant ses performances en termes de biocompatibilité, d'étanchéité et de bioactivité, ils cherchent à surmonter ses inconvénients, notamment en termes de manipulation et de temps de prise.

Obéissant au principe du gradient thérapeutique, nous allons nous intéresser aux différentes atteintes de la pathologie pulpaire correspondant à des thérapeutiques progressives, et à l'intérêt des biocéramiques endodontiques concernant les dents permanentes chez l'enfant, qu'elles soient immatures ou matures jeunes.

Après un rappel de la physiologie pulpaire et des différents degrés d'atteintes liées aux pathologies pulpaires, nous allons donc:

- présenter les caractéristiques sur les plans physico-chimiques et biologiques de ces biomatériaux
- définir les indications sur les dents permanentes immatures et matures jeunes
- évaluer la pertinence de l'utilisation des biocéramiques, ainsi que leur intérêt clinique
- présenter les protocoles opératoires proposés.

Dans une dernière partie de ce travail, nous présenterons les résultats de l'enquête réalisée auprès des praticiens français afin de dresser un état des lieux des connaissances et pratiques professionnelles sur les biocéramiques endodontiques.

II. LA DENT : HISTOLOGIE ET PHYSIOLOGIE

L'indication thérapeutique devant toute situation clinique dépendra avant toute chose du diagnostic. Or, le diagnostic endodontique repose sur une bonne compréhension de l'histologie et de la physiologie dentaires, afin d'identifier le problème, mais également la cause du problème.

C'est grâce à cette maîtrise progressive de la physiologie pulpaire que les traitements conservateurs ont pu voir le jour et se développer, exploitant notamment le potentiel de réaction pulpaire et développant des matériaux de plus en plus bioactifs.

Nous allons donc commencer par poser succinctement les bases de l'histo-physiologie dentaire.

L'organe dentaire est composé de trois parties :

- la dent minérale (odonte), constituée d'émail et de dentine
- la pulpe dentaire (endodonte), rassemblant chambre pulpaire et canaux radiculaires
- les tissus de soutien (parodonte) permettant la fixation et l'articulation de la dent avec l'os maxillaire ou mandibulaire, comprenant gencive, cément, desmodonte et os alvéolaire.

1. L'émail

L'émail, tissu le plus dur du squelette, est minéralisé à 96% d'hydroxyapatite organisée en prismes et en substance interprismatique.

Il recouvre la dentine sur l'ensemble de la couronne et protège ainsi la dent des agressions mécaniques, chimiques ou bactériennes.

Bien qu'acellulaire, il a une certaine vie physico-chimique, réalisant un échange ionique permanent avec l'environnement buccal par des cycles de déminéralisation-reminéralisation (ions calcium, phosphate, fluorures...).

2. La dentine

La dentine est un tissu conjonctif minéralisé à 70%, pour 20% de matière organique (essentiellement collagénique) et 10% d'eau (5).

Elle circonscrit la pulpe sur l'ensemble de la dent, est recouverte d'émail en coronaire et de cément au niveau radiculaire.

Elle est perméabilisée par de nombreux canalicules dentinaires, remplis de substance fondamentale amorphe. On distingue les canalicules principaux (allant de la pulpe à la jonction amélo-dentinaire) des canalicules latéraux (reliant deux canalicules principaux). Leur concentration et diamètre sont les plus élevés à la limite pulpaire (65 000 / mm² de 2 à 4 microns) et décroissent en progressant vers la jonction amélo-dentinaire (15 000 / mm² de moins d'un micron) (6).

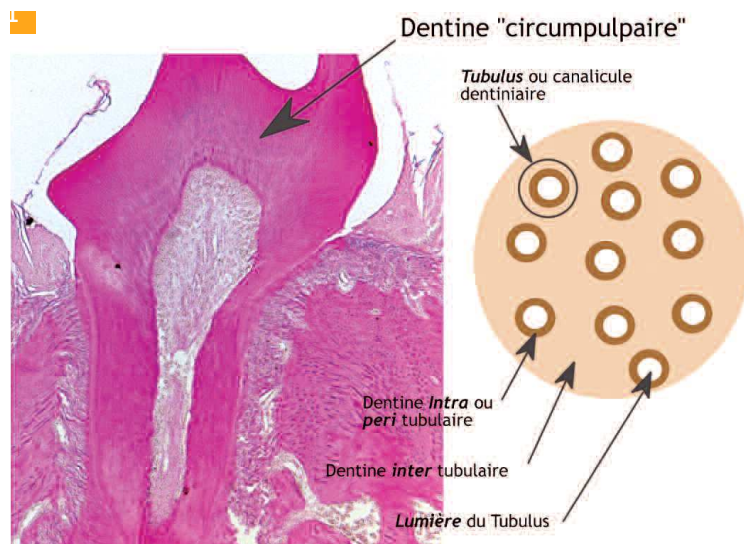


Figure 1 : Description schématique de la structure de la dentine circumpulpaire (5)

On retrouve trois types de dentine (7)(8)(9):

- la dentine primaire, établie lors de la formation de la dent, présentant une forte teneur organique. Elle permet d'établir le « patron » de l'organe. La partie la plus externe est atubulaire, sorte de « manteau dentinaire » recouvrant une dentine tubulaire appelée dentine circumpulpaire ou orthodentine.
- la dentine secondaire, sécrétée après la formation radiculaire et tout au long de la vie, en continuité avec la structure de la dentine primaire. L'apposition continue se fait également au niveau intra-tubulaire, aboutissant à une diminution progressive de la lumière des tubules.

- la dentine tertiaire, sécrétée en apposition irrégulière par les cellules odontoblastiques en réponse aux stimuli agressifs (carie, attrition, érosion...), afin de protéger la pulpe sous-jacente.

On distingue la dentine réactionnelle sécrétée par les odontoblastes, de la dentine réparatrice produite par des odontoblastes-like néoformés à partir des cellules progénitrices pulpaire suite à la nécrose des odontoblastes.

3. Le complexe pulpo-dentinaire et la pulpe

La pulpe est un tissu conjonctif lâche, constitué d'éléments cellulaires, vasculaires et nerveux, contenant quelques vaisseaux lymphatiques, maintenus dans une matrice fibreuse et une substance fondamentale.

Elle a pour principales fonctions (10)(11) :

- La nutrition des cellules pulpaire et dentinaire
- La formation physiologique de dentine, compensant la perte d'émail et de dentine
- La défense face aux agressions (microbiologiques, mécaniques ou thermiques) et la formation de dentine de réparation.
- La sensibilité nerveuse, en contribuant (avec les récepteurs du ligament alvéolo-dentaire) aux informations de variations de température, de pression, et de lésion des tissus minéralisés.

La pulpe s'organise en deux zones : une zone périphérique et une zone centrale.

A. La pulpe périphérique / pulpe marginale

Il s'agit de tous les éléments au contact de la dentine.

Elle est elle-même caractérisée en trois zones :

- La couche odontoblastique
- La couche acellulaire de Weil
- La couche cellulaire de Höhl

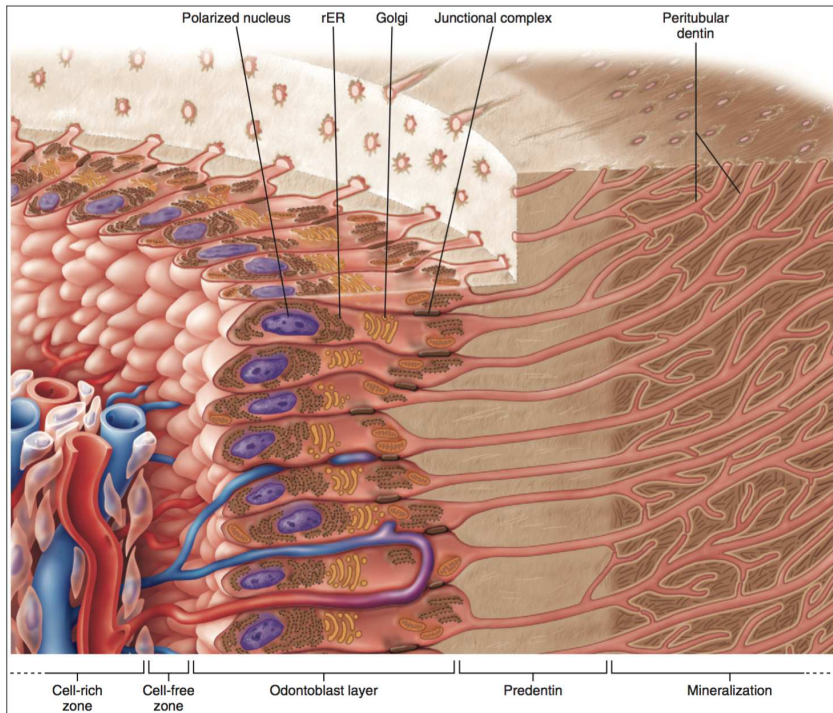


Figure 2 : l'odontoblaste au cœur du complexe dentino-pulpaire (12)

Au niveau périphérique, une couche d'odontoblastes, agencée en palissade unicellulaire à l'interface entre pulpe et dentine et formant la pré-dentine, étendent leurs prolongements cytoplasmiques dans les canalicules dentinaires. Ils sont reliés entre eux par des jonctions gap, qui assurent la communication inter-odontoblastique ainsi que le rôle de barrière étanche.

Ces cellules, outre leur rôle de formation dentinaire depuis le développement embryonnaire (synthèse de collagène de type I et induction de la minéralisation de cette matrice organique), sont désormais également considérées comme des cellules sensorielles : capables de détecter l'invasion bactérienne et d'initier l'inflammation pulpaire et la réaction immune. Elles sont également équipées en canaux ioniques impliqués dans la mécanotransduction ou la nociception, expliquant leur probable responsabilité dans la sensibilité thermique et osmotique.

Issus des fibroblastes pulpaires, les odontoblastes sont hautement spécialisés et ne peuvent donc plus se diviser : ils sont ainsi particulièrement précieux. En revanche, l'inflammation pulpaire consécutive à l'agression peut entraîner la différenciation de cellules souches pulpaires en odontoblastes-like capables d'effectuer la dentinogénèse réparatrice (14). Ces cellules souches pluripotentes se retrouvent dans

la dent définitive (DPSC : Dental Pulp Stem Cells) comme dans la dent temporaire (SHED : Stem cells from Human Exfoliated Deciduous teeth) (11).

D'autre part, les odontoblastes situés à l'interface pulpe / dentine sont les premières cellules rencontrées par les bactéries pénétrant dans le tissu dentinaire pendant le processus carieux, et pourraient donc jouer un rôle crucial dans cette réponse. En effet, les odontoblastes activés via TLR2 par l'acide lipotéichoïque (LTA) dans la paroi des bactéries Gram-positives sont capables d'initier une réponse immunitaire innée en sécrétant des chimiokines qui recrutent des cellules dendritiques immatures tout en régulant à la baisse leurs fonctions spécialisées de synthèse et de minéralisation de la matrice dentinaire (15).

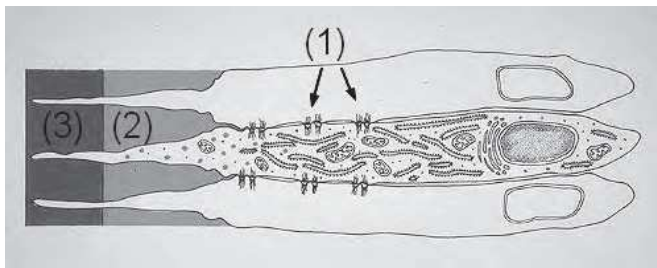


Figure 3 : ultrastructure et fonction sécrétoire des odontoblastes (13)

- (1) Jonctions gap
- (2) Prédentine
- (3) Dentine

La couche sous-odontoblastique est une couche acellulaire, très inconstante, dite de Weill. On y retrouve le plexus de Raschkov, rassemblant les branches terminales des fibres nerveuses myélinisées qui vont y perdre leur gaine de myéline.

Suit enfin la couche cellulaire de Höhl, constituée de fibroblastes et cellules mésenchymateuses indifférenciées qui pourront se différencier en odontoblastes-like pour sécréter de la dentine de réparation.

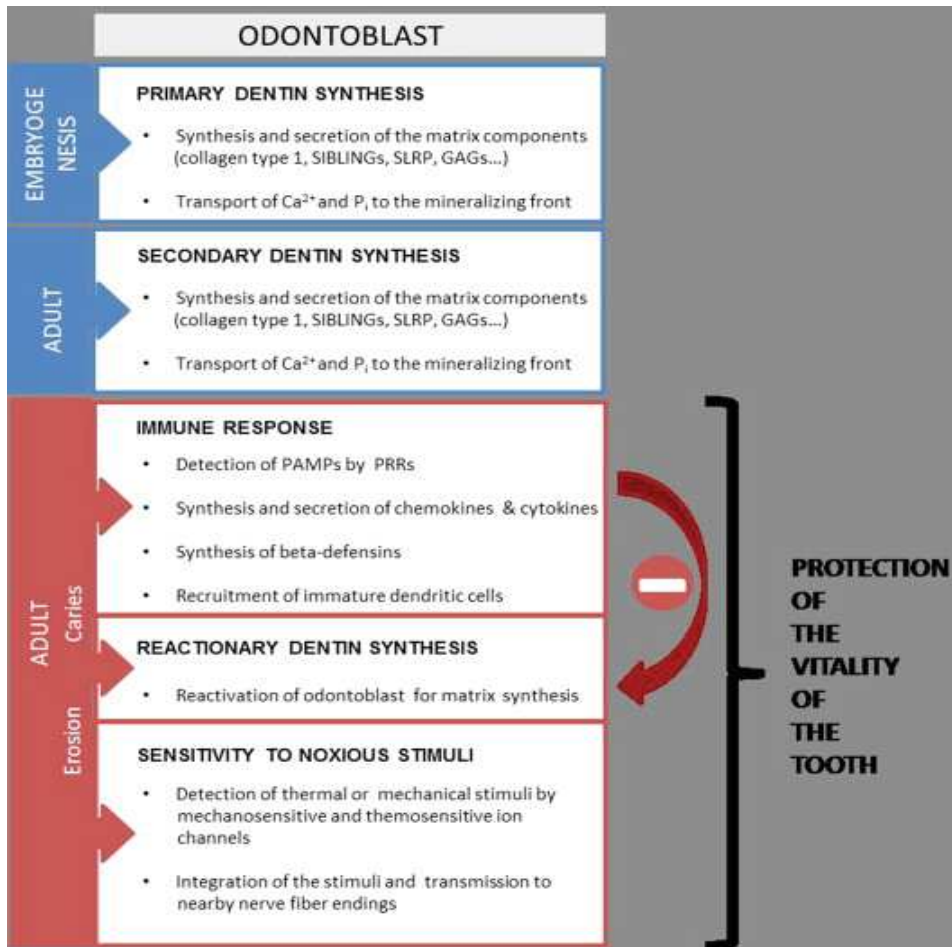


Figure 4 : La physiologie de l'odontoblaste (12)

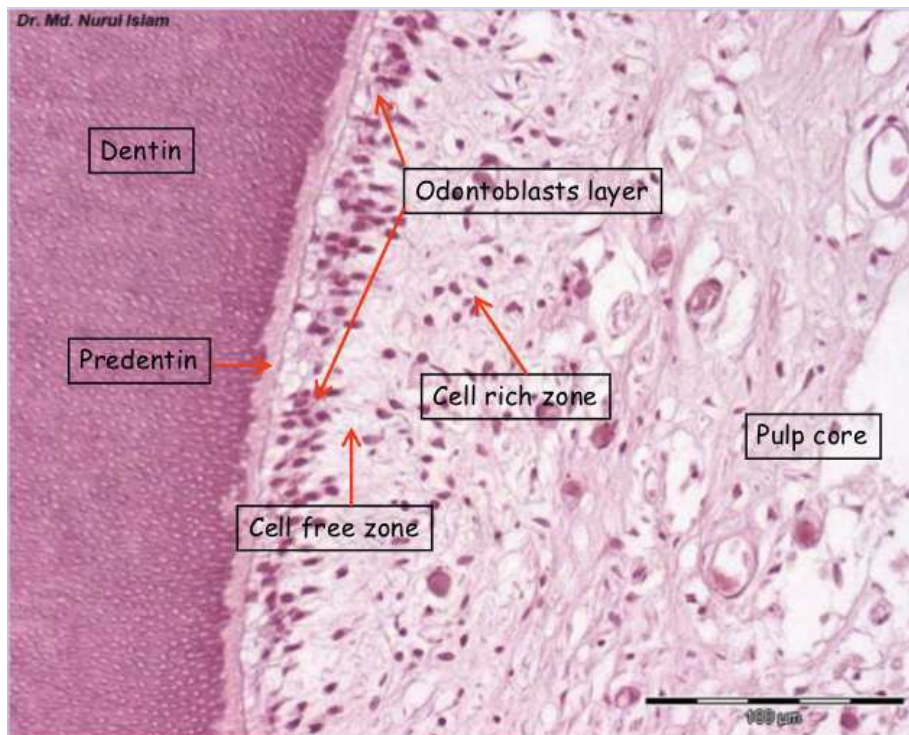


Figure 5 : Coupe histologie du complexe dentino-pulpaire (12)

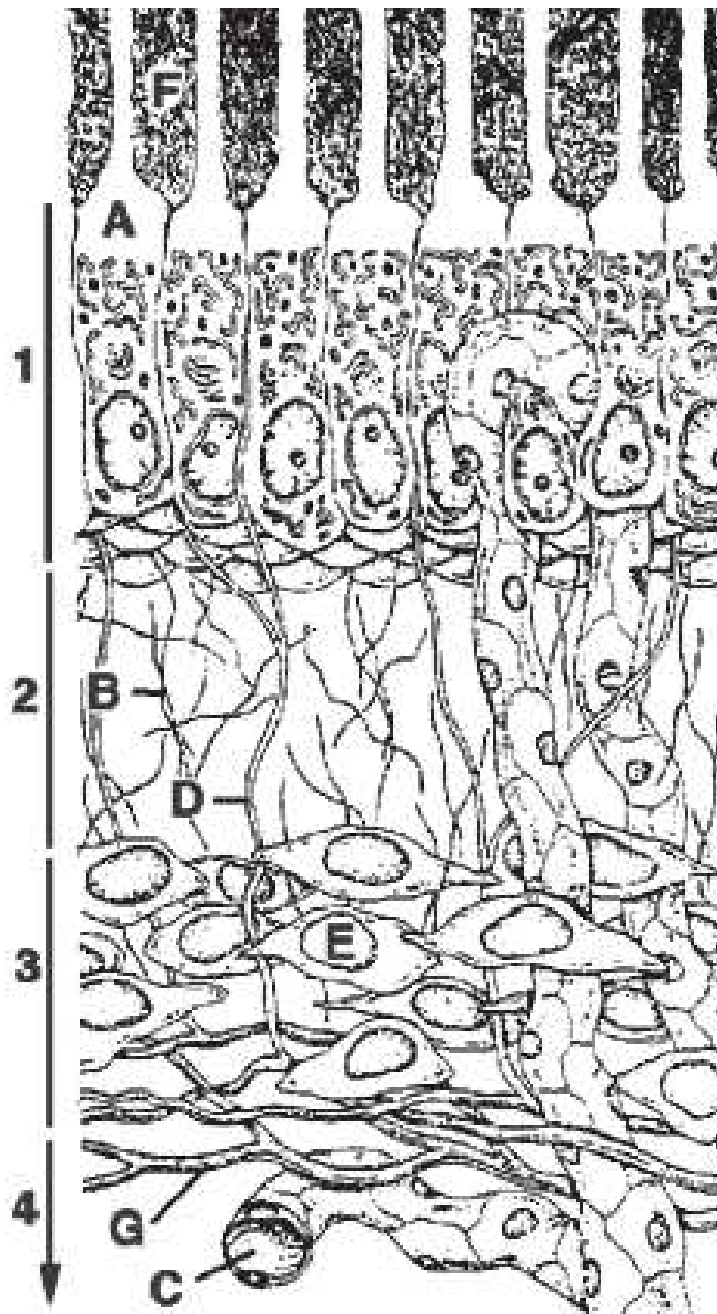


Figure 6 : L'organisation pulpaire (16)

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1. Couche odontoblastique | A. Odontoblaste |
| 2. Couche acellulaire de Weil | B. Fibres collagéniques réticulées |
| 3. Couche cellulaire de Höhl | C. Capillaire |
| 4. Pulpe centrale | D. Nerf |
| | E. Fibroblaste |
| | F. Prédentine |
| | G. Plexus de Raschkov |

B. La pulpe centrale

Au niveau central, on retrouve les éléments responsables de son innervation, sa vascularisation, sa nutrition et sa réparation lors des agressions physiques, chimiques ou bactériennes (9).

Le tissu pulpaire proprement dit comprend une large majorité de fibroblastes et fibrocytes, assurant le renouvellement de la matrice extra-cellulaire en sécrétant la matrice fibrineuse (collagène, réticuline, oxytalane). Ces cellules sont reliées par des jonctions communicantes, formant ainsi un réseau continu qui se déplace suivant un mouvement horizontal (pour la pulpe coronaire) ou vertical (pour la pulpe radiculaire), les amenant à finir leur cycle et entrer en apoptose au niveau de la couche de Höhl.(8) On retrouve également une réserve de cellules souches d'origine mésenchymateuse, le plus souvent situées à proximité des vaisseaux présents au niveau de la couche de Höhl. Ces cellules, présentes initialement dans la pulpe ou ayant migré à partir d'autres tissus tels que la moelle osseuse, peuvent se différencier en fibroblastes ou neo-odontoblastes tout au long de la vie. Cependant, leur nombre et leur potentiel réparateur diminuent dans les pulpes âgées (8).

Enfin, on retrouve une grande variété de cellules immunitaires (cellules dendritiques, lymphocytes T, mastocytes et macrophages). Ces cellules immunitaires représentent entre 8 et 10% de la population totale des cellules pulpaire et garantissent ainsi une barrière à l'invasion bactérienne (8).

La substance fondamentale est principalement constituée de 90% d'eau, de glycoprotéines de structure et glyco-amino-glycanes responsables de l'absence de minéralisation de ce tissu conjonctif et de sa résistance à la compression (10).

La vascularisation sanguine est très abondante. L'artère carotide externe donne l'artère maxillaire, dont est issue l'artère dentaire, qui se subdivise en multiples artérioles pour chaque dent, les artérioles formant de vastes plexus capillaires pulpaire qui se terminent dans les veinules centrales évacuant les déchets métaboliques (8).

Cette abondance sanguine explique la douleur paroxystique de la pulpite aiguë : l'inflammation entraînant une extravasation très rapide, l'augmentation de pression au

sein de cet espace clos comprime très fortement l'ensemble des structures nerveuses. L'inconvénient de cette vascularisation provient de cette source unique : ainsi, en cas de lésion vasculaire, la cicatrisation pulpaire devient compliquée (17).

La vascularisation lymphatique est également assurée par de petits capillaires drainant de la périphérie vers le foramen apical.

Par ailleurs, l'innervation pulpaire est issue des branches maxillaire et mandibulaire du nerf trijumeau. Exclusivement sensitive si l'on excepte l'innervation vasomotrice, elle est principalement assurée par des fibres myélinisées A (delta et beta) et amyéliniques C qui viennent former coronairement le plexus nerveux de Raschkov, les axones perdant leur gaine de myéline au niveau de la couche acellulaire de Weil et formant un réseau de terminaisons nerveuses libres entourant les corps cellulaires des odontoblastes et se pourvoyant jusque dans les tubuli.

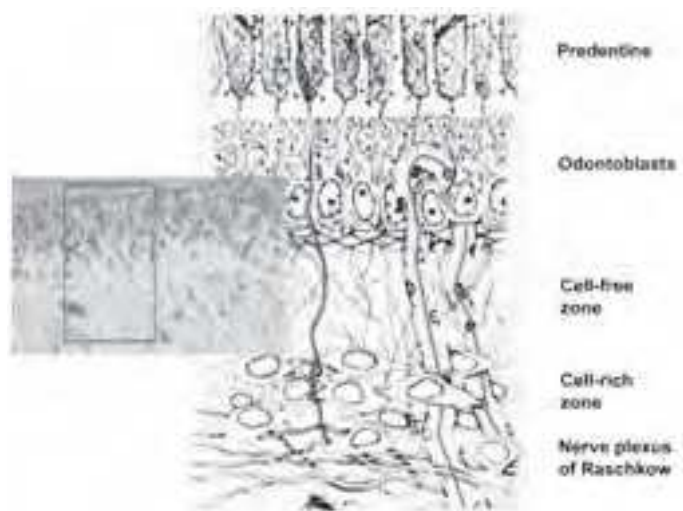


Figure 7 : Innervation pulpaire périphérique (10)

La théorie de la sensibilité hydrodynamique explique qu'une variation thermique provoquerait un rapide déplacement des fluides au sein des tubuli dentinaire, induisant une sensation douloureuse.

Les fibres A, situées en périphérie et à niveau d'excitation faible, répondraient principalement au froid ou aux stimulations mécaniques par une douleur intense et rapide.

Les fibres C, à seuil d'excitation plus élevé et surtout présentes en zone centrale, seraient plutôt concernées par la chaleur et conduiraient une douleur sourde et diffuse, associées à la douleur de type inflammatoire (18).

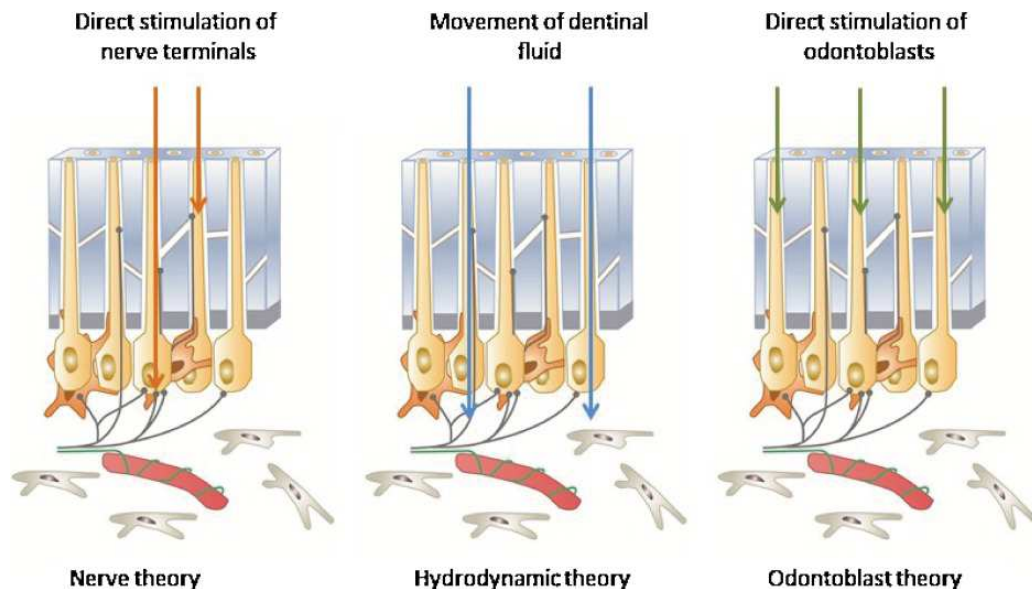


Figure 8 : Les théories de la sensibilité dentino-pulpaire(12)

Nous pouvons à ce stade synthétiser les trois théories prépondérantes, non exclusives l'une de l'autre, expliquant la sensibilité de la dentine au chaud, au froid, au sucré, à la pression, au contact :

- Théorie hydrodynamique : les canalicules dentinaires constituent des voies de cheminement du fluide dentinaire transmettant les variations de pression (mécanique, thermique ou chimique) à la pulpe. Ce fluide est un exsudat pulpaire contenant des agents antimicrobiens et qui se comporte comme un hydrogel.
Un stimulus froid entraîne un déplacement centrifuge du fluide, à l'inverse d'un stimulus chaud. Ces variations de pression intéressent les fibres A directement à l'intérieur des tubuli ou en proximité de la dentine.
- Théorie de la transmission par prolongement odontoblastique : les odontoblastes auraient une fonction sensorielle et transmettraient les stimuli, par l'intermédiaire des jonctions gap qui les relient aux axones, transformant les informations reçues en signal nerveux grâce à leurs canaux ioniques.
- Théorie neuro-physiologique : il y aurait des structures nerveuses directement au niveau du tiers interne de la dentine (19).

4. La réaction pulpaire

Lors d'une agression dentinaire ou pulpaire, il se produit un certain nombre d'altérations de la structure histologique de la pulpe.

Il s'opère généralement une désorganisation de la couche odontoblastique avec mort des odontoblastes agressés, entraînant la libération de facteurs de destruction tissulaire lésant les cellules adjacentes et sous-jacentes (17).

Ces lésions déclenchent une réaction inflammatoire, avec une réaction pulpaire variable, allant de la néoformation dentinaire à la nécrose pulpaire totale (20).

Ainsi, cette réaction inflammatoire initiale peut faire place à plusieurs évolutions :

- Cicatrisation : la lésion est circonscrite, le sang est redirigé par l'ouverture des shunts vasculaires, permettant de rétablir une pression tissulaire normale et d'éviter l'hypoxie généralisée, et le tissu lésé est remplacé par un nouveau tissu. Un tissu de granulation riche en cellules vasculaires se forme et les cellules souches se différencient pour assurer la structure pulpaire.
- Nécrose : l'œdème intra-pulpaire trop étendu compromet l'ensemble de la structure pulpaire, et la pression générée comprime les vaisseaux nourriciers, entraînant la nécrose pulpaire. La pulpe agressée se nécrose également en cas d'infection.
- Tissu de remplacement : Les odontoblastes sécrètent rapidement de la dentine réactionnelle. Cela peut se limiter à des calcifications intra-pulpaire autour des thrombi traumatiques, ou bien oblitérer l'espace pulpaire, partiellement ou intégralement.
- Résorptions radiculaires internes : la pulpe enflammée peut voir l'activation de dentinoclastes qui vont résorber les tissus minéralisés depuis l'espace pulpaire.

L'influence de la maturation radiculaire est capitale : le pronostic pulpaire sera grandement influencé par la taille du foramen apical. En effet, un apex ouvert permettra une vascularisation importante et un meilleur recrutement des facteurs de croissance et des cellules souches. Une dent immature aura donc toujours un meilleur pronostic de cicatrisation pulpaire (21).

Lors d'un processus d'usure ou de carie à évolution lente, la dentine réactionnelle est synthétisée par les odontoblastes de première génération (17).

Il est important de savoir que la dentine est un réservoir de molécules bioactives, une matrice contenant des protéines, des facteurs de croissance ou des cytokines (22). Ces molécules seront libérées lors de la déminéralisation de la dentine.

Les travaux de Smith et Tobias (23–25) ont montré que des facteurs libérés lors de la dissolution dentinaire (par EDTA ou collagénases) diffusaient vers le parenchyme pulpaire, stimulant ainsi l'activité odontoblastique. Il s'agit de protéines et facteurs de croissance tels que TGF β -1 et BMP-7, initiant une médiation cellulaire trans-dentinaire. Il est intéressant de noter que les cavités témoins dépourvues des composants de la matrice dentinaire n'ont montré aucun dépôt de dentine réactionnelle (à 14 jours d'observation).

Les odontoblastes et cellules sous-odontoblastiques possèdent des récepteurs spécifiques au TGF β -1, dont la diffusion induit l'accumulation préférentielle (migration) de ces cellules, ainsi que la production de collagène I (matrice extracellulaire) et la prolifération cellulaire. (26) (27)

Cette prise de conscience motive le développement de nouveaux protocoles et biomatériaux pour préserver la vitalité pulpaire. Ainsi, les matériaux de coiffage pulpaire (comme l'hydroxyde de calcium ou le MTA) sont capables de solubiliser ces molécules dentinaires qui vont stimuler la dentinogenèse tertiaire, par l'activation de voies de signalisation impliquées dans la dentinogenèse, la différenciation odontoblastique et la réaction inflammatoire (28).

Dans le domaine de l'ingénierie tissulaire, de nombreux travaux basés sur l'utilisation de ce type de molécules sont en cours, avec pour objectif la régénération *ad integrum* de la pulpe (voir chapitre V.2.D.).

En cas d'altération directe de la couche odontoblastique par une agression trop intense ou prolongée, le processus de dentine réparatrice entre en jeu. C'est ce phénomène que l'on appliquera dans les procédures de coiffages ou pulpotomies (8).

Suite à la nécrose des odontoblastes, les cellules sous-odontoblastiques vont migrer, se diviser et se différencier au contact de la zone nécrotique : ce sont les odontoblastes de deuxième génération, ou odontoblastes de remplacement, ou odontoblastes-like. Ceux-ci sont issus des précurseurs pulpaires, qu'il s'agisse de cellules souches

mésenchymateuses quiescentes, cellules fibroblastiques (29) ou péricytes (30). Ces cellules, caractérisées comme « cellules souches de la pulpe dentaire » (DPSC), ont un large avenir dans l'ingénierie tissulaire pour leur grand potentiel de prolifération, leur multipotence (potentiel de différenciation en odontoblastes, progéniteurs neuronaux, ostéoblastes, chondrocytes et adipocytes) et leur accessibilité (la pulpe dentaire étant sans doute la source la plus accessible de cellules souches postnatales) (31).

Après différenciation odontoblastiques, ces cellules vont produire une matrice minéralisée en dentine atubulaire isolant la pulpe du milieu extérieur, appelée fibrodentine ou ostéodentine. Cet isolement réalisé, les odontoblastes-like se polarisent et commencent la formation d'une dentine tubulaire (32), permettant ainsi de poursuivre la formation d'un pont dentinaire.

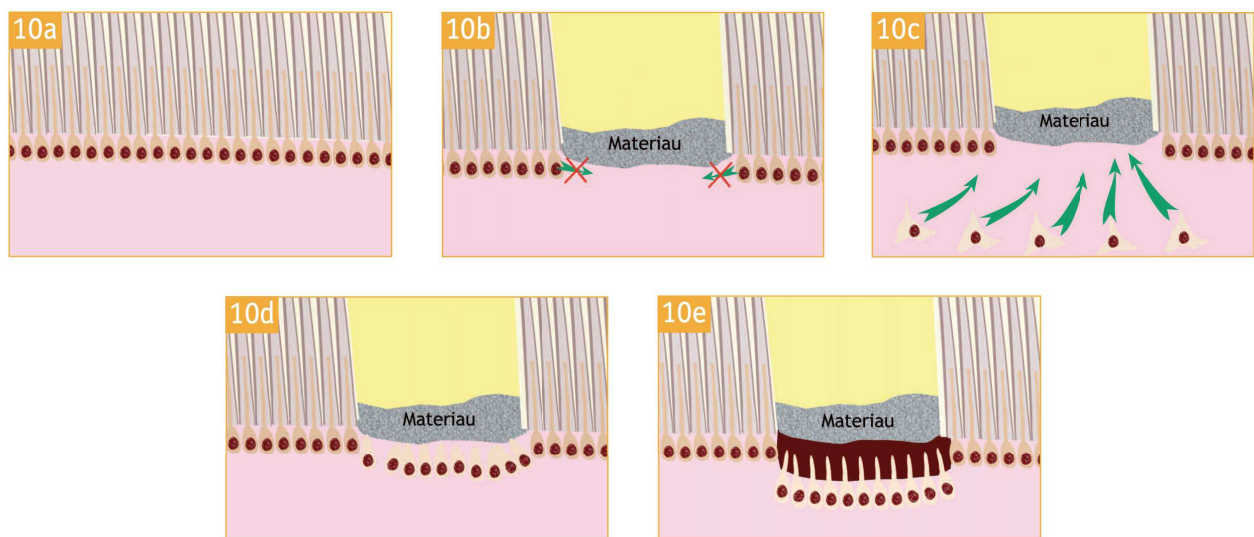


Figure 9 : Dentinogénèse réparatrice dans le cadre d'un coiffage pulpaire direct (5)

Contrairement à un tissu conjonctif conventionnel, la cicatrisation de la palissade odontoblastique ne se fait pas par division des cellules bordant la plaie (a et b). L'attraction de nouvelles cellules (c) et leur différenciation en cellule sécrétrice de dentine (d) induit la formation d'un pont dentinaire en contact avec un matériau approprié (e).

Diogenes et coll. (33), dans une revue de la littérature portant sur les procédures de régénération pulpaire, ont décrit les différentes cellules souches humaines disponibles au niveau des maxillaires.

Parmi elles, 7 grandes familles ont été identifiées:

- les SCAPs (Stem Cells of the Apical Papilla), correspondent aux cellules souches de la papille apicale décrites par Sonoyama en 2008,
- les iPAPCs (Inflammatory Periapical Progenitor Cells) sont les cellules retrouvées dans les Lésions Inflammatoires Periapicales d'Origine Endodontique (LIPOE),
- les SHEDs (Stem Cells from Human Exfoliated Teeth), sont les cellules souches issues de la pulpe des dents temporaires,
- les PDLSCs (Periodontal Ligament Stem Cells), sont les cellules souches issues du ligament alvéolo-dentaire,
- les DFSCs (Dental Follicle Stem Cells) sont les cellules issues du sac péricoronaire des dents de sagesse,
- les TGPCs (Tooth Germ Progenitor Cells) sont les cellules issues de la pulpe des germes de dents de sagesse,
- les DPSCs (Dental Pulp Stem Cells) sont les cellules issues de la pulpe des dents permanentes.

Ces DPSC seraient naturellement dans un état quiescent. Lors d'une agression bactérienne, comme au cours du processus carieux, elles pourraient être activées afin d'obtenir un phénomène de cicatrisation pulpaire, grâce à la formation de cellules spécialisées « odontoblast-like ». Ces dernières seraient recrutées jusqu'au lieu de l'agression pour prendre le relai des odontoblastes détruits (33).

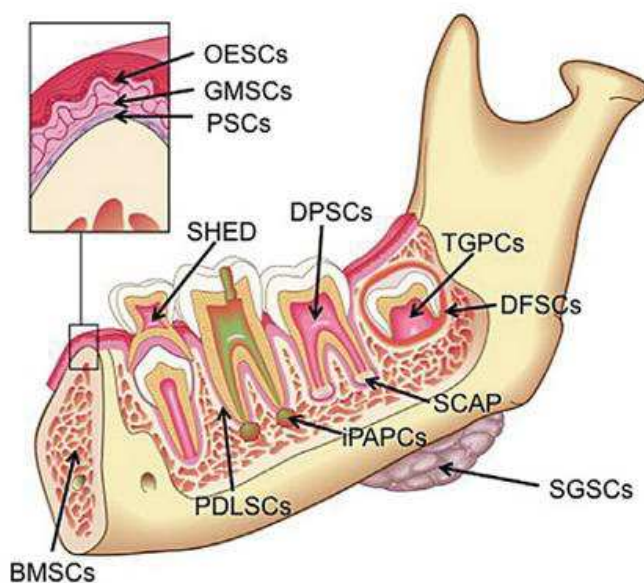


Figure 10 : distribution de cellules souches dentaires et osseuses mandibulaires (33)

III. LES PULPOPATHIES ET LA CLASSIFICATION DE BAUME

Les pathologies pulpairees connaissent de nombreuses étiologies :

- Bactéries : transformant les sucres de l'alimentation en acides, déminéralisent les dents et créent des cavités appelées caries. Lorsque la carie atteint la jonction amélo-dentinaire, des modifications sont observables au niveau de la pulpe, avec développement d'une réaction inflammatoire (8).
- Acidité intra-orale répétée : elle peut provenir de l'alimentation (sodas, jus de fruits, ...), d'un reflux gastro-oesophagien ou d'un trouble comportemental (anorexie). Les acides vont provoquer une érosion chimique qui exposera davantage la dentine ou potentialisera une carie.
- Facteurs iatrogènes : lors d'un soin sur une dent, la dentine soumise à une agression trop forte (échauffement, pression, assèchement...) peut entraîner une réaction pulpaire intense.
- Traumatismes : luxation, fracture, désordres occlusaux, bruxisme, forces orthodontiques excessives... sont autant de sources.

Les atteintes pulpairees peuvent également être catégorisées selon leur origine (34) :

- Facteurs d'origine externe (causatifs) :
 - Irritations mécaniques
 - Irritations thermiques
 - Irritations chimiques
 - Irritations bactériennes
- Facteurs d'origine interne (prédisposants) :
 - Atteinte de l'état général
 - Déficience de la nutrition
 - Trouble endocrinien
 - Atteinte parodontale

La classification des atteintes pulpairees la plus enseignée et utilisée, notamment par l'OMS, est la classification de Baume (34).

En effet, les classifications histopathologiques classiques ne montrent aucune fiabilité dans la concordance entre symptômes cliniques et histologie pulpaire : à symptômes cliniques semblables peuvent correspondre des lésions anatomiques variables (35).

La Classification clinique des pulpopathies de Baume (1962) présente l'avantage d'associer la symptomatologie clinique aux moyens thérapeutiques disponibles (36).

D'après Rohée (34), il existe actuellement quatre possibilités de traitements endodontiques : coiffage pulpaire indirect ou direct, pulpotomie, pulpectomie ou désinfection du canal radiculaire infecté

Et ces quatre possibilités sont incluses dans la classification de BAUME (36) :

- Catégorie I
Pulpes vivantes **sans symptomatologie**,
lésées accidentellement ou proches d'une carie ou d'une cavité profonde, susceptibles d'être protégées par coiffage.
 - Catégorie II
Pulpes vivantes avec **symptomatologie légère**,
dont on tentera, surtout chez les jeunes, de conserver la vitalité par coiffage ou biopulpotomie.
 - Catégorie III
Pulpes vivantes avec **symptomatologie importante**
dont la biopulpectomie suivie d'une obturation radiculaire immédiate est indiquée pour des raisons symptomatologiques, prothétiques, iatrogènes ou de pronostic.
 - Catégorie IV
Pulpes **nécrosées**
avec, en principe, infection de la dentine radiculaire accompagnée ou non de **complications péri-apicales**, exigeant un traitement canalaire antiseptique et une obturation hermétique.
-
- Conservation de la vitalité pulpaire
- Pulpectomie - Parage canalaire

La pulpe dentaire est donc un tissu conjonctif qui a des fonctions incluant des activités d'induction, de formation, de protection, de nutrition et de réparation. La pulpectomie, thérapeutique fréquemment mise en place dans le contexte des pathologies pulpaires,

entraîne des modifications structurales dentinaires, ainsi qu'une fragilisation de la dent à long terme.

Avec les progrès de la biologie de la pulpe tels que l'identification des cellules souches pulpaire et le développement de biomatériaux tels que les biocéramiques, de nouvelles approches pour la conservation de la pulpe dentaire, la thérapie régénérative de la pulpe dentaire et de nouveaux biomatériaux de coiffage ont maintenant été proposés (voir chapitre V).

Sans chercher à entrer davantage dans les détails qui ne concernent pas notre problématique, nous pouvons dès à présent comprendre qu'il n'y a pas qu'une pathologie pulpaire, mais au contraire que les affections sont hétérogènes dans leur présentation clinique et leur symptomatologie et correspondent à des thérapeutiques diverses qui doivent être adaptées à chaque situation clinique.

Forts de ce constat, et connaissant à présent l'histo-physiologie pulpaire, nous nous intéresserons donc bien sûr aux biocéramiques endodontiques, mais en observant chaque pallier thérapeutique.

Ainsi, nous décrirons dans chaque situation clinique l'intérêt que peuvent représenter les biocéramiques endodontiques dans le traitement des dents permanentes chez l'enfant.

IV. LES BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES

1. Cahier des charges du matériau idéal

En 1970, Grossman (37) définit le matériau d'obturation idéal comme devant :

- Être facile à introduire dans le canal,
- Sceller le canal latéralement et apicalement,
- Être bactéricide ou au moins bactériostatique,
- Être radio-opaque,
- Être stérile ou facilement stérilisable,
- Être facile à enlever et à désobturer.

Il ne doit pas :

- Subir de rétraction pendant ou après la prise,
- Être altéré par l'humidité,
- Entraîner la coloration de la dent,
- Irriter les tissus périapicaux,
- Altérer la structure dentaire.

Schmalz redéfinit en 2003 le cahier des charges du matériau d'obturation idéal (38) :

Propriétés techniques	Propriétés biologiques	Propriétés pratiques
<ul style="list-style-type: none">• Absence de rétraction,• Non soluble dans les fluides apicaux,• Bonne adhésion/adaptation à la dentine et entre les différents matériaux,• Absence de porosité,• Absence de coloration dentaire.	<ul style="list-style-type: none">• Non allergène pour le patient et le personnel soignant,• Non irritant pour les tissus,• Stérile,• Bactéricide ou bactériostatique,• Stimulant du processus de cicatrisation.	<ul style="list-style-type: none">• Radio-opaque• Temps de travail adéquat pour la mise en place et le contrôle radiographique,• Facile à mettre en place et à éliminer (en utilisant solvant, chaleur ou instrumentation mécanique)

Tableau I : synthèse des caractéristiques biologiques, techniques et pratiques du biomatériau d'obturation idéal (38).

2. Limites des ciments endodontiques conventionnels

Les ciments endodontiques les plus fréquemment utilisés en cabinet offrent de nombreux avantages, mais présentent quelques limites (39) :

- Les ciments à base d'oxyde de zinc et d'eugénol (Sealite®, Pulp Canal Sealer®, ...) ont une faible adhésion aux parois dentinaires et peuvent entraîner des dyschromies grisâtres de la dent, à cause de l'argent qu'ils contiennent
- Les ciments à base d'hydroxyde de calcium (Sealapex®, Apexit Plus®, ...) sont naturellement résorbés dans l'organisme ce qui induit une perte d'étanchéité sur le long terme.
- Les ciments à base de résine (AH Plus®, Spad®,...) sont cytotoxiques et complètement insolubles : s'ils n'ont pas été associé à des cônes de gutta-percha, le retraitement endodontique est impossible.

3. Définitions

A. Biomatériaux

a. Définition

Lors des conférences de Chester, en 1986 puis 1991, la Société Européenne des Biomatériaux (ESB) définit le terme « Biomatériau » de la façon suivante (40) :

« Matériau [non vivant, utilisé dans un dispositif médical,] conçu pour interagir avec les systèmes biologiques, qu'il participe à la constitution d'un dispositif à visée diagnostique ou à celle d'un substitut de tissu ou d'organe ou encore à celle d'un dispositif de suppléance (ou d'assistance) fonctionnelle ».

Cette notion regroupe tout matériau, naturel ou synthétique, destiné à être implanté en contact avec les tissus (mous et durs) et fluides biologiques, pour remplacer une partie ou une fonction du corps humain.

L'objectif historique est la recherche de biocompatibilité, c'est à dire le développement de matériaux les plus inertes possibles pour une absence d'effets délétères pour l'organisme (41).

Depuis les années 1980, la recherche s'oriente vers une interaction positive afin de stimuler l'intégration des biomatériaux et la guérison des tissus (42).

Il est peut-être intéressant de réaliser ici une précision sémantique : nous parlons généralement de « matériaux biocompatibles », alors que nous étudions des interactions entre matériaux et composants tissulaires, où les caractéristiques à la fois des biomatériaux et de l'hôte sont à prendre en compte. Il serait donc plus juste que la littérature scientifique parle plutôt de « systèmes biocompatibles », si elle n'a pas étudié le biomatériau dans diverses situations cliniques pour le rendre universellement biocompatible (43).

b. Classification

Les biomatériaux peuvent être classés en fonction de leur (44) :

- Réactivité biologique :
 - biocompatibles ou biotolérés,
 - bioinertes ou bioactifs,
 - biorésorbables ou non-résorbables,
 - ostéoconducteurs ou ostéoinducteurs
- Nature chimique :
 - métaux et alliages métalliques,
 - céramiques,
 - polymères,
 - matériaux d'origine naturelle

B. Biocéramiques

a. Définition

La céramique est un matériau inorganique non métallique fabriqué par chauffage de minéraux bruts à haute température (45).

Lorsqu'elle est biocompatible et destinée à un usage médical, on parlera alors de biomatériau céramique, ou encore biocéramique.

Les biocéramiques comprennent entre autre l'alumine, la zircone, le verre bioactif, la vitrocéramique, les silicates de calcium, l'hydroxyapatite et les phosphates de calcium résorbables (46).

Reconnues pour leurs propriétés biologiques fondamentales (biocompatibilité, bioactivité, ostéoconduction, activité antibactérienne et antifongique...), le champ d'action des biocéramiques est large en odontostomatologie, où elles sont utilisées en implantologie, en prothèse et en odontologie conservatrice – endodontie.

b. Classification

L'un des moyens les plus simples de classer les biocéramiques est le suivant (46) :

- Bioinertes : ne déclenchent aucune réaction avec les systèmes biologiques lorsqu'elles sont au contact de l'hôte (alumine, zircone)
- Bioactives : persistent dans les tissus et peuvent subir des interactions avec les tissus environnants (verres bioactifs, vitrocéramiques bioactives, hydroxyapatite, silicates de calcium)
- Biodégradables : solubles ou résorbables, éventuellement remplacées ou incorporées dans les tissus (phosphate tricalcique, verres bioactifs).

C. Les biocéramiques endodontiques

a. Définition

Les biocéramiques utilisées en endodontie sont des biocéramiques bioactives.

Elles sont utilisées dans un large champ d'indications : coiffages pulpaire, pulpotomies, apexogénèses, apexifications, perforations dentaires, résorptions dentaires, obturation canalaire orthograde et rétrograde, substituts dentinaires, reminéralisations dentinaires, traitement des hypersensibilités dentinaires... (47)

Les mécanismes d'action de ces matériaux restent mal connus et leur utilisation est souvent empirique. Mais les succès cliniques rapportés sont tels que leur utilisation se développe considérablement (voir chapitre V).

Nous verrons qu'elles présentent d'excellentes propriétés en raison de leur similitude avec l'hydroxyapatite biologique : capacité à absorber les substances ostéoinductives s'il y a un processus de guérison osseuse à proximité, fonction d'échafaudage régénératif (scaffold bioactif) ou de matrice résorbable, capacité d'étanchéité excellente, de liaison chimique avec la structure dentaire et bonne radio-opacité. Elles possèdent des propriétés antibactériennes, par la précipitation *in situ* après la prise conduisant à la séquestration bactérienne, par les nanocristaux d'un diamètre de 1 à 3 nm empêchant l'adhésion bactérienne, ainsi que par les ions fluorure constituant parfois les cristaux d'apatite.

b. Historique

Les biocéramiques endodontiques, silicates de calcium initialement, tirent leur origine dans le ciment Portland.

En 1824, le maçon anglais Joseph Aspdin réussit à fabriquer, et breveter, une chaux hydraulique en cuisant à haute température (1450°C) un mélange de calcaire et d'argile, qu'il appela « Ciment Portland », dû à sa ressemblance avec la pierre de Portland.

Le ciment de Portland est une pâte (ciment, air, eau) qui agit comme une colle et lie ensemble les granulats (sable, gravier) pour former une masse semblable à de la pierre : le béton. Il est constitué principalement de silicates de calcium, d'aluminium et de fer, qui durcissent grâce à une réaction de prise à l'eau, appelée hydratation.

On comprend immédiatement un avantage majeur de ce type de réaction : il s'agit d'un matériau qui, au lieu d'être restreint par la présence d'humidité (haleine, sang, fluide gingival, fluide dentinaire, exsudat péri-apical...), nécessite de l'humidité pour durcir ! C'est un matériau peu coûteux et, à l'exception de l'absence d'oxyde de bismuth et de niveaux plus élevés d'aluminate de calcium et de sulfate de calcium, le Ciment Portland et le MTA ont une composition principale similaire (48) (49).

La première utilisation dentaire rapportée du ciment Portland remonte à 1878 lorsque le Dr Witte publia un rapport de cas sur l'utilisation du ciment Portland pour remplir les canaux radiculaires.

Le ciment Portland contient des métaux lourds et a de grosses particules irrégulières qui interdisent son utilisation clinique en tant que tel (50).

En 1993 apparaît pour la première fois un ciment Portland purifié pour usage dentaire, avec ajout d'oxyde de Bismuth pour améliorer sa radio opacité, dans le traitement des perforations radiculaires... le MTA (51).

La poudre de MTA est constituée de fines particules hydrophiles qui durcissent en présence d'eau, essentiellement du ciment Portland et de l'oxyde de bismuth dans une proportion de 4:1 (52).

Développé par le Dr. Mahmoud Torabinejad et breveté en 1995, le MTA (Mineral Trioxide Aggregate) reçu l'approbation de la FDA (Food and Drugs Administration) pour un usage endodontique en 1998, et fut alors commercialisé à partir de 1999 aux Etats-Unis avec comme premier produit le ProRoot MTA (53,54).

L'analyse par diffraction des rayons X a révélé que le MTA n'est pas principalement composé d'oxydes. Par conséquent, le terme « agrégat de trioxyde » est inexact (53,55).

La formule originale du MTA est très rapidement envisagée pour l'endodontie, avec un premier rapport publié en 1999 et décrivant le MTA comme obturateur canalaire combiné à la gutta-percha : cette étude observait la réaction péri-apicale des dents de

chiens obturées à la gutta-percha associée soit à du MTA, soit à du verre ionomère (Ketac-Endo). Les auteurs ont observé après 6 mois une absence de réaction inflammatoire apicale et une fermeture du foramen apical sur les dents traitées au MTA, contrairement à celles traitées au Ketac-Endo (56).

Après cette première analyse de l'induction de biominéralisation et de la réaction tissulaire au MTA, la même équipe observe la libération de calcium et la formation de ponts minéralisés (57).

Faisant immédiatement office de gold standard dans toutes les procédures endodontiques, allant du maintien de la vitalité pulpaire à la gestion des communications endo-parodontales, le MTA présente néanmoins plusieurs inconvénients (58–61) :

- Il est difficile d'obtenir une consistance idéale reproductible par sa présentation poudre/liquide nécessitant une longue courbe d'apprentissage
 - Il est difficile à manipuler et à mettre en place
 - Il nécessite un temps de prise long
- A titre d'exemple, l'obturation endodontique rétrograde de plusieurs dents au MTA est rendue plus difficile au regard de la gestion de l'hémostase.
- Il présente une faible résistance à l'érosion
 - Son coût est élevé
 - Des éléments toxiques sont retrouvés dans sa composition, avec notamment une cytotoxicité plus élevée dans son état fraîchement mélangé
 - Il peut entraîner une importante dyschromie des tissus dentaires lorsqu'il est placé dans la chambre pulpaire (lors des procédures de maintien de la vitalité pulpaire). L'inclusion de pigments sanguins lors de la prise du matériau, la présence de métaux lourds dans sa composition et enfin l'utilisation d'oxyde de bismuth en guise de radio-opacifiant sont autant de facteurs induisant cet effet iatrogène imputable au MTA
 - Il exige une humidité suffisante pendant le durcissement
 - Son retrait est difficile après la prise, par absence de solvant connu pour ce matériau

Alors que le MTA était la référence en matière de biocéramiques, les recherches ont constamment tenté de surmonter les inconvénients et d'améliorer ses propriétés

physiques et chimiques. De plus, les risques perçus associés à la présence d'aluminium, d'arsenic et de métaux lourds dans le ciment Portland ont nécessité le développement d'une nouvelle famille de ciments à base de silicate de calcium plus purs (55).

Plusieurs matériaux dérivés du MTA ont été fournis afin de surmonter les inconvénients du MTA d'origine. Par exemple, l'ajout de chlorure de calcium au MTA a permis de réduire le temps de prise et de garantir une bonne biocompatibilité (62), et le remplacement du composant de ciment Portland (dont aluminium et oligo-éléments) dans le MTA par du silicate tricalcique pur a abouti à un biomatériau aux propriétés physico-mécaniques améliorées (63).

Ces nouveaux matériaux ont été développés et reposent sur la chimie des radio-opacifiants et des silicates tricalciques, reconnus pour leur bioactivité et leur biocompatibilité. BioAggregate, Biodentine, Ciment mélange enrichi en calcium (CEM), EndoSequence Root Repair Material Putty and Paste (ERRM) et iRoot BP Plus Root Repair Material (BP-RRM) sont des exemples des nouveaux ciments au silicate de calcium (55,64).

En 2006, l'équipe iranienne d'Asgary introduit la Calcium Enriched Mixture (C.E.M.), aux indications cliniques similaires au MTA tout en ayant une composition chimique tout à fait différente, qui semble présenter de meilleures propriétés physiques (65,66). Néanmoins, son absence de commercialisation sur les marchés occidentaux limite son utilisation et en fait un excellent matériau à l'aspect encore expérimental.

Afin de proposer également une alternative clinique au MTA, la société Brasseler inaugure en 2008 une nouvelle gamme de biomatériaux : les biocéramiques endodontiques « prêtes à l'emploi ». Par la gamme Endosequence, Brasseler présente des biocéramiques combinant silicate de calcium et phosphate de calcium, extrêmement ergonomiques et avec d'excellentes propriétés biologiques et physico-chimiques.

Les difficultés de manipulation rencontrées lors de l'emploi du MTA ont poussé les industriels à décliner trois matériaux : Endosequence BC Sealer (ciment de scellement canalaire), ainsi que Endosequence Root Repair Material sous forme Putty (biocéramique de haute viscosité conditionnée en pot avec une consistance type

« cavit ») et sous forme Paste (biocéramique de basse viscosité injectable conditionnée en seringue).

La gamme s'est également dotée de cônes de gutta spécifiques, les Endosequence BC Points, imprégnés et recouverts de nanoparticules de biocéramiques, permettant d'établir une liaison étroite avec le BC Sealer et d'assurer une meilleure résistance à la fracture radiculaire (67).

En 2009, Septodont présente la Biodentine, devenant depuis incontournable par ses qualités physiques remarquables, une manipulation simplifiée et un large éventail d'applications.

Avec l'ajout de chlorure de calcium comme accélérateur de prise, elle est disponible en capsules prémélangées et conçue pour durcir en 10 à 12 minutes.

La poudre est du silicate tricalcique, additionné à la poudre de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'oxyde de zirconium (ZrO_2). Le liquide est une solution de chlorure de calcium (CaCl_2) avec un agent réducteur d'eau.

Les avantages de ce matériau sont la liaison chimio-mécanique avec la dent et le composite, ainsi qu'une résistance élevée à la compression et à la flexion. Ce matériau a démontré une absorption supérieure de calcium dentinaire par rapport au MTA (68,69).

c. Classification

Il n'y a actuellement pas de consensus pour savoir si le terme « biocéramique » est universel pour tous les matériaux à base de ciment Portland ou se réfère uniquement aux matériaux trisilicatés plus modernes et plus purs. Dans ce document, nous choisissons de parler des « biocéramiques endodontiques » au sens large, englobant notamment les matériaux à base de MTA et les matériaux à base de silicates tricalciques purifiés.

Cependant, il convient de noter que ce terme de « biocéramique » est un terme impropre, car la biocéramique comprend une large gamme de matériaux avec différentes compositions chimiques (55).

Les biocéramiques endodontiques peuvent être classées par (46,47,70) :

- Base de composition
 - Silicates de calcium
MTA, Biodentine, Endo CPM Sealer, MTA Fillapex, BioRoot RCS, TechBiosealer...
 - Alumino-silicates de calcium expérimentaux
EndoBinder, Generex A, Capasio, Quick-Set, EPC (mélange résine Epoxy et Ciment Portland)...
 - Phosphates de Calcium
Hydroxyapatite synthétique, Phosphate tricalcique β
 - Mélange de phosphates de calcium et silicates de calcium
BioAggregate, Ceramicrete, Calcium Enriched Mixture (CEM), Endosequence / TotalFill (nom de commercialisation en France), iRoot
- Gamme
Ex : Endosequence/TotalFill, iRoot, Angelus, Septodont...
- Formulation
 - Scellant radiculaire
Ex : iRoot SP, Endosequence/TotalFill BC sealer
 - Pâte de restauration (Root Repair Material Paste)
Ex : iRoot BP, Endosequence/TotalFill BC RMM Paste
 - Mastic de restauration (Root Repair Material Putty)
Ex : iRoot BP Plus, Endosequence/TotalFill BC RMM Putty
- Type de présentation :
 - Poudre / liquide
Le mélange peut être manuel (système très opérateur-dépendant et produit un gaspillage important) ou par l'intermédiaire d'une capsule à vibrer.
 - Prémélangé
Ciment sous forme de seringue automélangeuse, permettant d'obtenir une consistance homogène et d'éviter le gaspillage. Les ciments prémélangés nécessitent l'humidité des tissus environnants pour faire leur réaction de prise.

4. Principaux représentants

A. MTA

Ce matériau a été commercialisé en 1998 sous le nom de ProRoot MTA® (Dentsply Maillefer).

Il est constitué d'oxyde de calcium (50-70%) et d'oxyde de silicium (15-20%) : silicate tricalcique, silicate dicalcique, aluminat tricalcique et aluminat ferrique tricalcique, avec de la poudre d'oxyde de bismuth ajoutée comme agent radio-opacifiant.

C'est une poudre (trois portions) constituée de fines particules hydrophiles qui, en présence d'eau stérile (une portion), forme un gel colloïdal qui effectue sa prise entre 2h45 et 4h (53) (52).

Le ProRoot MTA est commercialisé en préparations de couleur grise (GMTA) et de couleur blanche (WMTA). Le MTA gris peut provoquer une décoloration des dents, en particulier lorsqu'il est utilisé pour traiter une perforation, où l'esthétique est la priorité. Le MTA blanc, sans aluminat ferrique, a donc été introduit afin de résoudre ce problème.(71) (83) (72)

Le MTA possède des particules très fines et régulières contrairement au ciment de Portland. Sa solubilité est décrite comme faible ou nulle et elle augmenterait avec le temps (73).

Il possède d'excellentes capacités de scellement et d'étanchéité à 3, 6, et 12 mois (74–77).

Ses propriétés physiques seraient augmentées lorsqu'il est en milieu humide après la prise (60).

L'hydratation du MTA produit de l'hydroxyde de calcium, ce qui expliquerait la bonne réponse tissulaire. Il alcalinise le milieu grâce à la libération d'ions OH⁻ (81) et d'ions Ca²⁺, favorisant la production d'hydroxyapatite (72,78).

Il posséderait une activité antibactérienne faible par rapport aux pâtes ZOE et Super-EBA (79) mais une meilleure cytocompatibilité (80,81). Il ne serait ni mutagène, ni génotoxique (60). La production de cytokine est favorisée, ainsi que l'attachement et la croissance lorsque les cellules sont en contact direct avec le matériau (82,83).

Lorsqu'il est utilisé en coiffage pulpaire, il engendrerait un pont dentinaire épais avec peu d'inflammation pulpaire et ce de manière reproductible (84).

Lorsqu'il est utilisé en traitement de perforation ou en chirurgie endodontique, une apposition directe de néo-cément, une faible inflammation, une excellente cicatrisation et une ostéo-induction ont été décrites (85–88).

La radio-opacité du MTA serait de 7,127 mm Al, permettant le bon contrôle du placement du matériau ainsi que le suivi (60).

Le MTA-Plus (MTA-P), bien que composé d'ingrédients similaires aux ProRoot MTA, a une granulométrie plus fine (50% des particules ont un diamètre plus fin que 1 mm) ce qui confère au matériau une surface spécifique plus élevée (89)

B. Biodentine

La Biodentine® est un matériau commercialisé par le laboratoire Septodont. Elle a été initialement conçue pour les restaurations coronaires, en tant que substitut dentinaire.

La composition élémentaire (% en poids) de la poudre est : carbone (4.34 à 9.7), oxygène (42 à 38.5), silicium (7.3 à 7.7), calcium (39 à 41.9) et zirconium (2.2). La poudre est donc principalement composée de silicate tricalcique, de carbonate de calcium et d'oxyde de zirconium comme radio-opacifiant (et non de l'oxyde de bismuth), tandis que le liquide contient du chlorure de calcium comme accélérateur de prise et de l'eau comme agent réducteur.

Sa modification principale porte sur le temps de prise qui est de 12 à 15 minutes.

Les résultats seraient similaires à ceux du MTA. Elle est utilisée pour les coiffages directs, les pulpotomies, les réparations des perforations, l'obturation à rétro, les apexifications, les résorptions cervicales externes et l'endodontie régénératrice.

En outre, elle semble surmonter les principaux inconvénients du MTA (propriétés physiques supérieures, meilleure manipulation, biocompatibilité accrue) (90,81,91).

La Biodentine présente une résistance à la compression, une microdureté, une résistance à la flexion, une capacité de scellement, une résistance à la traction et une libération d'ions calcium nettement supérieures à celles d'autres ciments à base de silicate tricalcique (90).

En revanche, une augmentation de la solubilité à long terme, une libération plus élevée de métaux lourds et une diminution de la résistance au cisaillement ont également été observées (90).

L'activité antimicrobienne de Biodentine était significativement plus élevée contre certaines souches telles que *Streptococcus sanguis*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli* et *Candida albicans* tandis qu'une activité antibactérienne significativement plus faible a été observée contre *Streptococcus mutans* et *Streptococcus salivarius* (90).

Dans des études sur des modèles animaux (90), des expériences de coiffage pulpaire et de pulpotomie ont montré une formation accrue de ponts minéralisés d'épaisseur supérieure.

C. Les biocéramiques d'obturation canalaire

Différents ciments de scellement biocéramiques sont commercialisés, dont Endosequence (Totalfill en Europe) BC sealer, iRoot SP, Well-Root ST, MTA Fillapex, ou encore BioRoot RCS.

Siboni et al. (92) ont déterminé les caractéristiques de BioRoot RCS, en les comparant avec MTA Fillapex, Pulp Canal Sealer et AH Plus : Il a un temps de prise final de 5h et une radio-opacité adéquate (5,2 mm Al). Il a démontré de meilleures capacités dans la libération d'ions calcium (quantité et durée) et l'augmentation du pH (11-12), et montré sa capacité de formation de phosphate de calcium.

Ces ciments sont extrêmement biocompatibles, sans douleurs post-opératoires et avec des propriétés antibactériennes et antifongiques (voir chapitre IV.5.B.c). Ils possèdent une bonne mouillabilité, avec une légère expansion de prise (0,1%) et une liaison chimique avec la dentine (tag-like). De plus, ils libèrent des ions qui obturent le système canalaire laissé vacant, et favorisent la cicatrisation et la minéralisation ostéo-cémentaire (voir chapitre IV.5.B.b).

Ils se retrouvent sous forme pré-mixée ou poudre-liquide à mélanger, possèdent un temps de travail long. En revanche, le retraitement est difficile, et il n'existe pas de solvant spécifique pour ces ciments.

5. Propriétés physico-chimiques et biologiques

Une étude menée par l'équipe de Zhou et *al.* (93) s'est intéressée à cinq ciments de scellement canalair, dont le M.T.A Fillapex et L'Endosequence BC sealer, afin de comparer leurs propriétés physiques.

Les résultats ont montré que le ciment de scellement à base de biocéramiques affiche d'excellents résultats tant au point de vue de la viscosité, de la fluidité, de la stabilité dimensionnelle, du temps de travail que du pH, avec cependant une épaisseur de film et une solubilité plus élevée que les autres produits.

Les résultats sont présentés dans le tableau et le graphique de la figure 11.

Basic Research—Technology

TABLE 1. Physical Properties of the Sealers (mean \pm standard deviation)

	BC sealer	MTA Fillapex	AH Plus	ThermaSeal	PCS	GuttaFlow
Flow (mm)	23.1 \pm 0.69	24.9 \pm 0.54	21.2 \pm 0.27	21.3 \pm 0.47	23.1 \pm 1.21	20.5 \pm 0.32
Film thickness (μ m)	22 \pm 4.58	23.92 \pm 7.05	16.07 \pm 4.5	16.6 \pm 5.26	13.35 \pm 2.8	15.67 \pm 1.4
Working time (min)	>1440	45 \pm 15	240 \pm 40	300 \pm 40	453 \pm 31	15 \pm 5
Setting time (h)	2.7 \pm 0.3	2.5 \pm 0.3	11.5 \pm 1.5	23.0 \pm 1.5	26.3 \pm 2.5	0.7 \pm 0.1
Solubility* (%)	2.9 \pm 0.5	1.10 \pm 0.15	0.06 \pm 0.04	0.0015 \pm 0.07	0.07 \pm 0.03	0.02 \pm 0.001
Dimensional change† (%)	0.087 \pm 0.04	-0.67 \pm 0.01	-0.034 \pm 0.01	0.04 \pm 0.02	-0.86 \pm 0.03	0.037 \pm 0.02

*Solubility = (removed mass of sample)/(original mass of sample) \times 100.

†Dimensional change: minus means shrinkage.

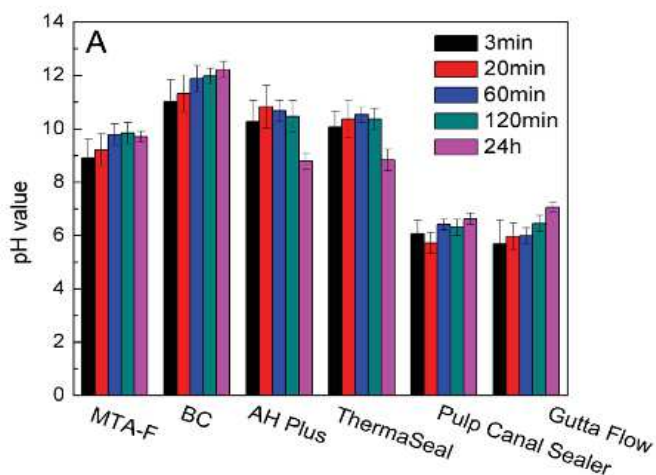


Figure 11 : Résultats de l'étude de Zhou et *al.* Comparant les propriétés physiques de cinq ciments de scellement canalair (93)

A. Propriétés physico-chimiques

La synthèse des différentes propriétés physico-chimiques des principaux biomatériaux endodontique par Wang (94) est très intéressante à consulter.

	Biodentine	MTA	MTA Angelus	ERRM (or iRoot BP Plus)	BC Scaler (or iRoot SP)	MTA Fillapex	MTA Plus
pH	11.7–12.4 (69)	9.0–12.5 (16,162)	7.3–9.6 (162,167,168)	7.3–8.9 (192)	10.3–11.1 (34)	9.7–10.5 (35,226,237)	8.3–11.7 (243)
Calcium release (mg/L)	14.7–34.0 (71)	9.7–24.0 (10,71)	0.8–122.3 (162,167,168,216)	179.6 (216)	2.5–11.3 (34,71)	144.4 (216)	7.7–43.4 (243)
Flow rate (mm)	–	–	–	–	26.9 (34)	31.0 (216)	–
Porosity (%)	6.8 (63)	30.3–38.4 (37)	28.0 (166)	–	–	–	40.3 (243)
Solubility (%)	< 0.0 (64)	1.7–2.8 (37)	-1.2–6.4 (167,168,216)	–	20.6 (216)	14.8–16.1 (216,226)	18.5 (243)
Radiopacity (mm Al)	3.3–4.1 (63,64)	7.1 (16)	5.3–6.9 (167)	–	3.8 (34)	7.0 (35)	–
Setting time (h)	0.1–0.7 (63,64)	6.9 (16,97)	0.2–5.3 (12,167,168)	>24.0 (3)	72.0–240.0 (34,203)	>12.0 (233)	0.9 (243)
Microhardness (VHN or KHN)	48.4–130.0 VHN (63,64)	53.2–60.0 VHN (105,108), 46.6–52.3 KHN (109)	36.3–84.3 VHN (169)	–	>15.0 KHN (203)	–	–
Compressive strength (N)	67.1–316.4 (63,64)	60.0–101.7 (108,110)	53.4–81.3 (110)	41.0–43.0 (191)	–	–	32.0–47.0 (191)
Push-out bond strength (MPa)	6.47–7.64 (22,74)	3.0–9.4 (22,115–117)	–	–	0.8–3.4 (206,212,241)	0.2–3.0 (21,117, 206,212)	0.98–2.3 (241)
Flexural strength (MPa)	34.0 (63)	10.7–14.2 (113)	–	–	–	–	–
Cell viability (%)	60.0–100.0 (39,63)	55.0–110.0 (3,127,177)	88.9–105.4 (127,177,195)	40.0–110.0 (3,127,195)	>90.0–100.0 (221)	35.0–95.0 (35)	>80.0 (243)

Data are collected in ranges from different experimental conditions in various studies. Data are shown in values (references).

Tableau II : synthèse des propriétés physico-chimiques des principales biocéramiques endodontiques selon Wang (94)

a. Propriétés mécaniques

La densité, la résistance à la compression, la dureté et la résistance à la flexion de la Biodentine sont plus élevées que le MTA et le Bioaggregate, non influencées par la salive ou le sang mais par la présence du pH acide (90).

i. Dureté – Résistance à la déformation

La dureté peut être définie comme la résistance à la déformation plastique de la surface d'un matériau. Elle va influencer la résistance à l'abrasion, la transmission des contraintes occlusales au sein du matériau et à la dent traitée.

La micro dureté des tissus dentaires se rapproche de (95) :

- 340 kg.mm⁻² (ou VHN) pour l'émail
- 60 à 90 kg.mm⁻² (ou VHN) pour la dentine

Le but de nos biomatériaux est donc de se rapprocher au maximum de la valeur de la dentine. Peu d'articles traitent de la microdureté des biocéramiques en endodontie. Les travaux de Wang et *al.* (94), récapitulant les propriétés physiques des principaux biomatériaux endodontiques, donnent les valeurs de microdureté de l'Endosequence BC sealer® (>15 VHN), le MTA Angelus (36,3 – 34,3 VHN), le MTA® (46,6 – 60 VHN) et la Biodentine (48,4 – 130 VHN). (voir Tableau II)

Cependant, une étude du même auteur (96) a montré que la valeur de cette microdureté n'est pas constante. Cette dernière varie en fonction du milieu en présence du biomatériau. En effet, plus le milieu est acide, plus la microdureté diminue. Une modification de la structure est aussi constatée puisque l'étude nous montre une structure plus poreuse et moins cristalline des biomatériaux soumis à un milieu acide. Lorsque le pH augmente, plusieurs types de structures cristallines se forment par recristallisation.

ii. Résistance à la compression

La résistance à la compression est un facteur important à prendre en compte car le matériau d'obturation sera placé dans une cavité soumise, indirectement, à la pression occlusale(53).

Résistance à la compression (MPa) = $4 p / \pi d^2$

où p est la charge maximale en Newton (N) et d est le diamètre en mm (97).

Comme les autres ciments hydroscopiques, le rapport eau / poudre peut affecter les propriétés physiques de ce ciment. Des rapports eau-poudre plus élevés entraînent des valeurs de résistance à la compression plus faibles avec ProRoot MTA, MTA Angelus ou encore CEM. (98)(97)

Il est par conséquent conseillé de respecter le rapport eau-poudre recommandé par le fabricant.

D'après Wang et *al.* (94) et Rajasekharan et *al.* (90), la résistance à la compression de la Biodentine est, dans l'ordre, supérieur au MTA, au MTA Angelus, à l'iRoot BP Plus ainsi que MTA Plus.

iii. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion est la capacité d'un matériau à résister à la déformation sous une charge. Plus elle est élevée, plus le risque de fracture est faible (99).

Walker et *al.* (100) ont évalué la résistance à la flexion du MTA en fonction du temps et de l'hydratation, simulant et comparant l'humidité tissulaire externe uniquement (humidité unilatérale) par rapport à l'humidité tissulaire en combinaison avec une pastille de coton humidifiée (humidité bilatérale), étudié à 24h et 72h.

La résistance à la flexion des échantillons « 24h d'humidité bilatérale » (14,27 MPa), était significativement plus élevée que les valeurs de résistance à la flexion associées aux autres conditions (24h unilatérale : 10,77 MPa ; 72h bilatérale : 11,16 MPa ; 72h unilatérale : 11,18 MPa), qui n'étaient pas significativement différentes les unes des autres. Cliniquement, ces résultats suggèrent qu'une pastille de coton humide devrait être placée sur la surface du MTA sous une restauration temporaire pendant 24h.

D'après Rajasekharan et *al.* (90), la résistance à la flexion de la biodentine est plus faible que MTA Angelus ou CEM, mais plus élevée que ProRoot MTA. Cette résistance est réduite par le contact avec la résine composite, impliquant qu'il est préférable d'attendre 2 semaines pour permettre la maturation suffisante avant de réaliser la restauration composite définitive.

iv. Résistance à la traction / au délogement

La résistance à la traction est une propriété importante pour les ciments d'obturation et dans la réparation de perforations radiculaires, car le mouvement de la dent au sein de son parodonte peut déloger le matériau (101).

La résistance au délogement de la Biodentine est supérieure au MTA, résultant à priori d'une plus petite taille de particules permettant d'améliorer la pénétration du ciment dans les tubules dentinaires. L'ancrage micromécanique est également dû en partie à une augmentation de la libération d'ions calcium et hydroxyle responsable de l'amélioration de la formation d'apatite à l'interface Biodentine-dentine (90).

b. pH

Le pH est une propriété physico-chimique fondamentale. En effet, toutes les études réalisées *in vivo* ou *in vitro* ont montré que le mécanisme de réparation pulpaire via la formation d'une barrière minéralisée, repose sur la libération d'ions calcium et la présence d'un pH alcalin à l'interface entre le biomatériau et le tissu pulpaire (voir chapitres IV.5.B.b et V.1.B).

Le pH d'un biomatériau et celui du milieu dans lequel il évolue sont des paramètres physico-chimiques interdépendants dont les mesures varient au cours du temps et de l'état inflammatoire du tissu hôte.

Le pH sera un critère de choix du biomatériau (voir Tableau II) puisqu'il déterminera ses propriétés biologiques, le potentiel de réparation du tissu hôte et son effet bioactif sur les tissus pulpaire et ostéo-cémentaire.

Les valeurs du pH des biocéramiques retrouvées dans la littérature répondent parfaitement à ce critère. La majorité des travaux rapporte une augmentation du pH au cours de la prise allant généralement de 10,3 à 12,4.

Le pH de la Biodentine (11,7 – 12,4) est supérieur aux autres biocéramiques testées par Wang, soit, dans l'ordre : MTA, iRoot SP, MTA Fillapex, MTA Plus, MTA Angelus et iRoot BP Plus (7,3 – 8,9).

Une étude menée par Candeiro et al. (102) montre que l'Endosequence BC Sealer® présente un pH et une libération d'ion Ca²⁺ significativement supérieurs à l'AH Plus.

	3 Hours	24 Hours	72 Hours	168 Hours	240 Hours
BC Sealer	10.31 ^a	10.87 ^a	10.94 ^a	11.21 ^a	11.16 ^a
AH Plus	7.81 ^b	7.53 ^b	7.42 ^b	7.60 ^b	7.17 ^b
Control	6.90	6.90	6.90	6.90	6.90

Tableau III : Evolution du pH au cours du temps selon Candeiro et al. (102)

Dans l'étude de Zhou et al. (58), les ciments MTA Fillapex et Endosequence BC présentait un pH alcalin en tout temps. Le pH des échantillons frais des sealants à

base de résine epoxy (AH Plus et ThermaSeal) était alcalin au début, mais a diminué de manière significative après 24 heures.

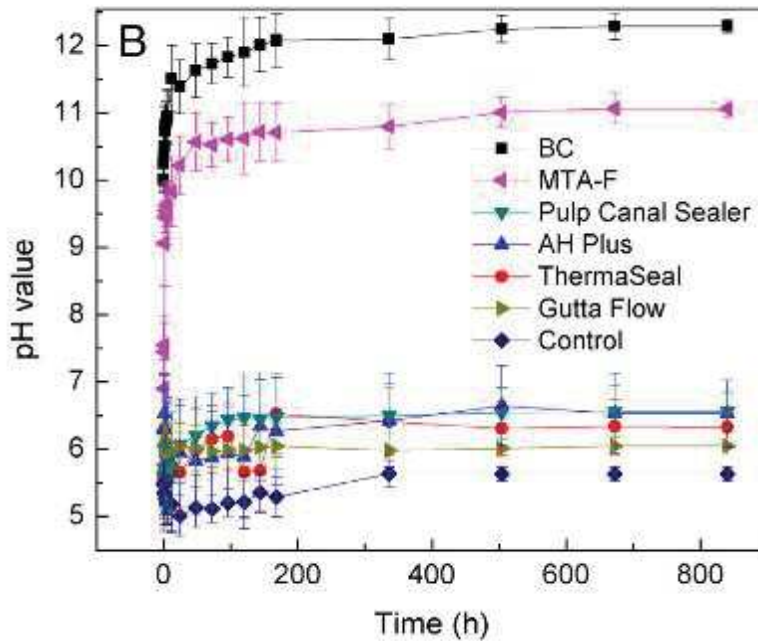


Figure 12 : Evolution du pH au cours du temps en fonction des matériaux selon Zhou et al. (93)

Siboni et *al.* (92) démontrent la supériorité du BioRoot RCS® dans la capacité prolongée d'alcalinisation ainsi que le relargage d'ions Ca^{2+} par rapport au MTA Fillapex. Les deux autres ciments non biocéramiques testés (AH Plus et Pulp Canal Sealer) ont des valeurs très considérablement inférieures.

Il est possible que l'activité antimicrobienne des ciments biocéramiques soit due à l'hydrophilie et à la diffusion d'hydroxyde de calcium, permettant la création d'un environnement basique.

Alkalinizing activity (pH) and Calcium released (ppm) in soaking water						
	3 h	1 day	3 days	7 days	14 days	28 days
pH						
BioRoot RCS	11.7 ± 0.2 ^{A a}	12.1 ± 0.1 ^{A a}	10.6 ± 0.9 ^{B a}	11.1 ± 0.9 ^{B a}	11.3 ± 0.9 ^{B a}	8.7 ± 0.9 ^{C a}
MTA Fillapex	9.5 ± 0.1 ^{A b}	9.5 ± 0.2 ^{A b}	9.1 ± 0.2 ^{A b}	9.2 ± 0.1 ^{A b}	7.7 ± 0.1 ^{B b}	8.4 ± 0.1 ^{C a}
AH Plus	7.6 ± 0.2 ^{A c}	7.3 ± 0.1 ^{A c}	7.4 ± 0.1 ^{A c}	7.3 ± 0.2 ^{A c}	7.1 ± 0.2 ^{A c}	7.1 ± 0.3 ^{A b}
Pulp Canal Sealer	6.0 ± 0.7 ^{A d}	6.1 ± 0.6 ^{A d}	6.2 ± 0.5 ^{A d}	6.6 ± 0.3 ^{B d}	7.0 ± 0.2 ^{BC c}	7.2 ± 0.3 ^{C b}
	0-3 h	3 h-1 day	1-3 days	3-7 days	7-14 days	14-28 days
Calcium released						
BioRoot RCS	721.4 ± 81.3 ^{A a}	177.2 ± 36.7 ^{B a}	87.0 ± 37.9 ^{C a}	90.3 ± 35.8 ^{C a}	94.5 ± 32.0 ^{C a}	40.4 ± 12.8 ^{C a}
MTA Fillapex	17.4 ± 3.1 ^{A b}	31.1 ± 3.4 ^{B b}	31.0 ± 3.7 ^{B b}	23.6 ± 4.0 ^{A b}	21.3 ± 2.2 ^{A b}	15.9 ± 3.2 ^{A b}
AH Plus	2.0 ± 0.7 ^{A c}	1.8 ± 0.8 ^{A c}	1.2 ± 0.7 ^{A c}	1.2 ± 1.3 ^{A c}	1.4 ± 1.14 ^{A c}	1.1 ± 0.7 ^{A c}
Pulp Canal Sealer	0.8 ± 0.1 ^{A c}	0.8 ± 0.1 ^{A c}	0.8 ± 0.5 ^{A c}	0.9 ± 0.5 ^{A c}	0.7 ± 0.2 ^{A c}	0.9 ± 0.2 ^{A c}

Tableau IV : Alcalinisation du milieu et libération d'ions Ca²⁺ selon les matériaux en fonction du temps (92).

c. Radio-opacité

La radio-opacité est une propriété essentielle qui permet la visualisation des matériaux d'obturation à l'examen radiographique, par leur résistance à la pénétration des rayons X, afin de vérifier notamment la qualité du traitement endodontique. Un ciment endocanalair doit être visible radiologiquement après une irradiation à travers une plaque d'aluminium d'au moins 3 mm d'épaisseur : la norme ISO 6876:2012 exige une radio-opacité minimum de 3.00mm Al.

À titre indicatif, la dentine présente une radio-opacité de 1.0 mm.

Concernant l'oxyde de zirconium et l'oxyde de tantale présents dans la composition des nouvelles biocéramiques, ils jouent tous deux un rôle de radio-opacifiants. Ces derniers ont été choisis pour leur bio-inertie afin de pallier à un autre grief imputé à l'oxyde de Bismuth du MTA : la coloration des tissus dentaires. Ainsi, la présence de ces radio-opacifiants bioinertes fait de ces nouvelles biocéramiques un matériau de choix pour les coiffages pulpaire en secteur esthétique (55,103).

L'étude de Candeiro et al. (102) montre que la valeur de la radio-opacité de l'Endosequence BC Sealer® est de 3.83mm Al grâce aux oxydes de zirconium et de tantale présents dans la composition, soit significativement inférieure à l'AH Plus (6,90mm Al), mais satisfaisant les exigences réglementaires.

Le BioRoot RCS® quant à lui affiche une radio-opacité de 5.2 mm Al (92).



Figure 13 : Radiographie d'une dent extraite obturée à gauche avec de l'iRoot SP®, et à droite du BioAggregate® (104)

En conclusion, bien que souvent moins radio-opaques que les ciments d'obturation classique, les ciments biocéramiques présentent une radio-opacité compatible avec leur utilisation en tant que ciment d'obturation grâce à la présence d'oxydes de zirconium et de tantale dans leur composition.

d. Mouillabilité

La mouillabilité est la capacité d'étalement d'une goutte sur une surface. Elle se mesure par l'angle de contact qui se forme entre une goutte d'eau stérile et un solide. Lorsque la mouillabilité est parfaite, l'angle de contact devient nul.

Zhang et al. (105) ont analysé l'angle de contact entre différents ciments endodontiques (tableau V).

L'angle de contact entre l'iRoot SP® et l'eau stérile est 7 à 18 fois plus faible que pour les autres ciments testés (non biocéramiques), démontrant la meilleure mouillabilité des biocéramiques.

Sealer	Fresh	1 Day	3 Days	7 Days
iRootSP	25	<5	<5	<5
Epiphany non-light-cured	50	40	35	35
EndoRez non-light-cured	50	40	37	37
AH Plus	66	80	83	83
Apexit Plus	75	80	80	83
Tubli Seal	45	80	80	83
Sealapex	80	90	88	75

Tableau V : Angle de contact de l'eau stérile avec différents ciments (105)

Ainsi, ces ciments ont une excellente mouillabilité qui participe à obtenir un scellement optimal. Cette propriété pourrait s'expliquer par leur hydrophilie ainsi que par la présence de particules très fines constituant le matériau (moins de 20 µm d'après les fabricants), participant au bon étalement du matériau et à une bonne pénétration dans les tubulis dentinaires (106).

e. Fluidité et Viscosité

La viscosité détermine la capacité d'un fluide à s'écouler. C'est une propriété essentielle pour nos ciments puisqu'elle déterminera la capacité de remplissage de l'espace canalaire, pour pénétrer dans les irrégularités et les canaux accessoires : Plus la fluidité est élevée, donc la viscosité est faible, meilleure est la capacité à pénétrer et remplir l'endodonte (107).

En revanche, un manque de viscosité entraînera un risque augmenté d'extrusion péri-apicale lors du placement du matériau, ce qui pourrait endommager les tissus parodontaux et compromettre la cicatrisation. Ainsi, une fluidité modérée est recherchée.

La fluidité est également influencée par la taille des particules : plus les particules sont petites, plus l'écoulement est important (108).

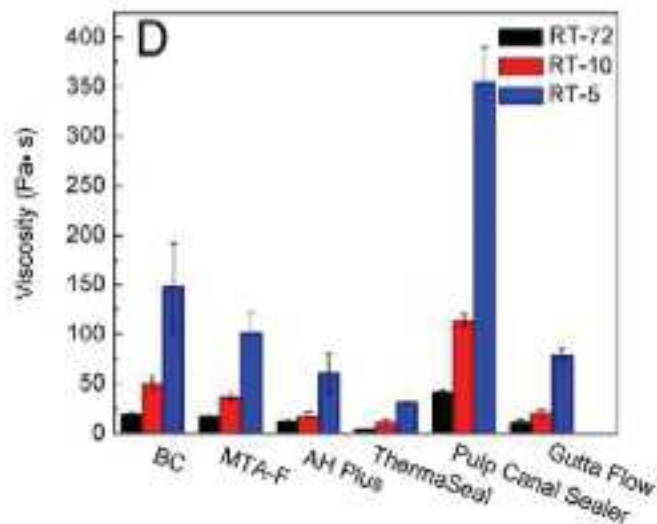


Figure 14 : Viscosité de différents ciments endodontiques (93).

Zhou et *al.* (93) ont étudié la viscosité de cinq ciments endodontiques en fonction de la rapidité d'injection. Il en ressort que les ciments endodontiques ont une capacité de déformation pseudoplastique avec un thixotropisme : leur viscosité diminue lorsqu'une force leur est appliquée. Dans cette étude, la viscosité des ciments biocéramiques est située entre l'AH plus® et le Pulp Canal Sealer®.

Cependant en endodontie, la norme ISO concerne l'épaisseur de film et non la viscosité.

f. Épaisseur de film

L'épaisseur de film est l'épaisseur de matériau présent entre deux plaques de verre. Elle permet de donner une meilleure idée de la viscosité d'un ciment de scellement.

Elle est recherchée la plus fine possible, afin d'avoir un ratio gutta-percha/ciment le plus fort possible (109).

Lors des tests, une goutte de ciment est placée entre deux plaques de verres et soumise à une charge. Le diamètre du disque de ciment ainsi obtenu est mesuré et comparé à la norme ISO (93).

Ces tests ont permis d'obtenir les résultats de plusieurs ciments :

- pour BC Sealer®, les valeurs vont de 23.1 à 26.96 mm (93,102) ;
- pour MTA Fillapex®, le résultat est de 22 mm (93) ;
- le Bioroot RCS® présente une fluidité légèrement inférieure avec un diamètre de 16 mm (110).

Cette épaisseur de film relativement faible et l'excellente mouillabilité pourrait permettre aux ciments biocéramiques de combler l'ensemble des irrégularités du système endodontique tels que les isthmes ou canaux latéraux, permettant ainsi un scellement tridimensionnel sans besoin d'utiliser une technique d'obturation à la gutta chaude.

Cependant, l'épaisseur de film n'est pas le facteur primordial pour les ciments biocéramiques qui sont considérés comme des matériaux d'obturation à part entière.

g. Porosité

La résistance mécanique des matériaux dépend en partie de leur faible niveau de porosité. Plus la porosité est faible, plus la résistance mécanique est élevée. La porosité d'un ciment est liée à la quantité d'eau ajoutée pour former une pâte, à l'emprisonnement de bulles d'air pendant le mélange et à la valeur du pH environnemental (111).

Il a été donc déterminé que le degré de solubilité et de porosité augmentait à mesure que le rapport eau - poudre augmentait, 0,33 grammes d'eau par gramme de ciment étant le rapport recommandé pour le MTA.

La porosité de la Biodentine est plus faible comparée au MTA et au Bioaggregate, impliquant donc une meilleure résistance mécanique (90).

D'après Siboni et *al.* (92), le BioRoot RCS est beaucoup plus poreux que le MTA Fillapex, lui-même beaucoup plus poreux que les autres ciments non biocéramiques testés (AH Plus et Pulp Canal Sealer). Ceci s'explique par leur solubilité et capacité à relarguer des ions OH⁻ et Ca²⁺ (voir ci-dessous)

	Apparent porosity (%)	Water sorption (%)	Solubility (%)
Setting + 50% 37 °C 99% RH before test			
BioRoot RCS	53.9 ± 4.8 ^a	43.5 ± 3.8 ^a	37.6 ± 3.2 ^a
MTA Fillapex	21.4 ± 2.3 ^b	13.3 ± 0.9 ^b	13.6 ± 1.2 ^b
AH Plus	3.4 ± 0.9 ^c	1.3 ± 0.7 ^c	1.2 ± 0.3 ^c
Pulp Canal Sealer	8.8 ± 1.6 ^d	3.5 ± 0.8 ^d	2.6 ± 0.5 ^c
7 days at 37 °C 99% RH before test			
BioRoot RCS	51.6 ± 1.4 ^a	36.1 ± 2.2 ^a	14.2 ± 2.0 ^b
MTA Fillapex	19.3 ± 2.2 ^b	12.1 ± 1.5 ^b	11.1 ± 1.3 ^d
AH Plus	2.8 ± 0.7 ^c	1.4 ± 0.4 ^c	0.8 ± 0.3 ^c
Pulp Canal Sealer	8.4 ± 1.4 ^d	3.3 ± 0.6 ^d	2.1 ± 0.3 ^c

Tableau VI : Porosité, absorption d'eau et solubilité de différents ciments à 24h d'immersion (92).

h. Solubilité

La solubilité désigne la réaction d'une espèce chimique vis à vis d'un solvant, et ainsi la perte de volume lors de son immersion dans l'eau. La faible solubilité est une caractéristique recherchée pour les matériaux d'obturation canalair. Il s'agit d'une propriété importante pour les ciments car une solubilité trop importante entrainera des espaces dans l'obturation et donc une perte d'étanchéité permettant une réinfiltration bactérienne. Pour qu'elle soit satisfaisante, la perte de matière ne doit pas excéder les 3% de la masse totale après 24h d'immersion (92).

La solubilité de la Biodentine est identique au MTA jusqu'à 10 jours, puis supérieure, s'expliquant par la dissolution plus élevée des ions calcium et silicium. La libération

d'ions calcium est plus élevée principalement à court terme et avec un pH peu acide. Elle pourrait être attribuée à la présence de silicate de tricalcium pur, de chlorure de calcium, d'une formation accrue d'hydroxyde de calcium et d'une solubilité élevée (90).

Siboni et *al.* (92) ont observé une solubilité et une absorption d'eau importantes pour le BioRoot RCS®, et dans une moindre mesure pour le MTA Fillapex. Les ciments biocéramiques possèdent des solubilités plus élevées que les autres ciments de scellement canalaire. Cette solubilité est expliquée par leur hydrophilie, tandis que Pulp Canal Sealer® et l'AH plus® sont hydrophobes. D'autre part, les biocéramiques ont une grande capacité à relarguer des ions OH⁻ et Ca²⁺, ce qui induirait des changements de l'état de surface créant des porosités).

Pour ce matériau, l'hydratation continue après le temps de prise final. Cela permet un relargage d'ions et une nucléation du calcium-phosphate, formant une couche superficielle qui remplit les vides. Ce phénomène serait responsable de la bioactivité des ciments silicates de calcium.

Le MTA Fillapex®, l'Endosequence BC Sealer® et le Bioroot RCS® ont une solubilité satisfaisante selon la norme ISO 6876: 2012, bien qu'ils présentent des valeurs nettement supérieures aux ciments à base d'oxyde de zinc – eugénol.

Le MTA Fillapex affiche une valeur inférieure à L'Endosequence BC Sealer, lui-même moins soluble que le Bioroot RCS.

L'iRoot SP présente une solubilité équivalente à AH Plus ou Sealapex (93,112,113).

i. Étanchéité

L'étanchéité est un critère essentiel en endodontie, puisque les micro-infiltrations s'avèrent être la principale cause des échecs thérapeutiques endodontiques lors des procédures de maintien de la vitalité pulpaire, selon une étude réalisée en 1987 *in vivo* chez le singe par Cox et *al.* (114).

Après la réalisation de l'effraction pulpaire et la mise en place de différents matériaux coronaires (amalgame, résines composites ou ciments au phosphate de zinc) au contact direct des cornes pulpaires lésées, les dents ont été réparties en deux groupes, en réalisant une analyse histologique à 7 et 21 jours :

- groupe 1 : le matériau d'obturation coronaire est recouvert d'un ciment à base d'oxyde de zinc eugénol étanche aux bactéries,

Toutes les dents ont présenté une guérison pulpaire et la formation d'un pont dentinaire à 21 jours.

- groupe 2 : les obturations ne sont pas recouvertes par cette couche de ciment ZOE étanche.

Une infiltration bactérienne avait eu lieu avec pour conséquences soit des nécroses, soit une inflammation pulpaire sévère en regard des matériaux de coiffage.

Cette étude pré-clinique sur modèle animal montre qu'outre la biocompatibilité du matériau utilisé, le critère de choix d'un biomatériau est son étanchéité face aux agents bactériens.

Plusieurs études évaluant l'étanchéité des nouvelles biocéramiques dans le cadre des obturations à rétro en chirurgie endodontique s'accordent sur la très bonne étanchéité commune à tous ces matériaux :

Wu et *al.* (77) ont comparé sur une centaine de racines l'étanchéité à long terme du joint en fonction du matériau. Au cours des 3 premiers mois, le pourcentage de fuite brute a sensiblement augmenté pour l'amalgame (de 20 à 100%) et le Super-EBA (de 0 à 55%), alors qu'il a diminué sensiblement pour le MTA (de 55% à 0%). Par la suite, l'augmentation des fuites d'amalgame et de Super-EBA a diminué avec le temps, tandis que l'étanchéité du MTA a été maintenue jusqu'à la fin de l'expérience (12 mois).

Asgary et *al.* (115) ont observé la fuite d'un colorant pendant 24h sur 66 dents obturées par du MTA, du CEM ou de l'IRM. Cette étude concluait en une nette supériorité des biocéramiques sur l'IRM, et une étanchéité légèrement meilleure de la CEM sur le MTA.

Shokouhinejad et *al.* (116) ont montré une étanchéité de l'Endosequence RRM Putty comparable à celle du MTA au microscope électronique à balayage.

L'étude de Leal et De-Deus de 2011 (117) présente globalement les mêmes résultats dans le cadre d'un test d'étanchéité au glucose, montrant qu'il n'existait aucune différence significative entre le MTA et le iRoot BP Plus.

Enfin, Shi et al. (118) ont comparé le MTA et l'iRoot FS sur un test d'étanchéité par diffusion de colorants, présentant aussi une absence de différence significative entre ces deux matériaux.

Dans l'obturation radiculaire orthograde, un des objectifs est d'emmurer les bactéries dans les tubulis dentinaires afin d'éviter toute percolation qui se traduirait par une récurrence.

Zhang et al. (119) ont étudié l'obturation du tiers apical selon trois types d'obturation (20 dents par groupe) :

- iRoot SP et condensation à ondes continues,
- iRootSP et obturation monocône,
- AH Plus et condensation à ondes continues.

Ils n'ont trouvé aucune différence significative de fuite tissulaire, ni entre les groupes, ni en fonction du temps. Ainsi, la technique monocône avec l'iRoot SP® présente une étanchéité comparable avec les techniques de Schilder.

Ces résultats sont corroborés par Ersahan et al. (113) qui ont obtenu des valeurs équivalentes entre les deux ciments de scellement.

Materials	Minimum ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Maximum ($\mu\text{l}/\text{min}$)	Interquartile range (IQR)
iRoot SP	0.18	0.80	0.43 (0.38)
Sealapex	1.25	2.75	1.88 (0.69)
EndoREZ	0.93	1.88	1.21 (0.61)
AH Plus	0.10	0.93	0.35 (0.47)

Tableau VII : L'étanchéité apicale selon différents ciments (113)



Figure 15 : Image au microscope polarisant de l'interface dentine (D) - ciment (S) iRoot SP® : aucun vide n'est décelé, le lien chimique formé entre la dentine et le ciment est visible (104)

Il ressort de ces études que les ciments biocéramiques présentent une des meilleures capacités de scellement parmi les ciments d'obturation endodontique et qu'ils sont convenables pour la technique monocône avec une étanchéité comparable aux meilleures techniques.

Concernant l'obturation coronaire, l'étanchéité du joint de la Biodentine est globalement semblable aux MTA.

Une meilleure adhérence à la dentine peut résulter du processus physique de croissance cristalline dans les tubules dentinaires conduisant à une liaison micromécanique. La biodentine et le ProRoot MTA ne présentent pas de différence dans leur capacité à combler les lacunes entre dentine et ciment par dépôt de phosphate de calcium (épaisseur de la zone de transition d'environ 7 μm).

En présence de liquide corporel, la Biodentine a démontré la présence d'une formation de couche interfaciale sur la dentine du canal radiculaire, dont l'épaisseur était cependant inférieure à celle du ProRoot MTA. De plus, la contamination du sang

n'affecte pas l'adaptation marginale de la Biodentine, du Bioaggregate, du MTA et du CEM (90).

j. Expansion de prise

Le problème de nombreux matériaux d'obturation est la rétraction de prise, qui est la perte de volume du matériau suite à son changement d'état. La réaction de prise des biocéramiques n'entraîne pas de rétraction de prise, voire plutôt une légère dilatation, ce qui assure une étanchéité maximale au niveau des joints ciment/dentine et ciment/gutta-percha. Cette propriété est probablement due à l'absence de monomères dans les ciments silicate de calcium (93,120). Ils possèdent une expansion de prise minimale (0.1%), qui est dans les normes ISO, due à l'absorption d'eau par le ciment. Elle permet une meilleure obturation tridimensionnelle et un meilleur scellement (113).

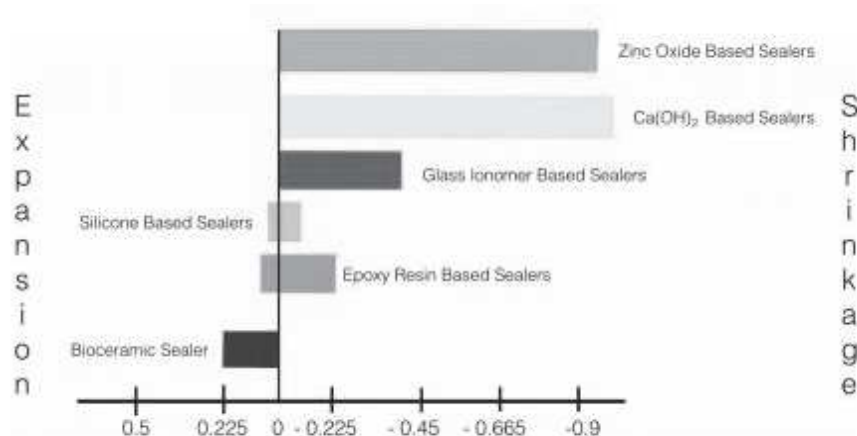


Figure 16 : Expansion ou rétraction de prise des ciments d'obturations (120)

k. Coloration

Il semblerait que tous les matériaux à base de silicate de calcium présentent des risques de dyschromie.

Globalement, le MTA présente un fort potentiel de coloration, le ProRoot MTA présentant une décoloration significativement plus élevée que le MTA Angelus ou l'Ortho MTA. En raison de l'absence d'oxyde de bismuth ou d'autres métaux lourds, les nouveaux ciments biocéramiques ont peu de capacité dyschromiante comparativement au MTA. Ils conservent une capacité dyschromiante, significativement augmentée en présence de sang et d'hypochlorite de sodium (121–124).

Mozyńska *et al.* (124) ont réalisé une revue systématique sur les dyschromies induites par les biocéramiques. Les biocéramiques présentant le plus fort potentiel de décoloration sont le MTA Angelus gris et blanc, le ProRoot MTA gris et blanc et l'Ortho MTA.

En revanche, la Biodentine, le Retro MTA, l'EndoSequence RMM, l'Odontocem, MM-MTA et MTA Ledermix possèdent le plus petit potentiel de coloration.

I. Force d'adhésion

Shokouhinejad *et al.* (125) ont montré que l'iRoot SP® avait une valeur d'adhésion à la dentine radiculaire équivalente à l'AH plus®, et ce indépendamment de l'élimination ou non de la smear-layer.

D'après Ersahan *et al.* (126), l'adhérence d'EndoSequence Sealer® est similaire au AH Plus®, et supérieure à l'EndoREZ® et au Sealapex®.

D'autre part, le placement antérieur d'hydroxyde de calcium semble améliorer l'adhérence d'iRoot SP, mais n'affecte pas AH Plus et MTA Fillapex (127).

Il a également été démontré que l'utilisation d'iRoot SP® n'avait pas d'impact négatif sur la force de collage des tenons fibrés (128).

Enfin, il est important de noter que le rapport poudre/eau et le temps influent significativement sur les propriétés de forces de liaison du MTA. Un rapport 2 :1 à 96h présentera une force de liaison considérablement plus faible qu'un rapport 4 :1 à 28 jours (129).

m. Résistance à la fracture

L'une des causes d'échecs des traitements endodontiques est la fracture verticale. Une dent traitée endodontiquement est souvent délabrée. La mise en forme (et la conicité augmentée) et les irrigants canaux réduisent la résistance mécanique de la dent (130).

Selon l'étude de Sagsen et *al.* (131) sur 55 incisives centrales maxillaires, ainsi que celle de Topçuoğlu et *al.* (132) sur 75 prémolaires mandibulaires, l'obturation avec AH Plus, iRoot SP, MTA Fillapex et Endosequence BC sealer augmente la résistance à la fracture radiculaire par rapport aux dents instrumentées mais non obturées, sans différence significative entre eux.

En revanche, Tech Biosealer Endo ne semble pas améliorer la résistance à la fracture des dents obturées.

Ghoneim et *al.* (67) ont montré que l'utilisation d'un cône de gutta traité avec un revêtement biocéramique lors d'une obturation à l'iRoot SP® augmente la résistance mécanique des dents dévitalisées. Cette résistance est augmentée dans le cas de racine immature également (Tableau VIII).

Groups	Mean force (n)	SD
Group 1: iRoot SP sealer + ActiV GP cones	372.0 ^a	62.9
Group 2: iRoot SP sealer + GP cones	305.2 ^c	47.2
Group 3: ActiV GP sealer + ActiV GP cones	346.0 ^b	95.7
Group 4: ActiV GP sealer + GP cones	288.3 ^d	30.5
Negative control	381.4 ^a	53.2

Tableau VIII : Résistance à la fracture des dents obturées par différentes techniques (67).

Ulusoy et *al.* (133) ont montré que l'iRoot SP® augmente la résistance à la fracture des racines immatures, avec une différence statistiquement significative par rapport à l'AH plus® et l'EndoRez®.

n. Temps de travail / temps de prise

Pour les ciments d'obturation, il est nécessaire d'avoir un temps de travail suffisamment long afin de permettre la mise en place du matériau après homogénéisation, voire de permettre la ré-intervention après la radiographie de contrôle si nécessaire.

Le temps de prise est la durée pendant laquelle un matériau doit passer d'un état fluide à un état solide. Un temps de prise court améliore l'étanchéité entre le système canalaire et le parodonte.

Les fabricants du BioRoot RCS indiquent un temps de travail de 12 minutes. Le temps de prise final est de 5h environ, tandis que les fabricants indiquent 4h (134,92).

Après homogénéisation, les ciments iRoot SP et MTA Fillapex prennent en 24 heures (135).

Le temps de travail est supérieur à 24h pour l'endosequence BC sealer®. Ce temps de travail long est expliqué par le fait que l'endosequence BC sealer® ne prend qu'en présence d'humidité. Plus il y a d'eau, plus le temps de prise diminue pour atteindre 168 heures au minimum. (93,136,137)

Certains établissent qu'Endosequence BC Sealer®, MTA Fillapex® et Bioroot RCS® réalisent leur prise en milieu humide respectivement en 2,5, 2,7 heures et 27,4min (93,110).

Cette propriété des ciments silicate de calcium est intéressante puisqu'elle permet un conditionnement long des ciments, mais surtout il n'est plus strictement nécessaire d'avoir un canal totalement asséché pour l'obturation.

En raison de ce temps de prise relativement long, il sera donc déconseillé de forer avant la prise du ciment, soit entre quelques heures et un jour.

Concernant les biocéramiques d'obturation occlusale, on cherchera un temps de travail suffisant, mais un temps de prise aussi court que possible.

La Biodentine est constituée principalement de silicate tricalcique, ce qui peut expliquer une taille de particules plus homogène. Le temps de prise court par rapport

à tous les autres matériaux s'explique par l'absence de silicate dicalcique, qui est associé à une réaction d'hydratation plus lente.

Le temps de prise varie entre 6 et 30 min selon les études, avec une prise finale en 85 min. Ce temps est influencé par la contamination de sang (+ 1 à 16 min), mais pas par la salive (90).

Il est intéressant de noter que la réduction de la tailles des particules n'influe pas sur la cicatrisation péri-apicale mais sur le temps de prise (138).

B. Propriétés biologiques

a. Biocompatibilité / cytotoxicité

Pour rappel, la biocompatibilité implique une réaction appropriée de l'hôte, qui doit être non toxique, non immunogénique et non carcinogénique (41).

Les matériaux endodontiques étant placés au contact direct des tissus pulpaire et parodontaux, leur innocuité face aux tissus hôtes est un critère du cahier des charges de Grossman essentiel à respecter.

Que ce soit pour le coiffage pulpaire, la réparation d'une perforation ou l'obturation endodontique, la cytotoxicité du matériau utilisé peut influencer la viabilité des cellules (pulpaire ou parodontales) et provoquer la mort cellulaire par apoptose ou nécrose.

Pour favoriser la cicatrisation et la restauration de la fonction de la dent, les matériaux dentaires doivent soit stimuler la réparation, soit être biologiquement neutres. Par conséquent, il est important d'éviter les matériaux dentaires qui sont toxiques pour les tissus pulpaire et périapicaux qui pourraient compromettre les résultats cliniques (139).

Pendant de nombreuses années, voire des décennies, les praticiens ont cru que certains matériaux de restauration « tuaient » les pulpes en raison de leurs propriétés toxiques inhérentes. Cependant, la recherche depuis le milieu des années 1970 a montré que la pulpe présente une tolérance à une variété de matériaux de restauration si les bactéries et leurs toxines sont exclues du tissu pulpaire (140). Ceci dépendra du

matériau impliqué, et d'un contact direct avec le tissu pulpaire ou de la présence d'une couche intermédiaire de dentine protectrice. Une fois que l'invasion bactérienne atteint le parenchyme pulpaire, des réactions tissulaires inflammatoires se mettent en place. Par conséquent, l'un des principes cruciaux est que la clé de la survie de la pulpe après coiffage est une restauration bien scellée (141).

Il faut garder à l'esprit que la pulpe est un tissu mou qui réagira à un stimulus nocif avec une réponse inflammatoire. Il existe un certain nombre de séquelles liées aux matériaux, notamment la cytotoxicité, l'immunosuppression ou encore l'élévation de la température intrapulpaire (pour des matériaux photopolymérisables) à des niveaux incompatibles avec la survie des cellules pulpaires. De multiples études portant sur le coiffage pulpaire ont démontré que l'inflammation de la pulpe peut être indépendante de la présence bactérienne, renforçant le concept selon lequel certains matériaux appliqués directement sur le tissu pulpaire peuvent provoquer une réponse inflammatoire significative. L'hôte a cependant la capacité de tolérer une légère inflammation. Ainsi, si une toxicité légère peut être neutralisée par l'organisme, il n'y a aucun impact sur les résultats du traitement (142).

Différentes méthodes permettent de tester la biocompatibilité *in vivo* ou *in vitro* d'un biomatériau. La majorité des études rencontrées au cours de ce travail compare l'effet non cytotoxique de ces matériaux sur des cellules ostéoblastiques ou sur des cellules pulpaires de types fibroblastes ou odontoblastes.

Le principal test employé dans la littérature pour étudier la biocompatibilité des biocéramiques *in vitro* est le test MTT. Il s'agit d'une méthode rapide de numération et d'évaluation de la prolifération cellulaire, qui est évaluée par un test colorimétrique utilisant pour réactif le sel jaune de méthyl-thiazol-tétrazolium.

Concernant les tests *in vivo*, les tests rencontrés étaient réalisés sur modèle animal, ou bien chez l'homme sur des dents destinées à être extraites pour des raisons orthodontiques. Une analyse histologique de l'interface tissu hôte/biomatériau est ensuite réalisée.

La cytotoxicité du MTA a été étudiée dans de nombreuses études *in vitro*. Comme il existe une littérature encore parfois limitée pour ce qui concerne la biocompatibilité d'autres matériaux, la biocompatibilité est souvent évaluée par rapport au MTA.

Le MTA est biocompatible lorsqu'il est testé sur des fibroblastes desmodontaux humains pour la viabilité cellulaire, l'apoptose et l'activité de la déshydrogénase mitochondriale. (51,143)

Deux études (58,144) basées sur des essais MTT, réalisés respectivement sur des fibroblastes dermiques et des fibroblastes gingivaux, ont comparé l'effet cytotoxique de l'EndoSequence RRM Putty et Paste avec du MTA (ProRoot et MTA-Angelus). Les résultats ont montré une absence de différence significative entre ces nouvelles biocéramiques et celle mise au point par Torabinedjad.

Samyukhta et coll. (145) ont comparé la biocompatibilité sur une culture de fibroblastes desmodontaux du MTA, de l'Endosequence, de la Biodentine et d'un groupe contrôle, obtenant ces résultats :

- Le MTA a présenté une meilleure viabilité cellulaire à 24h. En revanche, les matériaux ne présentaient aucune différence significative entre eux à 48 heures.
- Il y avait une différence statistiquement significative entre le groupe témoin et les matériaux : le groupe témoin a montré une viabilité cellulaire supérieure à tous les groupes expérimentaux à la fois à 24 heures et à 48 heures.
- Il y a une viabilité cellulaire meilleure pour tous les groupes à 24 heures qu'à 48 heures.

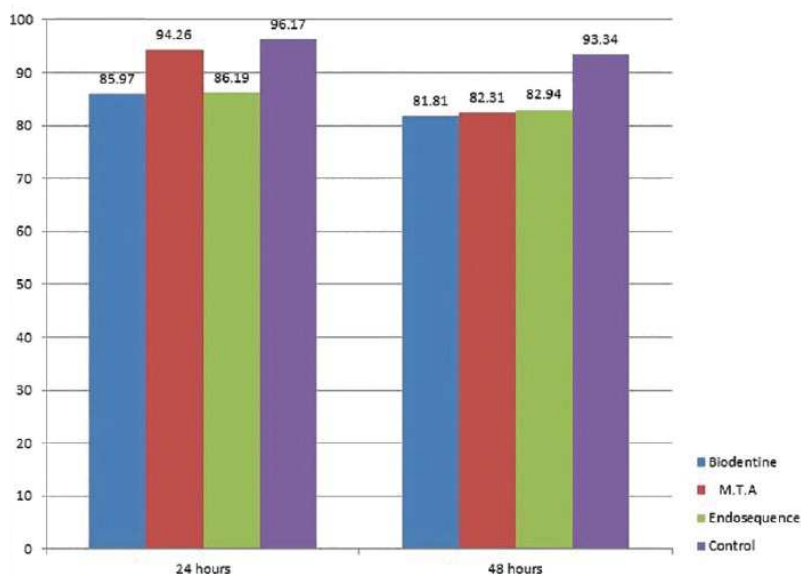


Figure 17 : Comparaison du pourcentage de viabilité cellulaire à 24h et 48h d'exposition aux principales biocéramiques(145)

L'Endosequence RRM paste ou putty affiche une biocompatibilité similaire au MTA (144,146), tout comme l'iRoot BP Plus (147), la Biodentine (148), et Bioaggregate presque autant (149).

Le nouveau ciment résineux (NRC, une association entre liquide résineux et poudre biocéramique) a été défini comme favorable pour une obturation apicale, mais montre une réaction inflammatoire modérément plus élevée que le MTA (150,151).

Michel et al. (152) ont comparé *in vitro* les effets de quatre ciments biocéramiques (ProRoot MTA, Harvard MTA, Biodentine, EndoSequence RRM putty), d'un CVIMAR (GC Fuji II LC) et d'un Ciment Verre Carbomère (GCP Glass Fill) sur les fibroblastes gingivaux et les ostéoblastes alvéolaires.

Par rapport au témoin (100%), la viabilité selon les biocéramiques, le CVIMAR ou le CVC, était respectivement de :

- 71-81%, 64% et 59-64% pour les fibroblastes gingivaux
- 80-82%, 56% et 67-68% pour les ostéoblastes alvéolaires

Les cellules exposées aux biocéramiques pendant 24 h sont restées viables et ont même augmenté en nombre. Le CVC a continué de diminuer la viabilité et l'adhésion des cellules, tandis que les biocéramiques et le CVIMAR ont permis l'adhésion et la prolifération des fibroblastes et des ostéoblastes.

La cytotoxicité sur les cellules souches de la papille apicale (SCAP) est de l'ordre de CEM > Biodentine > ProRoot MTA à 24h, puis dans l'ordre ProRoot MTA > Biodentine > CEM à 48h et 72h (153).

En comparaison avec ProRoot MTA, la Biodentine a démontré des résultats significativement meilleurs en ce qui concerne la survie cellulaire et la prolifération des cellules desmodontale. La présence d'un radio-opacifiant moins toxique (oxyde de zirconium) dans la Biodentine pourrait être responsable de ces résultats (154,155)

Corral Nunez et al. (156) et Silva et al. (157) ont cependant montré des effets similaires de Biodentine et ProRoot MTA en termes de niveaux de cytotoxicité et d'expression des cytokines (interleukine-1 α et interleukine-6) dans des cellules de fibroblastes embryonnaires de souris.

Dans d'autres études portant sur des odontoblastes de souris, à 24h et 48h, Biodentine, MTA Angelus et ProRoot MTA n'ont montré aucune différence significative

dans la cytocompatibilité. Mais à 72 h, la Biodentine a démontré une cytocompatibilité significativement plus élevée que MTA Angelus (158–160).

D'après Jung et *al.* (154) observant leur interaction avec les ostéoblastes et les cellules desmodontales, il n'y a pas de différence significative entre ProRoot MTA et Biodentine en ce qui concerne la survie, la prolifération et la fixation cellulaire.

Le but d'une obturation radiculaire est d'établir une étanchéité entre l'espace canalaire et les tissus périradicaux. Au fur et à mesure que les matériaux d'obturation radiculaire entrent en contact avec les tissus périradicaux, la connaissance de la réponse tissulaire est cruciale.

Il est nécessaire qu'un ciment endodontique soit toléré par les tissus, non irritant et si possible ostéo-cémento inducteur. Le but recherché est que le ciment ne provoque pas de retard de cicatrisation s'il est extrudé dans les tissus péri-apicaux et si possible qu'il soit propice à la cicatrisation ad integrum avec formation d'un néo-ligament parodontal couplée à la cicatrisation osseuse. (38)

Zoufan et *al.* (136) ont comparé la cytotoxicité de l'Endosequence BC sealer avec d'autres ciments (AH plus, Tubli-Seal et GuttaFlow). Que ce soit avant ou après la prise du ciment, BC sealer et Gutta Flow ont montré moins de cytotoxicité qu'AH Plus et Tubli Seal.

Zhang et *al.* (161) prouvent également une biocompatibilité supérieure sur des fibroblastes du ProRoot MTA et de l'iRoot SP par rapport à l'AH Plus (voir figure 18). AH Plus était significativement plus toxique (dans les deux états) sur des fibroblastes qu'iRoot SP, qui était modérément toxique à l'état frais et non toxique à l'état figé (après 24h), tandis que ProRoot MTA était non toxique dans les deux états.

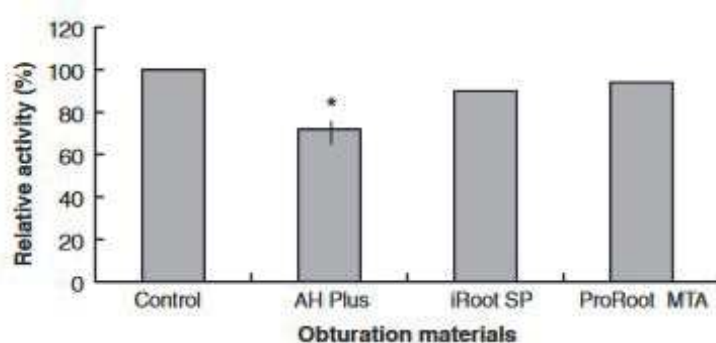


Figure 18: Cytocompatibilité à 24h de l'iRoot SP, ProRoot MTA et AH plus (significativement plus cytotoxique) (161)

Zhang et al. (162) ont également comparé la cytotoxicité sur des ostéoblastes de l'iRoot SP avec l'AH Plus. Le test MTT a été réalisé, révélant une absence de toxicité de l'iRoot SP, tandis que les extraits d'AH Plus étaient classés comme légèrement cytotoxiques.

Une étude de Güven et al. (163) établit une meilleure biocompatibilité de l'iRoot SP® sur le MTA Fillapex.

De plus, ces ciments réduisent la réaction inflammatoire, ne provoqueraient pas ou peu de douleurs post-opératoires et pourraient avoir une action bénéfique sur les nocicepteurs (164–166).

D'après Siboni et al. (92), la biocompatibilité des ciments biocéramiques pourrait être due aux similitudes de composition entre les tissus dentaires et les ciments (silicate de calcium, phosphate de calcium, hydroxyde de calcium et oxyde de zirconium)

b. Bioactivité

L'analyse de la littérature a permis de montrer que l'effet bioactif des biocéramiques était étroitement lié à ses propriétés physicochimiques, mais surtout biologiques.

Le potentiel réparateur de ces nouveaux biomatériaux est caractérisé par la basicité de leur pH, par leur pouvoir de biominéralisation, la libération d'ions calciums, mais aussi par leur pouvoir de différenciation et prolifération cellulaire.

Les silicates di- et tri-calciques ainsi que le phosphate de calcium sont les principaux éléments à l'origine des propriétés bioactives des biocéramiques.

Rappelons que la préparation des biocéramiques se fait par une poudre contenant de fines particules hydrophiles (principalement silicates di- et tri-calciques ainsi que phosphate de calcium) qui durcissent lorsqu'elles entrent en contact avec une solution à base d'eau.

Pendant et après le mélange avec son liquide (puis avec le fluide contenu dans les tubuli dentinaires), des réactions d'hydratation ont lieu, formant de l'hydroxyde de calcium ainsi que des cristaux d'hydroxyapatite.

L'hydroxyde de calcium produit se dissocie en ions calcium et hydroxyle, augmentant le pH et la concentration en calcium, responsable des propriétés biologiques de ces ciments. Cet hydroxyde de calcium participera à la prolifération des cellules pulpaires et stimulera la formation de dentine réparatrice.

Le ciment libère du calcium ainsi que des ions phosphore, ce qui conduit à la formation d'hydroxyapatite à l'interface biocéramiques - tissus hôtes, entraînant une biominéralisation, sous forme de pont minéralisé dans une thérapeutique pulpaire ou d'une ostéoinduction dans le cadre d'une guérison périapicale. Il fournit également une étanchéité supplémentaire à l'interface du matériau et des parois de la cavité (167,168).

i. Biominéralisation

La biominéralisation est un élément clé de l'effet bioactif d'un matériau. Il s'agit de la capacité d'un matériau à induire une minéralisation d'un tissu hôte à son interface avec le biomatériau.

Ce processus biochimique résulte de l'élévation locale du pH, de la libération d'ions calcium et de la formation d'une néo-barrière minéralisée formée de cristaux d'hydroxyapatite. On retrouve dans la littérature l'expression d' « apatite forming ability », ou « capacité à former de l'hydroxyapatite ».

Le procédé chimique de la biominéralisation s'explique ainsi (169–171) :

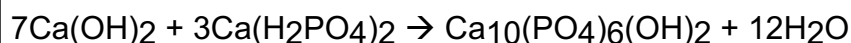
L'hydratation des silicates de calcium par l'eau présente dans les tubuli dentinaires, avec un pH supérieur à 12, produit un gel de silicate de calcium et de l'hydroxyde de calcium.

Hydratation



L'hydroxyde de calcium réagit ensuite avec les ions phosphates pour former de l'hydroxyapatite et de l'eau.

Précipitation



L'eau continue son interaction avec les silicates de calcium pour aboutir à la production de silicates de calcium hydratés, etc etc... L'eau va donc être un facteur déterminant du temps de prise et du taux d'hydratation.

Par conséquent, on peut supposer que des rapports eau-poudre plus élevés pourraient être bénéfiques. Cependant, la quantité excessive d'eau incorporée dans le mélange ne doit pas conduire à une résistance mécanique trop faible.

Dans les procédures de maintien de la vitalité pulpaire, la formation de cristaux d'hydroxyapatite issue de la réaction de prise des biocéramiques est matérialisée par la formation d'un « pont dentinaire ». Cette nouvelle barrière minéralisée contribue ainsi à combler la zone de nécrose des odontoblastes en rapport avec l'exposition pulpaire, tout en isolant le système endodontique des bactéries et de leurs toxines présentes dans le milieu buccal.

Dans les situations de communications entre l'endodonte et le parodonte, la biominéralisation est caractérisée par une néo-cémentogenèse et/ou d'une ostéoinduction dans le cadre d'une guérison périapicale.

Il faut savoir que, lorsqu'elle est mise en contact avec un tissu minéralisé, l'hydroxyapatite a un effet ostéoinducteur, conduisant à la formation osseuse à l'interface (172).

Ainsi, à l'interface ciment biocéramique – dentine, l'amélioration de la qualité de ce joint participe également à l'étanchéité de l'obturation, car les cristaux d'hydroxyapatite formés vont assurer une liaison chimique et micromécanique avec les parois canalaires. La précipitation initiale des phosphates de calcium amorphes précède la formation d'apatite, qui est spontanément déposée dans les fibrilles de collagène, favorisant un processus de biominéralisation conduisant à la formation d'une couche interfaciale avec des structures en tags à l'interface ciment-dentine (173).

Shababhang et al. (174) ont comparé l'efficacité de la protéine ostéogénique OP-1 et du MTA avec celle de l'hydroxyde de calcium dans la formation de tissus durs dans les racines immatures des chiens. Ils ont conclu que la qualité du tissu dur apical formé avec le MTA était significativement supérieure. Concernant la quantité de tissu dur formé entre les trois matériaux, il n'y avait pas de différence statistiquement significative.

Azimi et al. (175) ont évalué *in vivo* la réaction pulpaire (inflammation et formation de ponts minéralisés) après pulpotomie partielle à l'iRoot BP ou au ProRoot MTA, sur 24 prémolaires humaines saines destinées à l'extraction pour raisons orthodontiques.

L'analyse histologique de l'état inflammatoire pulpaire et de la qualité des ponts dentinaires a été réalisée 6 semaines après traitement. Les résultats obtenus ont révélé une absence de nécrose, la formation d'un pont dentinaire d'une excellente qualité ainsi qu'une organisation cellulaire observée sur toutes les dents de l'étude, sans différence significative entre les deux matériaux. Cependant, la sensibilité clinique au froid était significativement moindre pour les dents traitées au MTA. Cette étude *in vivo* met ainsi en évidence un réel effet bioactif des biocéramiques sur les cellules pulpaires.

On peut encore citer l'étude *in vitro* de Shokouhinejad et al. (176), analysant précisément la biominéralisation par microscopie optique à balayage associée à une spectroscopie par énergie dispersive.

60 sections radiculaires horizontales, avec des espaces canaux normalisés, ont été obturées par de l'ERRM Putty, du Bioaggregate et du ProRoot MTA, et immergées dans une solution saline tamponnée au phosphate pendant 1 semaine ou 2 mois. L'analyse portait donc sur 6 groupes de 10 dents, obturées par un des trois matériaux, à 1 semaine ou 2 mois.

L'analyse des résultats a montré une augmentation de l'activité de biominéralisation à tous les temps de l'étude, pour chacun des trois matériaux. Après 2 mois, la surface des ciments a été radicalement modifiée et consistait en une quantité sensiblement plus importante de cristaux d'apatite. On observait des pics élevés de Ca, Si et O après 1 semaine d'immersion, et des pics élevés de Ca, P et O après 2 mois.

L'analyse des échantillons a révélé diverses morphologies de surface qui étaient fonction du biomatériau et du temps d'immersion, mais avec une répartition homogène progressive de ces derniers sur la surface radiculaire. L'effet bioactif de ces matériaux n'est donc plus à remettre en question.

ii. Prolifération et différenciation des cellules pulpaires

Les expositions pulpaires d'origine traumatique ou bactérienne sont à l'origine d'une destruction de la couche odontoblastique en regard de la zone lésée.

L'objectif clinique principal réside donc dans l'utilisation d'un biomatériau induisant une migration, une différenciation puis une prolifération des cellules progénitrices pulpaires permettant la sécrétion de dentine réparatrice. Les cellules « odontoblast-like » recrutées seront ainsi responsables de la formation du pont minéralisé permettant de protéger la pulpe d'autres agressions (177).

Les études ayant montré l'induction de prolifération cellulaire par les biocéramiques sont basées sur l'analyse de l'expression génique des protéines spécifiques à la différenciation odontoblastique telles que la Dentin Sialo Phospho Protein (DSPP) et la Dentin Matrix acidic Phosphoprotein 1 (DMP1).

Ainsi, Jung et coll. ont étudié l'effet du MTA, de la Biodentine et du Bioaggregate sur la différenciation des cellules souches pulpaires (DPSC), issues de 3^{èmes} molaires maxillaires fraîchement extraites, en cellules de odontoblastique (178).

Les résultats ont montré une importante augmentation de l'expression du niveau d'ARNm de la DSPP et de la DMP1 à 24h et 48h par rapport au groupe témoin, sans différence significative entre les matériaux, confirmant leur potentiel d'induction de la différenciation odontoblastique.

Le MTA, la Biodentine et le Bioagrégat ont également stimulé la formation de nodules minéralisés par rapport au contrôle, en activant la voie MAPK. L'Alizarine a été le réactif utilisé, révélant une teinte rouge vif caractéristique d'un milieu riche en dépôts calciques et à fortiori en hydroxyapatite.

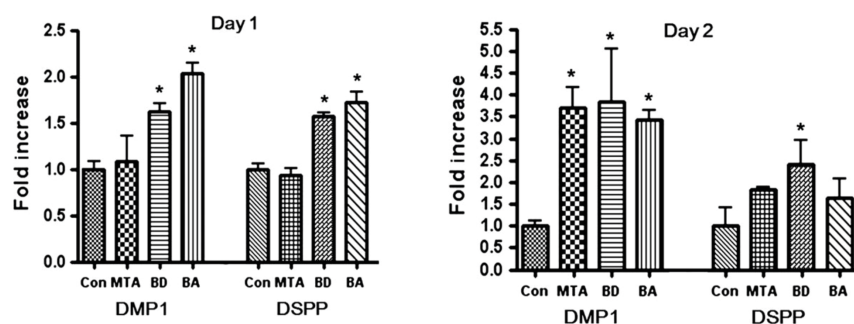


Figure 19 : Effets des biocéramiques sur la différenciation des DPSC : quantification de l'expression d'ARNm de DMP1 et DSPP (178)

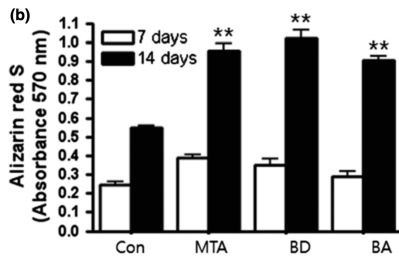


Figure 20 : Effets des biocéramiques sur la minéralisation par les DPSC : quantification de la minéralisation par l'Alizarine (178)

L'étude de Zhang et coll. (179) a comparé les effets du Bioaggregate, de l'iRoot BP plus et du MTA sur la prolifération et la minéralisation des cellules souches pulpaire (DPSC). Des DPSC ont étéensemencées sur les biocéramiques préparées, puis analysées à 1, 3, 5 et 7 jours.

La prolifération des DPSC dans le groupe MTA a été supprimée tout au long de la période de culture, tandis que le groupe BioAggregate et le groupe iRoot BP Plus ont d'abord augmenté de manière significative le nombre de cellules au jour 1 puis diminué du jour 3 au jour 7.

L'activité de la phosphatase alcaline a été augmentée dans les trois groupes à partir du jour 3, l'iRoot BP Plus montrant une activité significativement plus élevée. Les résultats ont montré une augmentation au cours du temps pour les trois matériaux de la minéralisation et l'expression génique (DSPP et DMP1) associées à la différenciation odontoblastique, avec une augmentation significativement supérieure de BioAggregate et iRoot BP Plus par rapport au MTA.

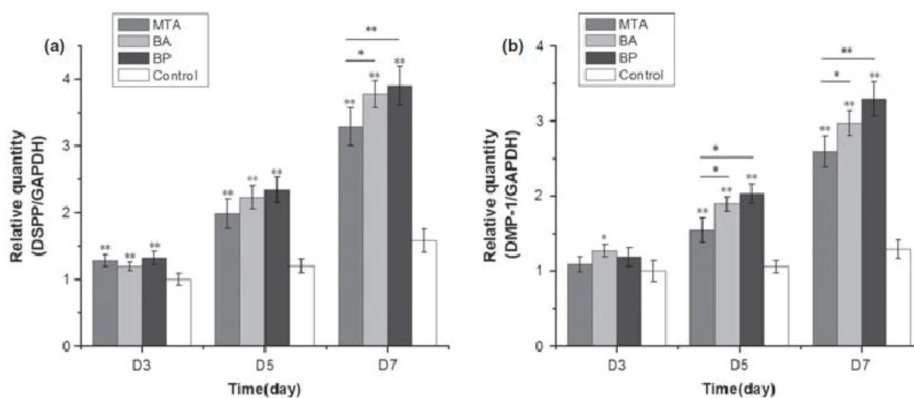


Figure 21 : Effet des biocéramiques sur l'expression génique de la DSPP et DMP1 (179)

La Biodentine en contact direct avec la pulpe peut influencer positivement la guérison en améliorant la prolifération, la migration et l'adhésion des cellules souches pulpaire (DPSC) (180).

Une étude de Araújo et al. (181) démontre encore une biocompatibilité importante du MTA et de la biodentine permettant prolifération, différenciation et migration de cellules souches pulpaire. En comparaison avec l'hydroxyde de calcium, la prolifération était moins élevée mais la migration était plus importante.

Enfin, l'étude de Güven et coll. (182) a également montré elle aussi le potentiel des biocéramiques (MTA et iRoot SP) à induire un phénotype odontoblastique sur les cellules souches et à former un dépôt calcique par celles-ci, avec toutefois un potentiel inductif plus important et un dépôt de tissu dur du MTA par rapport à l'iRoot SP.

Luo et al. (180) ont montré que l'exposition des cellules souches pulpaire (DPSC) à la biodentine pendant 24h a induit une augmentation significative de l'expression de l'ARNm des chimiokines. La différenciation ostéogénique des DPSC a augmenté.

Biodentine, Ortho MTA, MTA Angelus, ProRoot MTA et Bioaggregate présentent la capacité d'induire une différenciation odontoblastique des cellules souches pulpaire (DPSC), impactées notamment par les voies MAPK et CAMKII.

Il y a une augmentation significative de la formation de nodules minéralisés, ainsi que de l'expression d'ALP (phosphatase alcaline), OCN (ostéocalcine), DSPP, DMP1, COL1 (Collagène 1), Runx2 (runt related transcription factor) et BSP (Bone sialo protein) (178,183–186).

Peters et al. (187) ont montré que le MTA et la biodentine stimulent l'expression des gènes angiogéniques et la libération du VEGF (facteur de croissance endothélial vasculaire), pouvant donc améliorer l'angiogenèse avec les cellules souches de la papille apicale (SCAP).

D'après Costa et al. (188), l'induction ostéogénique (cellules souches mésenchymateuses) et angiogénique (cellules souches endothéliales) de la biodentine serait légèrement inférieur à ProRoot MTA et MTA Plus, mais supérieur au MTA Fillapex qui ne permettrait qu'une régénération partielle des défauts osseux.

iii. Prolifération et différenciation des cellules parodontales et osseuses

Que ce soit dans le cadre d'un traitement de communication endo-parodontale, d'une obturation endodontique ou d'une chirurgie apicale, nous attendons une réponse optimale des tissus périradiculaires face aux matériaux utilisés.

Willershausen et *al.* (189) ont étudié la biocompatibilité des biocéramiques en contact avec les tissus périradiculaires : MTA-Angelus (gris et blanc), ProRoot MTA et Endosequence RRM.

Ils les ont incubés avec des fibroblastes desmodontaux et des ostéoblastes jusqu'à 96h, en mesurant la prolifération, la croissance et la morphologie des cellules.

Les matériaux à base de MTA ont provoqué entre 24 et 96h heures des taux de prolifération significativement inférieurs par rapport aux témoins. En revanche, il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les taux de prolifération des cellules témoins et celles en contact avec ERRM, montrant une meilleure biocompatibilité de la nouvelle biocéramique.

Camps et *al.* (190) ont comparé la bioactivité de Bioroot RCS, avec celle du Pulp Canal Sealer en étudiant leur interaction avec des cellules du desmodonte.

La bioactivité du ciment biocéramique semble bien supérieure à celle du ciment à base d'Oxyde de Zinc/Eugénol, avec une toxicité moindre et une sécrétion accrue de facteurs de croissance angiogéniques et ostéogéniques pour Bioroot RCS.

Zhu et *al.* (191) ont étudié au microscope électronique à balayage l'adhésion des ostéoblastes aux matériaux d'obturation : MTA, IRM, composite et amalgame. Les ostéoblastes se fixaient et se répandaient sur le MTA et le composite en formant une monocouche. Ils se sont également attachés à l'amalgame, mais avec peu de cellules se propageant. En présence d'IRM, les ostéoblastes semblaient arrondis sans étalement. Ces résultats indiquent que les ostéoblastes ont une réponse positive au MTA.

Zhang et *al.* (162) se sont intéressés aux effets de l'iRoot SP sur l'expression de gènes liés à la minéralisation dans des ostéoblastes.

L'expression de gènes liés à la minéralisation, y compris le collagène de type I (COL I), l'ostéocalcine (OCN), la sialoprotéine osseuse (BSP) et l'ostéopontine (OPN), a été détectée aux jours 1, 3 et 6. Les auteurs ont pu observer une augmentation de l'expression de *COL I*, *OCN* et *BSP* par rapport à AH Plus et au groupe témoin après 3 et 6 jours.

Candeiro et *al.* (192) ont analysé les effets de l'Endosequence BC sealer et de l'AH Plus sur des fibroblastes gingivaux. Ils ont conclu que le ciment biocéramique montrait significativement moins de cytotoxicité et de génotoxicité que l'AH Plus, avec un nombre plus élevé de cellules viables, moins de formation de micronoyaux et des zones d'inhibition significativement plus petites.

c. Activité antibactérienne et antifongique

La thérapeutique endodontique vise à réduire au maximum les micro-organismes et leurs toxines du système endodontique, grâce à la pose du champ opératoire, la préparation chimio-mécanique lors de traitements canalaires ou encore la désinfection de la cavité avant la réalisation de coiffages pulpaire.

En effet, les micro-organismes sont les principaux facteurs étiologiques du développement d'inflammation pulpaire et périapicale, et la présence ou l'absence d'une flore microbienne est le principal déterminant de la guérison de pulpes exposées. Il est donc naturel de rechercher un ciment qui soit bactéricide ou bactériostatique (193,194).

Cependant, même après ces procédures chimio-mécaniques, des bactéries peuvent encore être trouvées à l'intérieur des tubules dentinaires, les canaux latéraux et la région apicale, avec un potentiel de persistance ou d'émergence de la maladie (195). Le résultat du traitement endodontique dépendra de l'étanchéité efficace pour empêcher une recontamination future ainsi qu'une réduction ou une élimination réussie des micro-organismes associés. Étant donné que de nombreux biomatériaux existants peuvent ne pas fournir une étanchéité parfaite, il est convenu que ces matériaux empêchent également la croissance bactérienne (79).

Ainsi, l'activité antiseptique d'un biomatériau à long terme doit assurer la neutralisation des micro-organismes, souvent persistants au sein des tubuli dentinaires, en les privant au moins de leur substrat.

Différentes méthodes sont utilisées par les industriels pour donner à un biomatériau un pouvoir antibactérien. Les méthodes les plus couramment utilisées sont l'adjonction d'ions antibactériens tels que les ions fluorures pour les ciments verres ionomères. Pour les ciments de scellement canalair à base d'oxyde de zinc eugénol, ce rôle antiseptique est assuré par la libération d'ions zinc et oxygène (196).

Concernant les biocéramiques, leur pouvoir antibactérien réside dans leur pouvoir de biominéralisation, l'augmentation du pH pendant l'hydratation ainsi que le maintien d'un pH basique au cours du temps.

En effet, l'hydratation des silicates de calcium ainsi que des phosphates de calcium par les fluides biologiques contenus dans les tubuli dentinaires forment de l'hydroxyapatite et de l'hydroxyde de calcium au pouvoir antibactérien bien décrit dans la littérature (94,197,198).

L'activité antibactérienne se produit également à la suite de précipitations *in situ* après le temps de prise du matériau, un phénomène qui conduit à la séquestration des bactéries. Les biocéramiques forment des poudres poreuses contenant des nanocristaux d'un diamètre de 1 à 3 nm, qui empêchent l'adhésion bactérienne. Parfois, les ions fluorure sont des constituants des cristaux d'apatite, et le nanomatériau résultant en acquiert les propriétés antibactériennes (199).

Asgary et al. (200) ont étudié *in vitro* l'effet antimicrobien du MTA, du CEM et de l'hydroxyde de calcium en utilisant un test de diffusion sur gélose avec *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus* et *Escherichia coli*. L'inhibition de la croissance bactérienne a été maximale et statistiquement similaire dans les groupes d'hydroxyde de calcium et de CEM, tandis que les zones d'inhibition observées liées au groupe MTA étaient significativement plus petites.

Lovato et al. (201) démontrent que le MTA et l'Endosequence RRM possèdent une activité antibactérienne similaire contre *E. Faecalis*.

Selon la revue de Rajasekharan et al. (90), l'activité antibactérienne de la Biodentine par rapport à MTA Angelus et ProRoot MTA est :

- plus forte contre les souches de *Streptococcus sanguis*
- Presque nulle contre *Streptococcus mutans*,
- Inférieure contre *Streptococcus salivarius*.
- similaire à MTA Angelus mais significativement plus élevée que ProRoot MTA et MTA Plus contre *Enterococcus faecalis* et *Escherichia coli*.

Candeiro et al. (192) ont observé un effet antibactérien inférieur contre *E. faecalis* de l'Endosequence BC sealer par rapport à l'AH Plus à 1h de contact, puis un effet antibactérien similaire pour le reste de l'étude (168h).

De même, l'étude de Wang et al. (198), basée sur une analyse par microscopie laser confocale, montre une activité antibactérienne similaire entre AH Plus et BC sealer sur *Enterococcus faecalis* dans les tubuli dentinaires.

Les résultats à 24h, 1 semaine et 3 semaines, montrent une disparition de 35% des souches bactériennes à 1 semaine et 45% à 3 semaines, démontrant une action bactéricide des biocéramiques d'autant plus efficace qu'elle est exercée sur le long terme.

L'effet antibactérien serait dû à une libération de composants au sein même des tubuli.

Zhang et al. (105) ont étudié *in vitro* l'efficacité antibactérienne de 7 ciments endodontiques, dont l'iRoot SP. Basée sur un test de contact direct, cette étude montre l'excellent effet antiseptique de l'iRoot SP contre *Enterococcus faecalis*.

L'iRoot SP fraîchement mélangé a neutralisé toutes les bactéries en 2 minutes, AH Plus en 5 minutes, EndoRez en 20 minutes, Sealapex et Epiphany en 60 minutes, et Apexit Plus et Tubli Seal n'ont pas réussi à éliminer l'ensemble des bactéries après 60 minutes.

Pour les échantillons de 1 et 3 jours, iRoot SP et EndoRez avaient l'activité antibactérienne la plus forte. En revanche, seuls Sealapex et EndoRez avaient encore une activité antibactérienne après 7 jours.

Arias-Moliz et Camilleri (202) ont montré que BioRoot RCS présentait une activité bactérienne significativement plus élevée que MTA Fillapex et AH Plus, ce dernier perdant même ses propriétés antimicrobiennes après irrigation avec de l'eau et du PBS.

De plus, les propriétés des matériaux pourraient être dépendantes du produit d'irrigation final utilisé. L'utilisation d'acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA) augmenterait le pouvoir antibactérien des ciments biocéramiques au rinçage final, tandis que l'utilisation de tampon phosphate salin (PBS) réduirait l'effet antibactérien.

Une autre étude de Singh et *al.* (203) comparant BC Sealer à MM Seal (à base de résine epoxy) et Zycal (à base de ZOE) sur différents micro-organismes (*Candida albicans*, *Lactobacillus*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Pseudomonas aeruginosa*), montre des résultats supérieurs pour BC Sealer.

Ozcan et *al.* (135) démontrent quant à eux en 2013 que iRoot SP et MTA Fillapex fraîchement mélangés ont une activité antifongique contre *Candida albicans*, mais qu'ils perdent cette propriété ensuite.

L'activité antifongique de Biodentine contre *Candida albicans* est similaire à MTA Angelus et MTA Plus, mais nettement plus élevée que pour ProRoot MTA (204,205).

Enfin, une étude d'Alsalleeh et *al.* (206) montre l'effet antifongique de l'Endosequence RRM Putty et le MTA contre le *Candida albicans*. Après 24h d'incubation, l'ERRM présentait une activité fongicide supérieure au MTA. En revanche, à 48h, le MTA permettait une meilleure réduction du biofilm.

En conclusion, les ciments biocéramiques auraient de bonnes propriétés antibactériennes (contre *E. Faecalis*) et une activité antifongique légère (contre *Candida albicans*).

Cette propriété diffère selon les ciments. En effet, elle persiste après 30 jours pour l'Endosequence BC Sealer®, alors qu'elle s'arrête à sept jours pour le iRoot SP.

6. Limites

Il apparaît que la principale limite des ciments biocéramiques est la difficulté de retraitement endodontique en cas d'échec thérapeutique (cf obturation endodontique orthograde)

V. INDICATIONS PÉDIATRIQUES ET PROTOCOLES OPÉRATOIRES

Les données de la littérature montrent un fort potentiel de biominéralisation des biocéramiques, via la formation de ponts dentinaires homogènes et non poreux, contrairement à ceux formés lors de l'utilisation d'hydroxyde de calcium. De plus, les biocéramiques sont parfaitement aptes à induire une différenciation cellulaire et un recrutement de cellules souches pulpaire capables d'induire la synthèse d'une dentine réparatrice.

Cette importance accordée aux excellentes propriétés biologiques des biocéramiques a permis de mettre la biologie pulpaire et la nécessité de maintenir l'organe dentaire vivant au centre des thérapeutiques cliniques.

Les nouvelles biocéramiques promettent donc d'excellentes propriétés physiques, chimiques et biologiques, une absence d'effet iatrogène sur les tissus dentaires (dyschromies) et périapicaux, et enfin un aspect ergonomique du « prêt à l'emploi », qui tendent à rapprocher ces produits du matériau idéal de Grossman.

Avec leur facilité d'utilisation et leur spectre d'utilisation allant du matériau de coiffage prêt à l'emploi, au ciment de scellement canalaire, en passant par les cônes de gutta imprégnés, les biocéramiques se positionnent en réels matériaux d'avenir.

La biocéramique a maintenant un large éventail d'applications thérapeutiques à la fois en endodontie et en dentisterie restauratrice, et la connaissance des différents matériaux disponibles est essentielle pour garantir la sélection du plus adapté dans différentes situations cliniques (46).

L'évaluation pré-opératoire du degré d'atteinte pulpaire est un préalable indispensable à réaliser de manière extrêmement précise. Le choix de la thérapeutique la plus adaptée sera arrêté après la réalisation d'un bilan biologique pulpaire, une analyse radiographique et la pose d'un diagnostic clinique précis (207).

Nous nous appuyons ici sur la classification de Baume des pulpopathies, en s'intéressant aux différentes techniques disponibles pour chaque degré d'atteinte pulpaire.

1. Catégories I et II : conservation de la vitalité pulpaire

A. Définition et objectifs

Cela concernera les pulpes dans le cadre de lésions juxta-pulpaire, ou bien lésées accidentellement (exérèse carieuse, réfection d'un soin ou atteinte traumatique).

Il s'agit de lésions pulpaire réversibles, et l'on cherchera à conserver la vitalité pulpaire ainsi qu'à stimuler une dentinogenèse, par un coiffage (direct ou indirect) ou une pulpotomie.

En cas de succès, ces procédures excluent la nécessité d'un traitement plus invasif, plus étendu et plus coûteux.

Selon "l'American Association of Endodontists", le coiffage pulpaire correspond au traitement d'une pulpe vitale atteinte, en recouvrant la plaie pulpaire par un biomatériau dentaire en vue de faciliter la formation de dentine de réparation et conserver la vitalité pulpaire (208).

La pulpotomie est définie comme l'ablation chirurgicale de la partie coronaire d'une pulpe vitale comme moyen de préservation de la vitalité du restant de la portion radiculaire. Elle est réalisée sur une pulpe coronaire inflammatoire afin d'éviter la pulpectomie. Elle permet, le cas échéant, le développement radiculaire jusqu'à la fermeture apicale (208).

Les procédures de maintien de la vitalité pulpaire (coiffage et pulpotomie) avec un matériau bioactif présentent un apport certain pour les dents matures. Elles ont pour objectif de :

- Diminuer l'inflammation pulpaire et permettre la guérison de la pulpe,
- Permettre la formation d'un pont dentinaire de tissu minéralisé,
- Former une barrière protectrice permettant d'éviter les agressions chimiques, thermiques, mécaniques et bactériennes, qui pourraient être à l'origine de sensibilités post-opératoires, voire pulpites irréversibles ou nécrose.
- Permettre la conservation d'une résistance (mécanique et biologique) intéressante pour la dent
- Permettre la restauration de la perte de substance coronaire (CVI, composite, amalgame, coiffes, couronnes...).

Elles sont encore plus importantes dans le cadre de dents immatures exposées à des caries ou des traumatismes, où il s'agit également de favoriser l'apexogenèse. En effet, la préservation du potentiel dentinogénique (par les cellules pulpaire) permet la poursuite physiologique du développement radiculaire : la rétention à long terme d'une dent permanente nécessite une racine avec un rapport couronne / racine favorable et des parois dentinaires suffisamment épaisses pour résister à une fonction normale. Par conséquent, la conservation de la pulpe est un objectif principal pour le traitement de la jeune dentition permanente (209). De plus, le maintien sur l'arcade d'une dent temporaire est particulièrement important pour maintenir l'espace, conduire l'éruption de la dent permanente et éviter une malocclusion avec des problèmes esthétiques, phonétiques et fonctionnels transitoires ou permanents (210,211).

Dans le cadre d'un traumatisme avec exposition pulpaire, la pulpe va présenter un état inflammatoire proportionnel au temps d'exposition.

Concernant les dents matures, le traitement généralement recommandé sera la pulpectomie et l'obturation endodontique, car la pulpe a été exposée aux bactéries du milieu buccal, dans un milieu sceptique. En revanche, l'objectif de la prise en charge des dents immatures sera la préservation de la vitalité pulpaire afin d'obtenir une apexogenèse physiologique. Un coiffage pulpaire direct, une pulpotomie partielle ou totale seront indiqués en fonction du temps d'exposition et du degré d'atteinte (212).

Les chances de succès sont augmentées si la pulpe est biologiquement jeune car ses facultés réparatrices sont importantes, avec la présence de cellules souches à fort potentiel de différenciation (212).

En cas d'état pulpaire pathologique, visible par exemple par une forte rétraction de la chambre pulpaire témoignant d'une agression chronique sur une longue période, la situation est bien moins favorable. Il faudra ainsi privilégier au maximum l'économie tissulaire dans les situations favorables (coiffage), et s'assurer le succès thérapeutique des pulpes moins dynamiques par des traitements intermédiaires (pulpotomie).

Lipski et *al.* (213) se sont intéressés aux facteurs affectant les résultats du coiffage direct. Sur 86 dents suivies de 1 à 1,5 ans, coiffées à la biodentine avec un taux de réussite global de 82,6%, seul l'âge a eu un effet significatif sur le taux de survie

pulpaire : le taux de réussite était de 90,9% chez les patients de moins de 40 ans et de 73,8% chez les patients de 40 ans ou plus.

Le sexe, le traitement initial ou secondaire des caries, les caries occlusales ou cervicales/proximales, le placement retardé de l'obturation permanente, la position des dents et le type d'arcade n'ont pas influencé le résultat.

Les facteurs décisifs pour la guérison de la pulpe enflammée sont le degré d'inflammation, le temps d'irritation et d'infection, et le lieu de l'exposition.

Les facteurs concernant le taux de réussite de la pulpotomie comprennent un diagnostic précis avant le traitement, une isolation avec mise en place d'un champ opératoire, une désinfection complète et une restauration rigoureuse (214).

Un autre facteur qui s'est avéré avoir un effet sur le succès des thérapies pulpaires est le contrôle de l'hémostase pulpaire après l'exposition et avant de placer le matériau. C'est probablement le résultat de deux raisons :

- une augmentation des saignements peut indiquer un degré plus élevé d'inflammation de la pulpe, avec une diminution de la capacité de réparation qui en résulte.
- l'humidité et la contamination sanguine de la dentine adjacente au site d'exposition peuvent rendre plus difficile l'obtention d'une étanchéité adéquate devant empêcher une exposition bactérienne ultérieure (215,216).

Il peut être intéressant de noter que l'étude d'Özgür et al. (217) révèle un taux de réussite légèrement différent selon l'agent de contrôle de l'hémostase (95% avec l'hypochlorite de sodium à 2,5%, contre 100% avec du sérum physiologique), non statistique significatif malgré les 80 pulpotomies partielles de molaires permanentes immatures étudiées à 6, 12, 18 et 24 mois, tandis qu'ils n'ont observé aucune différence suivant le matériau (MTA ou hydroxyde de calcium).

Dans toutes les procédures que nous allons décrire ici, il est impératif que la digue soit posée et que la dent puisse être reconstituée par une restauration étanche.

B. Principes du maintien de la vitalité pulpaire

En 1993, Torabinejad et ses collègues ont développé le MTA, principalement dans le but d'obtenir un matériau étanche aux bactéries et biocompatible, notamment pour sceller les perforations accidentelles du canal radiculaire (51).

Par la suite, ce matériel s'est également révélé idéal comme matériau d'obturation apicale, de coiffage, de pulpotomie puis d'apexification, certaines des lacunes de l'hydroxyde de calcium semblant être surmontées (53,60,61,218).

L'hydroxyde de calcium, Ca(OH)_2 , a été traditionnellement considéré comme le « gold standard » des agents de coiffage pulpaire direct depuis 1928, grâce à sa capacité d'induction de tissus durs sur les tissus mous adjacents (219).

Il est formé d'une poudre qui, au contact d'un fluide aqueux, se dissocie en ions calcium et hydroxyle. C'est une base forte avec un pH élevé (environ 12), ce qui lui confère d'excellentes propriétés antibactériennes, induit une nécrose de surface et une minéralisation directement sous le matériau.

L'effet de l'hydroxyde de calcium appliqué sur la pulpe exposée est la conjugaison de la lésion chimique causée par les ions hydroxyle (limitée par une zone de nécrose ferme contre le tissu vital) et de la tolérance des ions calcium par le tissu. Cet effet prend quelques heures et se traduit par une zone de nécrose de liquéfaction sous-jacente à l'hydroxyde de calcium et une zone plus profonde de nécrose de coagulation en regard du tissu pulpaire vital. La nécrose ferme provoque une légère irritation et stimule la pulpe à se défendre et à se réparer :

- par la migration et la prolifération des cellules vasculaires et inflammatoires pour contrôler et éliminer l'agent irritant,
- puis par la migration et la prolifération des cellules pulpaires mésenchymateuses et endothéliales et la formation de collagène.

La minéralisation du collagène commence par une calcification dystrophique à la fois de la zone de nécrose ferme et des cellules dégénérées dans le tissu adjacent, conduisant à un dépôt de minéraux dans le collagène nouvellement formé. La présence d'ions calcium stimule la précipitation du carbonate de calcium dans la zone de la plaie et contribue ainsi à l'initiation de la minéralisation.

L'hydroxyde de calcium peut solubiliser les facteurs de croissance séquestrés dans la dentine au cours du développement dentaire. La libération de ces facteurs et d'autres

molécules de signalisation de cellules bioactives peut entraîner le recrutement de cellules pulpaire indifférenciées sur le site de la plaie conduisant à la production d'un pont tissulaire dur. On pense que la libération des facteurs de croissance active les cellules progénitrices dans la pulpe pour proliférer et former le pont minéralisé en environ 2 à 4 semaines.

Le taux de guérison moyen dans l'utilisation de l'hydroxyde de calcium dans les pulpotomies est de 95% (220) (177) (221) (222).

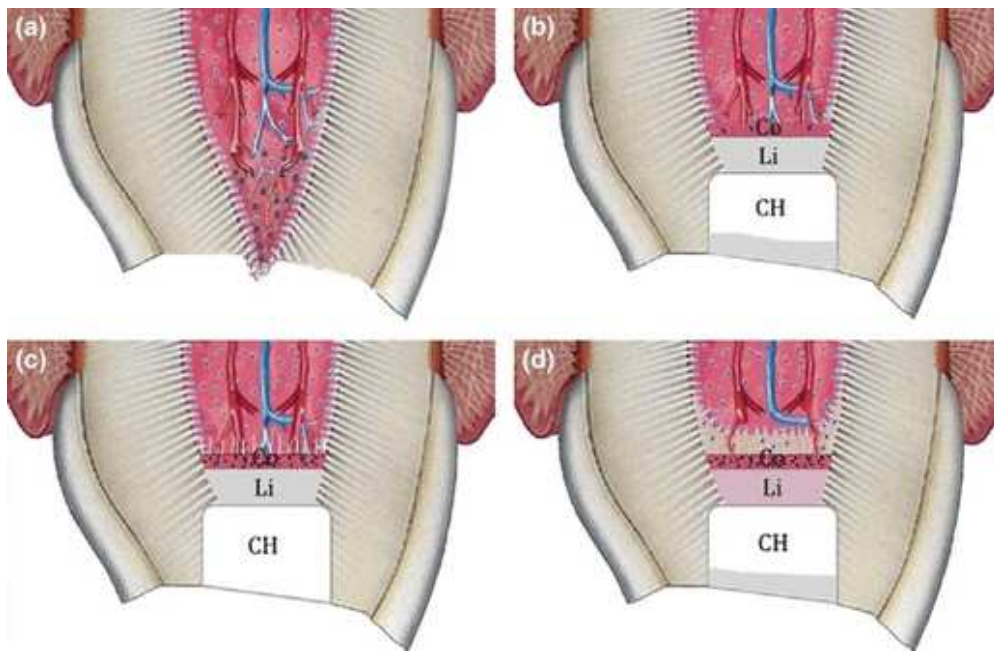


Figure 22 : réaction pulpaire suite à une pulpotomie à l'hydroxyde de calcium (222)

(a) Exposition pulpaire.

(b) Pulpotomie. Le pH élevé de l'hydroxyde de calcium provoque la libération de facteurs de croissance, empêche la pénétration de bactéries, génère une zone de nécrose de liquéfaction (Li) (très étroite ou absente avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à prise dure comme par exemple le Dycal) et une zone de nécrose de coagulation (Co) (environ 1 mm d'épaisseur combinée en cas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ non durcissant).

(c) La zone de coagulation initie la cicatrisation, commençant par des foyers sphériques de calcification, qui fusionnent pour former une zone de calcification, à côté de laquelle se forme du collagène.

(d) Un tissu minéralisé est déposé contenant des cellules vasculaires et des inclusions. Après environ 2 à 3 semaines, de nouvelles cellules odontoblastiques apparaissent en regard du pont minéralisé et la dentine normale commence à se former.

L'hydroxyde de calcium induit cependant une formation minéralisée hétérogène, avec des porosités voire des tunnels, constituant une barrière partielle contre les infections bactériennes. Cela posera problème si l'étanchéité du coiffage pulpaire ou de la zone de pulpotomie n'est pas optimale. En raison de la dissolution inévitable de l'hydroxyde de calcium, au cours de laquelle il perd son effet antibactérien et permet aux bactéries d'utiliser ces canaux pour pénétrer dans la pulpe, une pulpite peut survenir (223,224). À cela se rajoutent d'autres inconvénients tels que les faibles propriétés physiques, leur dissolution progressive, leur réaction de prise conduisant à la formation d'espaces morts et de micro-fuites, ou encore les effets cytotoxiques pour les utilisateurs d'hydroxydes de calcium en double pâte (225).

L'effet du MTA sur les tissus pulpaire et périapicaux présente certaines similitudes avec celui produit par l'hydroxyde de calcium : le mélange de MTA avec de l'eau entraîne la formation d'hydroxyde de calcium.

Par la libération d'hydroxyde de calcium, le MTA présente des propriétés antibactériennes et une capacité à induire la libération de protéines bioactives de la matrice dentinaire (226)(227).

La formation de tissus durs en contact avec les ciments biocéramiques entraîne une lésion chimique initiale moins étendue que celle produite par l'hydroxyde de calcium seul. Pendant la prise, un pH élevé (jusqu'à 12,5) est créé dans la zone à côté du MTA et il restera élevé pendant au moins 8 semaines. Le pont minéralisé semble se former plus précocément que sous CH, avec des augmentations quotidiennes de dentine plus importantes et peu d'inclusions vasculaires (59,228). L'initiation de ponts minéralisés semble se faire par stimulation de la prolifération, de la migration et de la différenciation cellulaire (229). Il y aurait une zone homogène cristalline formée à la jonction pulpe-MTA après 1 semaine. Une barrière régulière minéralisée avec inclusions cellulaires est observée après 2 semaines, et une dentine cellulaire est formée après 3 semaines (230).

De plus, le MTA forme un joint très serré avec les parois de la dentine par liaison physique : une couche interfaciale d'hydroxyapatite est créée en tant que lien, empêchant la pénétration bactérienne vers l'endodonte (78). En ce qui concerne l'étanchéité coronaire du MTA face à la pénétration bactérienne, deux études

comparant le MTA et le CVI (Fuji) n'ont montré aucune différence entre les deux types de matériaux (107,231).

Ainsi, le MTA a une capacité d'étanchéité plus élevée, une solubilité plus faible, une résistance physique et une stabilité plus élevées que l'hydroxyde de calcium. Il peut se fixer dans un environnement humide, empêcher l'infiltration bactérienne et produire une formation de pont dentinaire plus épaisse avec une réponse inflammatoire moindre, moins d'hyperémie et moins de nécrose du tissu pulpaire par rapport à l'hydroxyde de calcium (223,232).

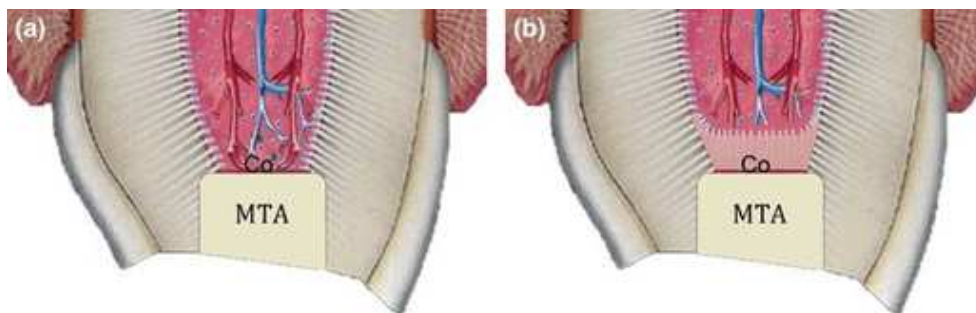


Figure 23 : réaction pulpaire suite à une pulpotomie au MTA (222)

- (a) Le MTA induit par son pH élevé une libération de facteurs de croissance, et une liaison chimique (une couche d'hydroxyapatite) avec la dentine qui empêche la pénétration bactérienne.
- (b) Le MTA induit par son effet pH une zone très étroite de nécrose de coagulation (Co). À côté de cette zone, une zone de dentinogenèse réparatrice est trouvée. Un pont dentinaire se forme plus rapidement qu'en cas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et avec moins d'inclusions vasculaires.

Une revue Cochrane de 2018 portant sur les dents temporaires suggère que le MTA pourrait être le matériau le plus efficace pour guérir la pulpe radiculaire après la pulpotomie d'une dent temporaire (233). Le formocrésol, bien qu'efficace, connaît des problèmes de toxicité. Autrement, il n'y a aucune preuve concluante qu'un matériau est supérieur à un autre, entre MTA, hydroxyde de calcium, formocrésol ou sulfate ferrique, et donc le choix du biomatériau reste à la discrétion du clinicien.

Les biomatériaux principalement recommandés sont donc hydroxyde de calcium et ciments biocéramiques à base de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (MTA, Biodentine...).

Les différences de réponse tissulaire aux divers ciments biocéramiques, contenant de l'hydroxyde de calcium, seraient plutôt liées à des facteurs tels que les différences de pH et de taux de libération des ions hydroxyle et des ions calcium.

Néanmoins, au vu des colorations induites par le MTA et de la porosité du pont dentinaire induit par l'hydroxyde de calcium, les matériaux de choix semblent être nouvelles biocéramiques endodontiques (Biodentine, etc ...).

La biodentine semble être très indiquée car elle est très efficace dans la formation d'un pont dentinaire, est mécaniquement plus résistante et moins soluble, et produit des joints plus serrés que l'hydroxyde de calcium; en outre, elle évite les inconvénients du MTA, comme un temps de prise prolongé, des colorations et des caractéristiques de manipulation difficiles (122).

Rajasekharan et *al.* (90) ont publié en 2018 une revue de la littérature actualisée concernant la Biodentine : en tant qu'agent de pulpotomie des dents temporaires, les études n'ont montré aucune différence significative entre la Biodentine et le MTA (environ 95%).

Les effets indésirables rapportés sur les dents qui ont bénéficié d'une pulpotomie ou d'un coiffage pulpaire sont les calcifications pulpaires, autant avec les biocéramiques qu'avec l'hydroxyde de calcium. C'est un signe de vitalité pulpaire et elle est le résultat d'une activité odontoblastique vigoureuse. Les deux matériaux sont connus pour induire la formation de tissus durs et ce n'est par conséquent pas surprenant (217,234).

Il est rapporté que l'incidence d'oblitération du canal pulpaire est de 4 à 24% dans les dents après un traumatisme dentaire (235).

Bien qu'elle ne soit pas considérée comme un critère de réussite ou d'échec clinique, la calcification de la chambre canalaire peut augmenter la difficulté des traitements futurs et conduire à la fracture ou à la perforation lors de la recherche de localisation des canaux. Pour cette raison, dans un traitement d'apexogenèse par coiffage ou pulpotomie, il faut attendre la formation du pont dentinaire et la fin de l'édification radiculaire, et ensuite on peut prendre la décision de réaliser le traitement de racine pour éviter ces calcifications intra canalaires.

On peut également observer des résorptions internes sur les dents qui ont bénéficié d'une pulpotomie ou d'un coiffage pulpaire, phénomène encore mal expliqué et davantage observé sur les dents temporaires. Elle se produit avec une inflammation

pulpaire chronique résiduelle, ou est induite par un traitement inapproprié de la plaie, comme laisser un caillot de sang entre la surface de la plaie et le matériau de coiffage (177).

C. Coiffage pulpaire indirect

Le coiffage pulpaire indirect est une procédure dans laquelle le matériau est placé sur une fine épaisseur de dentine (saine ou affectée), dont l'exérèse pourrait exposer la pulpe.

Il est indiqué quand l'épaisseur de la dentine résiduelle en regard de la pulpe est inférieure à 2mm, et sur une pathologie pulpaire de catégorie I.

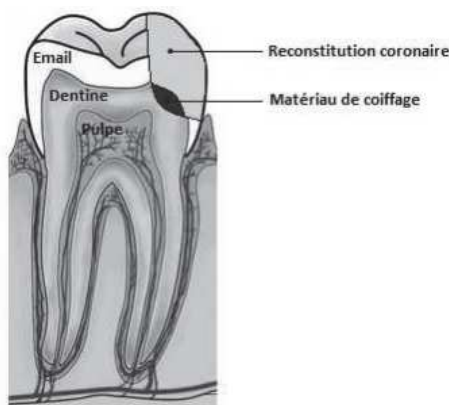


Figure 24 : Schéma du coiffage pulpaire indirect (236)

En règle générale, une élimination partielle de la carie est réalisée, puis la carie résiduelle est recouverte par un matériau de coiffage et une restauration est placée pendant une période de 4 à 12 mois avant que la dent ne soit réévaluée cliniquement et radiologiquement. Cette couche de dentine affectée est laissée en place afin de protéger le complexe dentino-pulpaire, réduire tout dommage additionnel à la pulpe et induire une dentinogenèse (237).

Deux revues systématiques approfondies s'accordent pour conclure ceci (238,239):

- L'ablation partielle des caries a réduit le risque d'exposition pulpaire de 98% par rapport à l'excavation complète des caries dans les dents à caries profondes ;

- Il n'y a aucune preuve que l'ablation partielle de la carie est préjudiciable en termes de signes, symptômes, apparition de pulpite ou longévité de restauration ;
- Il existe des preuves substantielles que l'élimination complète des caries n'est pas nécessaire pour réussir, à condition que la restauration soit bien scellée.

Une méta-analyse (240) a montré une réduction du risque à la fois pour l'exposition pulpaire (OR 0,31 [0,19-0,49]) et les symptômes pulpaires (OR 0,58 [0,31-1,10]) pour les dents traitées avec une excavation incomplète en une ou deux étapes. Le risque d'échec semblait similaire pour l'excavation complète et incomplète, mais les données pour ce résultat étaient de qualité limitée et peu concluantes.

Leye Benoist et *al.* (241) ont évalué la formation du pont dentinaire lors du coiffage indirect par l'hydroxyde de calcium ou le MTA sur 60 dents. Un taux de réussite significativement plus élevé a été observé dans le groupe MTA (93% à 3 mois - 89,6% à 6 mois) par rapport au groupe hydroxyde de calcium (73% à 3 et 6 mois).

D'après la revue de la littérature de Rajasekharan et *al.*(90), il n'y pas de différence significative entre Biodentine et CVI pour le coiffage indirect des dents permanentes.

Il paraît donc préférable de réaliser un coiffage pulpaire indirect qu'une excavation, et ceci avec une biocéramique ou un CVI.

D. Coiffage pulpaire direct

Le coiffage pulpaire direct place le matériau directement au contact de la pulpe exposée, par traumatisme récent ou lors de l'éviction de la dentine cariée sur une dent à pulpe vitale asymptomatique.

Il est indiqué lors d'une pathologie pulpaire de catégorie I ou II.

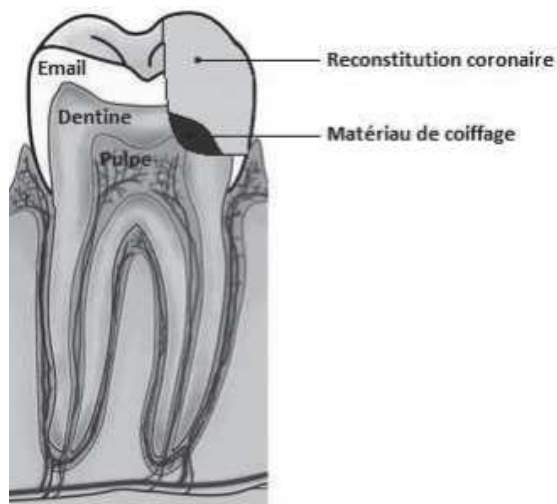


Figure 25 : Schéma du coiffage pulpaire direct (236)

Le coiffage direct ne doit être utilisé que sur la pulpe vitale qui a été accidentellement blessée et ne présente aucun autre symptôme. Il ne devrait pas être utilisé sur la pulpe qui a été exposée à la suite de caries pénétrantes : le risque d'échec est accru si la pulpe est malade avant le coiffage, l'invasion bactérienne entraînant une inflammation pulpaire difficilement maîtrisée (141).

Hilton (237) a mis en évidence deux clés du succès du coiffage pulpaire direct :

- Restreindre le coiffage pulpaire aux dents asymptomatiques.
Il semble évident que le coiffage pulpaire direct donne de meilleurs résultats lorsqu'il est réalisé sur des pulpes lésées accidentellement lors d'un soin sans lésion carieuse plutôt qu'en présence d'une lésion carieuse : l'état de la pulpe avant le coiffage est inflammée à un degré variable et inconnu. En revanche, s'il n'y a pas d'inflammation pré-existante ni de bactéries, il y a donc de meilleures chances de réussite.
- Mettre en place une restauration bien scellée après le coiffage pulpaire.
D'après Mente et *al.* (242), les dents bénéficiant d'une restauration définitive au moins deux jours après coiffage, quel que soit le matériau choisi, présentent 3,18 fois plus de mauvais pronostic que les dents immédiatement restaurées.

Hilton et *al.* (243) ont réalisé un essai clinique randomisé sur 376 patients pendant 2 ans, comparant le coiffage à l'hydroxyde de calcium ou au MTA. La probabilité d'échec à 24 mois était de 31,5% pour l'hydroxyde de calcium contre 19,7% pour MTA.

Mente et al. (242) ont comparé le coiffage pulpaire direct avec de l'hydroxyde de calcium ou du MTA, sur 229 dents étudiées sur une période médiane de 42 mois. Les taux de réussite à long terme étaient de 80,5% pour le MTA et de 59% pour l'hydroxyde de calcium, avec une différence significative.

Cela va cependant à l'encontre de deux revues de la littérature précédentes :

- Concernant les dents permanentes immatures, Chen et al. (244) ont publié une meta-analyse montrant qu'il n'y avait pas de différence significative à 6, 12, 18 et 24 mois entre le coiffage à l'hydroxyde de calcium, au MTA ou encore au PRF. Les auteurs reconnaissent cependant que cette conclusion peut être biaisée sur le plan méthodologique par le petit nombre d'études incluses et la petite taille des échantillons des études incluses : la plupart des comparaisons étaient basées sur des études uniques. D'autre part, les critères de réussite radiographique différaient suivant les études, et elles ne s'intéressaient pas toutes à la même unité (chaque racine ou une dent entière).
- S'intéressant aux prémolaires matures jeunes, Hilton (237) explique que le MTA est caractérisé par des résultats comparables à l'hydroxyde de calcium en tant qu'agent de coiffage pulpaire direct dans les données à court terme. Selon lui, l'hydroxyde de calcium reste le «gold standard» pour le coiffage direct : il a le plus long historique de succès clinique, est le plus rentable et est probablement le composant efficace du MTA. Le succès du MTA serait en fait dû au fait qu'il sert de réservoir à l'hydroxyde de calcium et / ou à sa capacité à fournir une étanchéité sur le site d'exposition de la pulpe... mais, même si le MTA scelle mieux que l'hydroxyde de calcium, il convient de garder à l'esprit qu'un CVI/CVIMAR est nécessaire pour protéger le MTA en raison du temps de prise prolongé.

Les différences dans ces conclusions pourraient être dues à la théorie selon laquelle les dents permanentes immatures ont un apport sanguin plus riche et une plus grande résistance à l'infection et à la contamination, ce qui améliore le taux de réussite des dents permanentes immatures et, par conséquent, réduit la différence entre les produits utilisés.

Pour ce qui est des nouvelles biocéramiques, la revue systématique de Mahmoud et al. (245), comparant MTA et Biodentine comme matériaux de coiffage direct sur dents permanentes matures, conclue que la Biodentine a un effet similaire au MTA, notamment sur la formation de ponts dentinaires.

L'étude encore plus récente de Paula et al. (246) sur 20 patients observait à 6 mois un taux de réussite de 100% pour le MTA et de 95% pour la Biodentine, concluant à un effet thérapeutique statistiquement équivalent.

E. Pulpotomie partielle

Les procédures de maintien de la vitalité pulpaire reposent sur la maîtrise de l'inflammation tissulaire. Cependant, lors d'une atteinte carieuse profonde avec lésion de la palissade odontoblastique, il est impossible de mesurer la profondeur de l'altération des tissus pulpaire sous-jacents. Ainsi, si la pulpe camérale se révèle trop enflammée, la thérapeutique de coiffage pulpaire direct sera inefficace et contre-indiquée, une alternative devra être mise en place : la pulpotomie.

Cette procédure, bien que plus invasive, permet en effet un meilleur contrôle de l'inflammation, tout en stimulant le potentiel régénératif des cellules pulpaire à l'origine de la synthèse de dentine réparatrice.

En fonction des circonstances cliniques et du degré d'atteinte de l'organe pulpo-dentinaire, deux types de pulpotomies pourront être réalisées : la pulpotomie partielle ou la pulpotomie totale.

Dans la procédure de pulpotomie, la pulpe coronaire est amputée chirurgicalement et la surface de la pulpe camérale ou radiculaire restante est traitée avec un biomatériau afin de favoriser la formation d'un pont dentinaire (247).

La pulpotomie partielle est définie comme la suppression d'une petite portion du parenchyme pulpaire inflammatoire jusqu'au niveau supposé de la pulpe cliniquement saine, préservant l'essentiel des tissus pulpaire coronaire et radiculaires (208).

Le protocole est quasi identique à celui du coiffage direct : l'unique différence réside dans l'amputation à la fraise boule diamantée sur contre-angle rouge, sous irrigation, de 2 mm de pulpe suspectée enflammée (248).

C'est une alternative au coiffage direct, lorsque les conditions sont moins favorables :

- Exposition pulpaire étendue sur plus de 5 mm²
- Dentine cariée en regard de la pulpe
- Saignement excessif, indiquant une inflammation pulpaire. Cela gêne non seulement l'hémostase, mais limite également les chances de succès du coiffage, et occasionne une mauvaise étanchéité et un collage difficile.

Elle est particulièrement indiquée chez les jeunes patients, dont la pulpe est plus cellulaire et présente un potentiel de régénération et une vascularisation plus favorables. Cvek et *al.* ont démontré que la pulpe exposée pouvait maintenir sa vitalité jusqu'à 7 jours. Au niveau de ces dents, seuls les 2 mm les plus superficiels de la pulpe sont inflammatoires et nécessitent un retrait (249).

Elle n'est cependant pas indiquée pour les dents temporaires présentant une résorption pathologique interne, une atteinte de la furcation, une structure radiculaire insuffisante et une pathologie périradiculaire qui peuvent altérer l'éruption successive permanente.

Le premier à décrire cette technique est le suédois Miomir Cvek, qui en 1978 présente une série de cas cliniques réalisés sur 60 incisives permanentes ayant présenté un traumatisme avec exposition pulpaire (250). L'échantillon était constitué de 28 incisives aux racines immatures et 32 incisives aux racines matures, ayant fait l'objet de traitements par pulpotomies partielles à l'hydroxyde de calcium.

Les résultats de cette étude, menée sur 2 ans, montrent un taux de succès de 96%. Cette réussite est caractérisée par la formation d'une barrière minéralisée, entre le biomatériau et le tissu pulpaire coiffé, 3 mois après le début du traitement. Un pont dentinaire parfaitement objectivable à la radiographie rétro-alvéolaire est constaté dès le 6^{ème} mois.

Il faut respecter un temps d'exposition pulpaire inférieur à 18h, selon Cvek.

Le MTA est considéré comme un matériau optimal pour la thérapie pulpaire car il a un taux de réussite élevé.

Yildiz et Tosun (251) ont évalué quatre matériaux de pulpotomie et ont constaté qu'après 30 mois, les taux de réussite clinique étaient de 100% pour le MTA, 95,2% pour le formocrésol, 96,4% pour le sulfate ferrique et 85% pour l'hydroxyde de calcium. Caruso et *al.* (252) ont publié une étude rétrospective sur pulpotomies totales incluant 400 molaires temporaires, évaluées après 9 et 18 mois post-opératoire. Le taux de

succès clinique et radiographique du traitement par hydroxyde de calcium (200 dents) était de 85,5% après 9 mois et de 79,5% après 18 mois, tandis que la biodentine (200 dents) affichait un taux de réussite significativement plus élevé : 94% après 9 mois et 89,5% après 18 mois.

Une meta-analyse de Lin et *al.* (253), portant sur les pulpotomies à 12, 18 et 24 mois, relatait un rapport d'échec de 0,47 (entre 0,26 et 0,83) par rapport à l'hydroxyde de calcium.

Le MTA est considéré comme supérieur à l'hydroxyde de calcium dans les aspects cliniques et radiographiques des thérapeutiques pulpaires sur molaires temporaires primaires, entre autres en raison d'une meilleure biocompatibilité du MTA. (59)

F. Pulpotomie totale / cervicale

Considérée initialement comme traitement d'urgence, la pulpotomie est aujourd'hui utilisée comme alternative viable à la biopulpectomie.

En effet, en situation de pulpite aigue, même irréversible, il est raisonnable de penser que la pulpe radiculaire soit saine, exempte d'inflammation, de contamination bactérienne et surtout présentant, sur le plan biologique, un certain potentiel de guérison (254).

La thérapeutique de pulpotomie cervicale présente de nombreux avantages par rapport à la biopulpectomie : elle est plus conservatrice, moins chronophage et permet de prévenir les risques liés à l'obturation incomplète du système endocanalair (255).

Il s'agit de l'élimination de l'ensemble de la pulpe camérale jusqu'aux orifices canalaire, afin de placer le matériau de coiffage directement au niveau de la pulpe radiculaire saine.

Il s'agit de la thérapeutique de choix pour le traitement des molaires temporaires vitales présentant une importante atteinte carieuse, permettant de maintenir la dent (vitale) sur l'arcade jusqu'à son exfoliation.

Elle est également indiquée dans le traitement des dents permanentes immatures pour promouvoir l'apexogenèse.

Une fois la fermeture apicale obtenue, le traitement endodontique pourra être ou non envisagé en fonction du pronostic de la dent et du délabrement tissulaire. Le risque

encouru, en laissant le matériau de pulpotomie en place à long terme, est d'induire une importante oblitération canalaire pouvant par la suite contre-indiquer le traitement canalaire par voie orthograde (217,234).

Ce traitement est également utilisé sur des dents permanentes matures. En tant que geste clinique d'urgence, lors d'une pulpite irréversible, la pulpotomie totale constitue une thérapeutique temporaire visant à soulager le patient lors de cette phase aigüe de l'inflammation pulpaire.

De plus, elle apparaît comme une solution de traitement viable à long terme sur les dents présentant une pulpite réversible, toute la pulpe étant retirée de la chambre pulpaire, ne laissant que le tissu pulpaire dans le système canalaire dans lequel le tissu est généralement exempt d'inflammation (207).

Certains en élargissent encore les indications vers les pulpites irréversibles : Eghbal et al. (254) présentent quatorze molaires en pulpite irréversible, traitées au MTA, qui ont formé un pont dentinaire complet et retrouvé une vitalité non inflammatoire. Chueh et Chiang (256) ont quant à eux rapporté un cas de pulpite irréversible associée à une parodontite apicale symptomatique sur 2^{ème} prémolaire chez une patiente de 19 ans, sur laquelle une pulpotomie au MTA a entraîné la formation de dentine réparatrice et le retour à un état pulpaire non inflammatoire.

La difficulté réside dans l'appréciation du degré d'inflammation pulpaire. En outre, la plupart des dents traitées par pulpotomie ne répondent plus au test thermique, où seul le pulp-testeur électronique apporte des résultats acceptables mais peu reproductibles, retardant l'observation d'un éventuel échec thérapeutique à la survenue d'une complication infectieuse chronique (suivi radiologique) ou aigüe. Pour ces raisons, l'absence de réponse aux tests de sensibilité classiques et le manque d'études comparatives nécessitent davantage de recherches pour valider pleinement ce traitement (257).

G. Protocoles

À l'aide notamment des recommandations du Collège National des Enseignants en Odontologie Conservatrice et de l'European Society of Endodontology (248,258), nous proposons un tableau synthétique des protocoles de maintien de la vitalité pulpaire (Tableau IX).

	Coiffage indirect	Coiffage direct	Pulpotomie partielle	Pulpotomie totale
P R E P A R A T I O N	Évaluation clinique et radiologique : poser l'indication			
	Anesthésie			
	Mise en place du champ opératoire			
	Curetage de la dentine infectée, conservation d'une fine couche de dentine affectée au contact de la pulpe	Élimination des tissus cariés résiduels (de la périphérie vers le centre)		
			Amputation sous irrigation de 2 mm de pulpe suspectée enflammée	Ouverture de la chambre pulpaire, élimination de la pulpe camérale et élargissement des entrées canalaire (fraise boule)
	Désinfection avec une boulette de coton imprégnée d'un antiseptique (Chlorhexidine ou Hypochlorite de sodium)			
	Rinçage au sérum physiologique			
	Contrôle de l'hémostase au niveau de l'exposition pulpaire (coton imprégné de sérum physiologique laissé en place 3 minutes) Étape clef du coiffage, car la réussite réside dans le contrôle de l'inflammation.			
	Séchage à l'aide de boulettes de coton stériles			
	C O I F F A G E	Sélectionner le matériau et le préparer selon les instructions du fabricant :		
<ul style="list-style-type: none"> - Hydroxyde de Calcium - IRM (base d'Eugénol) - CVI / CVIMAR - Biocéramique 			<ul style="list-style-type: none"> - Hydroxyde de calcium - MTA - Silicates de Calcium (Biodentine...) 	
S U I V I	Placer le matériau et réaliser l'herméticité en recouvrant la dentine périphérique Respecter le temps de travail pour les ciments et éviter toute compression pulpaire			
	Restauration coronaire étanche (type CVI) afin de restaurer le volume et la fonction. Cette étape peut être supprimée si l'on utilise un ciment silicate de Calcium aux propriétés mécaniques améliorées (biodentine) permettant de réaliser simultanément coiffage et restauration temporaire pendant environ 6 mois			
	Cliché radiographique post-opératoire			
	Suivi radiographique et clinique ⇒ à 6 mois : réaliser la restauration d'usage en préservant un volume suffisant de matériau intermédiaire afin d'éviter toute agression pulpaire durant cette phase ⇒ à 1 an : délai minimum pour une restauration indirecte			

Tableau IX : Synthèse des protocoles opératoires et du suivi pour les différents types de thérapeutiques pulpaires.

2. Catégorie III et IV : conservation de l'organe dentaire

- **Catégorie III** : Pulpes vivantes avec symptomatologie importante
Douleur spontanée de forte intensité, on parlera de pulpite irréversible.
La biopulpectomie suivie d'une obturation radiculaire immédiate est généralement indiquée, pour les dents matures.
- **Catégorie IV** : Pulpes nécrosées avec ou sans complications péri-apicales
Il y a en principe infection de la dentine radiculaire sur ces dents qui exigent un traitement canalaire antiseptique et une obturation radiculaire.

Certaines dents sont candidates au traitement pulpaire non vital, avec un diagnostic de pulpite irréversible ou nécrose déterminées, notamment selon certains signes : antécédents de maux de dents spontanés non provoqués, ganglion, inflammation des tissus mous ne résultant pas d'une gingivite ou d'une parodontite, mobilité excessive non associée à un traumatisme ou à une exfoliation, radioclarité apicale ou furcataire, ou encore résorptions internes / externe (209).

A. Pulpotomie

Voir plus haut.

B. Apexification

a. **Problématique des dents à apex ouvert**

Les dents à apex ouvert sont caractérisées par une absence de constriction apicale. Cela peut être la conséquence d'un arrêt de l'édification radiculaire sur une dent immature nécrosée (carie profonde ou traumatisme), ou d'une résorption radiculaire apicale sur une dent mature (suite à un traumatisme ou une parodontite chronique) (259).

Trois situations sont habituellement rencontrées (14) :

- Si le stade d'évolution radulaire correspond à l'âge dentaire du patient, certaines cellules de la gaine de Hertwig peuvent demeurer vivantes et l'allongement radulaire peut alors s'effectuer de façon physiologique,
- Si le stade d'évolution ne correspond plus à l'âge dentaire du patient, la racine est alors « figée » au stade où la nécrose pulpaire s'est produite,
- L'infection péri-apicale a provoqué une résorption de l'apex. La résorption apicale (externe) est un processus pathologique de destruction partielle ou totale des tissus dentaires, consécutif à une inflammation et/ou un traumatisme (208).

La dent immature présente des caractéristiques anatomiques, physiologiques et histologiques particulières, qui la rendent fragile et particulière à traiter (260).

Lorsque le tissu pulpaire devient nécrotique dans les dents immatures, le pronostic est compromis. Certaines caractéristiques d'un apex ouvert induisent des problématiques lors de l'obturation (260) :

- Difficultés de nettoyage et de mise en forme de grands canaux à apex ouverts
- Augmentation du risque de dépassement de matériaux d'obturation dans la zone péri-apicale du fait de la largeur de l'orifice apical.
- Etanchéité apicale difficile à obtenir
- Les parois canalaire sont fines et fragiles, et sont par conséquent plus susceptibles à la fracture.

L'absence de constriction apicale complique la réalisation d'une obturation étanche du système canalaire. On envisagera donc le recours à l'apexification par formation d'une barrière apicale naturelle et/ou artificielle.

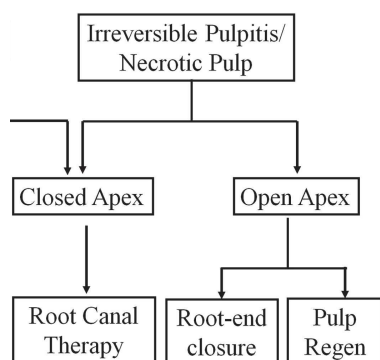


Figure 26 : Processus décisionnel lors du traitement des dents permanentes avec un développement racinaire incomplet (249)

b. L'apexification

L'apexification est définie par le CNEOCE comme « une thérapeutique endodontique effectuée sur une racine à apex ouvert et à pulpe nécrosée, du fait d'une évolution incomplète, d'un évènement iatrogène ou d'une résorption pathologique. Elle vise à induire l'édification d'une barrière apicale minéralisée afin de permettre l'obturation définitive du réseau canalaire confinée dans l'espace canalaire » (261).

Le traitement d'apexification consiste donc en une guérison et une fermeture apicale sans allongement radiculaire, et ce par la formation d'une barrière minéralisée.

Le traitement endodontique classique d'une dent à apex ouvert comporte deux temps : l'apexification, suivie de l'obturation endodontique de la dent.

Quelle que soit la technique utilisée, une étape critique signalée par les articles rencontrés ci-après est la désinfection de l'espace canalaire.

En raison de l'apex grand ouvert et des parois minces, le débridement est effectué principalement par des moyens chimiques. En outre, une détermination précise de la longueur des racines est nécessaire pour assurer un débridement complet du canal et pour confiner les matériaux de traitement dans l'espace canalaire afin d'éviter d'endommager les restes très précieux de la gaine épithéliale de Hertwig.

Cela peut se faire grâce à divers produits :

- L'hypochlorite de sodium (NaOCl) a d'excellentes propriétés de dissolution et d'antiseptie, avec une action pendant le geste. Il semblerait cependant que sa capacité à désinfecter l'espace du canal radiculaire soit incomplète (262,263).
- L'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) peut être utilisé avec un temps d'exposition d'une semaine dans le canal pour compléter la désinfection, après dissolution des restes pulpaire par l'hypochlorite de sodium. Il semblerait en revanche qu'un traitement à long terme dépassant 1 mois entraîne des changements structurels dans la dentine, avec une plus grande sensibilité à la fracture radiculaire (264–266).
- L'utilisation d'antibiotiques a également été documentée (267).
- Le MTAD (mélange tétracycline, acide et détergent) a aussi été décrit comme détergent intra-canalair particulièrement efficace dans la désinfection du système canalaire et l'élimination de la boue dentinaire (268,269).

L'apexification peut se réaliser avec de l'hydroxyde de calcium, du MTA ou encore des nouvelles biocéramiques comme la biodentine.

Traditionnellement, l'approche a consisté à utiliser de l'hydroxyde de calcium pour induire une apexification après désinfection des canaux radiculaires. C'est une base forte avec un pH élevé (environ 12) dont la poudre se dissocie en ions calcium et hydroxyle au contact d'un fluide aqueux, qui vont diffuser dans les tissus péri-apicaux avec une action bactériostatique, créer un environnement favorable à la réparation tissulaire et induire un dépôt de tissus durs (220,270).

Comme dans son utilisation coronaire, l'hydroxyde de calcium a un effet antiseptique et inducteur de tissus minéralisés, avec l'initiation de zones de nécrose de liquéfaction et de coagulation en regard du tissu vital. Cela se traduit par le développement de tissus durs à l'apex (apexification), généralement sous forme de structure de type ciment. L'inconvénient de ce pont minéralisé est la présence de nombreux canaux vasculaires, qui pourraient entraîner une invasion bactérienne.

L'hydroxyde de calcium est placé dans le canal au contact des tissus apicaux et sera ensuite généralement renouvelé tous les 3 mois jusqu'à la formation d'une barrière apicale de tissu minéralisé. La dissolution de ce matériau dépend de la surface de contact avec les tissus péri-apicaux et du degré d'inflammation de ces derniers. Le renouvellement régulier de l'hydroxyde de calcium permet de maintenir un pH élevé au sein du canal permettant ainsi la libération prolongée et régulière d'ions hydroxydes au niveau de la région apicale, et de contrôler l'édification de la barrière apicale. Le temps de traitement dépend donc de la fermeture apicale qui est non prédictible. En effet, la durée moyenne de formation de la barrière apicale est fonction du stade de développement de la dent, de la divergence des parois radiculaires et de la présence ou non de pathologie péri-apicale.

Le canal sera ensuite obturé avec de la gutta percha et un ciment de scellement endodontique.

Il y aurait un taux de guérison moyen de 95% (222,271).

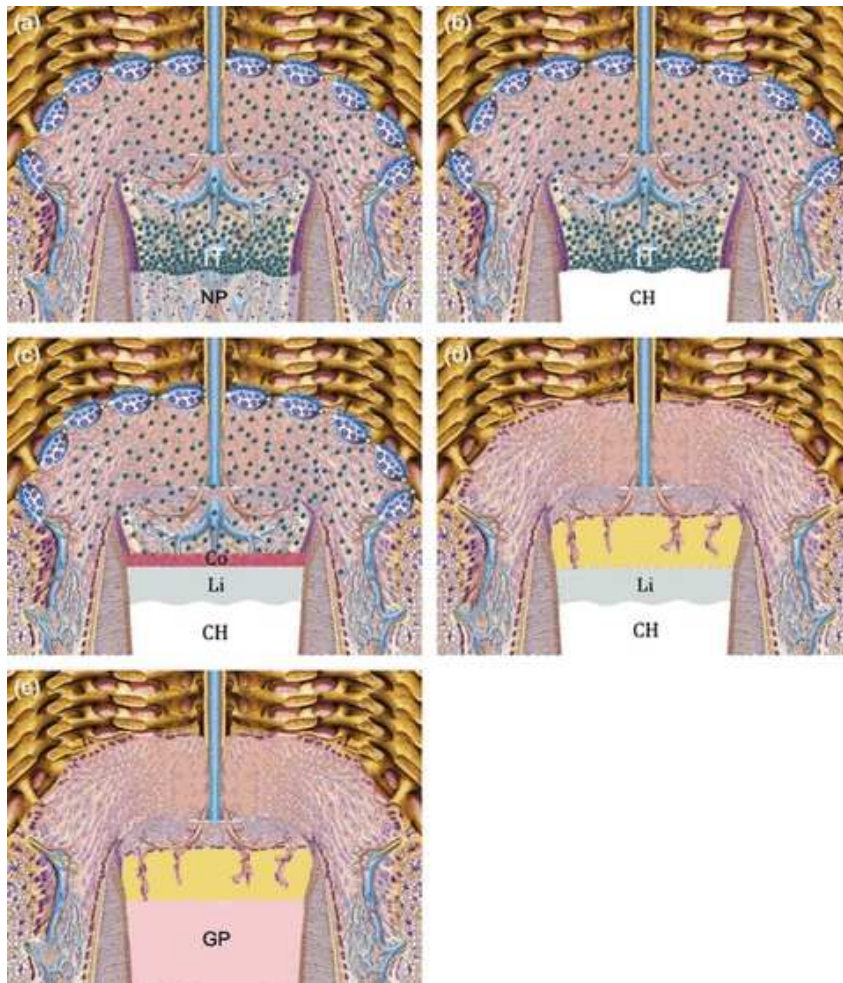


Figure 27 : Apexification à l'hydroxyde de calcium (222).

- (a) Nécrose pulpaire (NP) infectée, et inflammation (IT) dans la partie apicale du canal radiculaire.
- (b) Pansement à l'hydroxyde de calcium (CH).
- (c) Par son pH élevé, l'hydroxyde de calcium provoque la libération de facteurs de croissance, empêche la pénétration bactérienne et induit une zone nécrotique de liquéfaction (Li) et de coagulation (Co) apicale.
- (d) Recrutement de nouvelles cellules, généralement cémentoblastiques mais pouvant être ostéoblastiques, produisant des tissus minéralisés. Au cours de ce processus, des inclusions vasculaires peuvent se produire. Après 6 à 18 mois, une barrière tissulaire dure se forme.
- (e) Situation après obturation à la gutta-percha (GP)

Protocole à l'hydroxyde de calcium :

- Radiographie pré-opératoire : établir le stade d'évolution et préciser la présence ou non d'atteintes péri-apicales.

- Anesthésie : pose du crampon et éventuel dépassement des instruments dans le péri-apex
- Le champ opératoire : asepsie maximale et élimine les risques d'accidents d'inhalation
- La cavité d'accès : bien éliminer tout le tissu pulpaire nécrotique afin d'éviter une dyschromie ultérieurement.
- Évaluation de la longueur de travail
- Débridement du canal radiculaire sans limage excessif des parois radiculaires
- Irrigation à l'hypochlorite de sodium et à l'EDTA
- Assèchement : pointes de papier stériles
- Obturation du canal avec de la pâte d'hydroxyde de calcium :
S'il y a présence d'un écoulement purulent, on laissera la dent ouverte entre 2 et 8 jours afin que le drainage se réalise.

Une fois l'écoulement arrêté, on remplira le canal avec de la pâte d'hydroxyde de calcium à consistance fluide-molle à l'aide d'une lime diamètre 15 ou d'un lentulo et on laissera ce matériau en place pendant une semaine.

- Condensation du matériau, avec des pointes de papier stériles ou des fouloirs de Machtou.
- Radiographie post-opératoire.
- Pose d'une boulette de coton, afin de faciliter la ré-intervention.
- Obturation étanche de la cavité d'accès au CVI

Contrôle :

- 1 semaine : les signes cliniques doivent avoir disparu.
- 2 semaines : contrôle radiographique.

Si l'exsudat est important, l'hydroxyde de calcium est alors renouvelé, longueur de travail moins 1mm pour ne pas léser les cellules de la région apicale.

- 3, 6, 9 semaines, 3, 6 et 9 mois afin de contrôler la densité de l'obturation.
Renouvellement du matériau uniquement si le contrôle radiographique montre son absence dans le canal.

Il faut en général 6 à 12 mois, parfois plus, pour obtenir une barrière apicale.

Quand il y a apparition radiographique de la barrière apicale, il faut vider et désinfecter le canal puis l'obturer définitivement à la gutta-percha.

Suivi radiographique à 2 semaines, 3, 6 et 12 mois, et pendant 4 ans.

Les avantages de cette thérapeutique sont les suivants (260) :

- Taux de succès élevé ;
- Recul clinique important ;
- Technique simple ;
- Peu coûteuse.

Malgré ses résultats positifs dans bon nombre des complications, un certain nombre de lacunes ont été notées en ce qui concerne l'utilisation de l'hydroxyde de calcium (222,249,260,272,273) :

- Temps de traitement variable et long.

La durée d'induction des barrières minéralisées coronaires ou apicales est généralement comprise entre 2-3 mois dans le cas d'un coiffage pulpaire et 6-24 mois dans le cas des procédures d'apexification. La durée du traitement augmente en présence d'une lésion péri-apicale ou d'une symptomatologie pré-opératoire. De telles durées, outre le fait de retarder la fin du traitement, représentent un risque d'échec dans l'observance du patient aux rendez-vous ultérieurs, ainsi qu'un risque augmenté de recontamination bactérienne.

- Pas d'obturation ni de restauration définitive tant que la barrière apicale ne s'est pas formée : il existe un risque de réinfection du réseau canalaire.
- Induction des zones initiales de nécrose pulpaire stérile.

Ces zones représentent la zone de contact entre l'hydroxyde de calcium et le tissu pulpaire vital ; elles peuvent s'infecter ultérieurement par micro-fuite lors de restaurations, entraînant une pulpite et une nécrose pulpaire ultérieure.

- Barrières coronales et apicales incomplètes des tissus durs en raison des inclusions vasculaires. C'est un phénomène qui peut permettre une invasion bactérienne à travers de tels tunnels vasculaires.

La barrière des tissus durs formée par l'apexification à l'hydroxyde de calcium a été décrite comme « semblable au fromage suisse », en raison des nombreuses inclusions de tissus mous, représentant ainsi une barrière très perméable et faible. Cela rend plus délicat le remplissage du canal radiculaire à la gutta-percha et l'obturation (274).

- Risque élevé de fractures, notamment sur les incisives aux parois radiculaires fines, par une diminution des propriétés mécaniques de la dentine lors d'une exposition prolongée à l'hydroxyde de calcium.

L'hydroxyde de calcium entraîne des changements dans la structure physique de la dentine, liés à la perte de composants inorganiques et organiques de la dentine, pouvant conduire assez fréquemment à des fractures cervicoradiculaires.

Le MTA libère immédiatement des ions calcium activant la fixation et la prolifération des cellules pulpaire ou parodontales, tandis que le pH élevé crée un environnement antibactérien. En outre, le MTA module la production de cytokines et encourage la différenciation et la migration des cellules productrices de tissus durs, ce qui entraîne la formation d'hydroxyapatite à la surface du MTA et la création d'un joint biologique (59).

Lorsque le MTA est utilisé comme bouchon apical, il se recouvre de ciment et d'un attachement desmodontal normal (174).

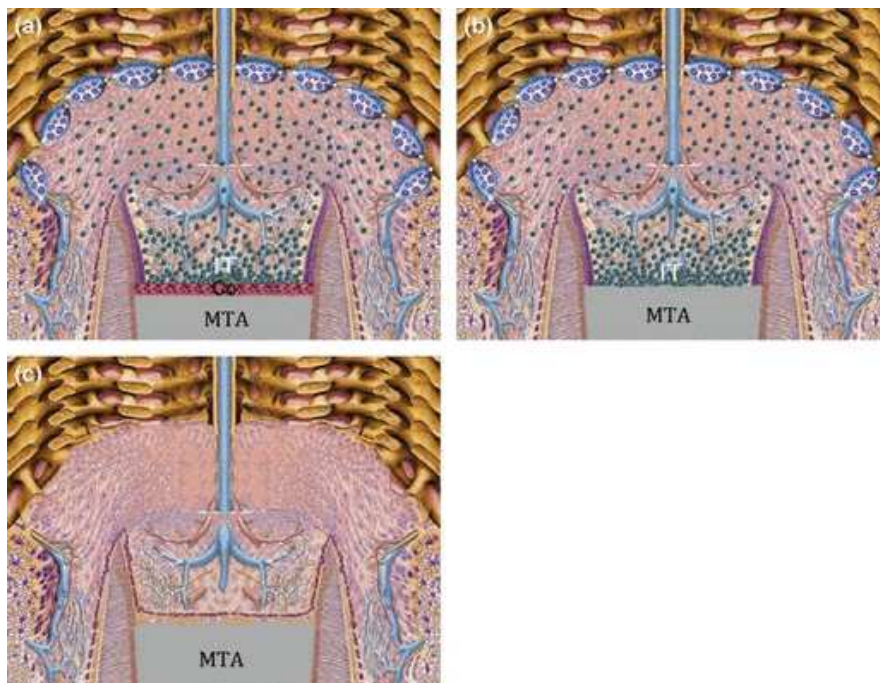


Figure 28 : Apexification au MTA (222)

- (a) Le pH élevé du MTA induit une libération de facteurs de croissance de cicatrisation, ainsi qu'une zone très étroite de nécrose de coagulation (Co). À côté de cette zone, une zone de ciment réparatrice est formée.
- (b) Une liaison physique entre le MTA et la dentine fournit une barrière contre la pénétration bactérienne.
- (c) Par la suite, la barrière des tissus durs est associée à la formation d'une fixation normale desmodontale à la couche de ciment. Le MTA ne doit pas être placé

directement contre une zone contenant du liquide tissulaire inflammatoire car le pH bas empêchera la prise du MTA. Si du liquide est présent, il est judicieux de placer de l'hydroxyde de Calcium pendant une courte période pour « sécher » la zone avant de placer le MTA.

Le bouchon apical au MTA a ensuite été proposé pour les apexifications (174), et l'on a noté une amélioration du développement radiculaire avec un taux de réussite entre 85 et 100% (275–277).

L'induction de la guérison apicale, quel que soit le matériau utilisé, prend au moins 3 à 4 mois et nécessite plusieurs rendez-vous. La compliance des patients peut être médiocre et beaucoup ne reviennent pas pour les visites prévues. L'obturation temporaire peut donc échouer, entraînant une réinfection et une prolongation ou un échec du traitement.

Pour ces raisons, une apexification en une seule visite a été suggérée, permettant de pallier à la majorité des inconvénients de l'hydroxyde de calcium (271).

Le MTA et les silicates de calcium semblent être une option valable pour l'apexification, leur principal avantage étant la vitesse à laquelle le traitement peut être complété, ainsi que leur capacité à induire la formation d'une couche d'hydroxyapatite à leur surface au contact des tissus péri-apicaux.

La technique consiste à créer une barrière apicale minéralisée en plaçant un bouchon apical étanche de ciment type MTA ce qui permettra de réaliser l'obturation définitive une fois le matériau pris. La fermeture apicale par l'édification d'une barrière de tissu minéralisé se fait ultérieurement, à l'interface entre le matériau et les tissus péri-apicaux.

Les principales indications sont :

- Dent immature nécrosée
- Apex résorbé suite à une pathologie apicale
- Diamètres apicaux > 90 mm

Protocole opératoire (222,278):

- Anesthésie et pose du champ opératoire,
- Cavité d'accès et détermination de la longueur de travail

- Nettoyage et désinfection du canal : pas d'instrumentation mécanique ou appui pariétal léger, et hypochlorite de sodium 2,5-3% pendant 3 minutes.
- Rinçage au sérum physiologique pendant 3 minutes
- Séchage avec des pointes de papier stériles.
- Préparation du MTA ou autre biocéramique selon les données du fabricant, qui est amené au niveau de la zone apicale grâce à un porte matériau adapté (ex : MTA Gun®) et est ensuite condensé à l'apex à l'aide d'un fouloir de condensation verticale sur une épaisseur de 3-5 mm (LOT-3 ou 4mm marquée par un stop sur le fouloir)
- Selon les types de MTA, cette prise varie entre 20 minutes (MM MTA®) et 3-4 heures.
Pour les cas de prise lente (supérieure à 20 minutes), une pointe de papier ou une boulette de coton imbibée de sérum physiologique sera placée au contact du MTA avant de mettre en place la restauration coronaire temporaire. Le patient est revu 24h après, la prise du MTA est vérifiée avec une lime ou une sonde puis le système canalaire est obturé.
- Radiographie de contrôle : vérifier la position et l'épaisseur du bouchon.

La revue de la littérature de Bakland et *al.* (222) a rassemblé 8 études cliniques dans lesquelles un taux de guérison moyen de 89% a été trouvé.

En 2011, la meta-analyse de Chala et *al.* (279), le taux de réussite clinique et la formation de barrière apicale ne seraient pas significativement différents entre MTA et hydroxyde de calcium.

En 2016, une méta-analyse de Lin et *al.* (280) a comparé l'efficacité du MTA par rapport à celle de l'hydroxyde de calcium pour l'apexification des dents immatures. Les deux techniques montrent des résultats cliniques similaires. Le taux de réussite clinique, radiographique et de formation de la barrière apicale ne présentent pas de différence significative. Toutefois le temps nécessaire à la formation de cette barrière est significativement inférieur avec le MTA, pouvant se traduire par des taux de réussite globaux plus élevés en raison d'une meilleure observance du patient.

Les avantages du MTA incluent un temps de traitement réduit avec la nécessité de moins de rendez-vous (2 séances rapprochées), une meilleure capacité d'étanchéité que l'Hydroxyde de Calcium, une formation de barrière apicale plus prévisible avec

une plus grande formation de dentine radiculaire induite, ainsi qu'une obturation endodontique et une restauration coronaire rapides (260,281).

De plus, Hatibovic-Kofman et *al.* (282) ont comparé le traitement des racines avec de l'hydroxyde de calcium ou du MTA, et ont montré une résistance à la fracture des racines significativement plus élevée avec l'utilisation du MTA. Une explication serait que le MTA induit l'expression de TIMP-2 et empêche ainsi la destruction de la matrice collagénique.

Cependant, le MTA présente toujours ses limites intrinsèques : difficulté de manipulation, temps de prise long, matériels spécifiques, aide optique importante et coût élevé (260).

De plus, l'inconvénient de cette technique, comme avec l'hydroxyde de calcium, est qu'elle ne concerne que l'ouverture apicale et n'entraîne en principe pas un développement radiculaire complet sur toute la longueur de la racine. Le développement complet des racines nécessite une pulpe viable contenant des cellules qui peuvent se différencier en cellules odontoblastiques productrices de dentine.

Annamalai et Mungara (277) ont cependant publié une étude sur 30 dents immatures non vitales soignées par bouchon apical de MTA Angélus recouvert d'une obturation en gutta-percha. Après 12 mois, ils ont observé un taux de réussite de 100%, avec une fermeture de l'extrémité radiculaire dans 86,6% des cas et une croissance radiculaire dans 30% des cas.

La littérature concernant l'utilisation du MTA pour traiter les dents nécrotiques à apex ouverts résultant d'une résorption apicale est principalement constituée de rapports de cas qui sont d'un faible niveau de preuves cliniques.

L'étude de Yassen (259) permet de tirer trois conclusions concernant le traitement par application orthograde d'un bouchon apical de MTA sur les dents à apex ouverts dû à une résorption apicale :

- Le taux de réussite est de 90%, et 96% des dents étaient entièrement fonctionnelles.
- Le risque d'échec du traitement dans les cas de parodontite périapicale préopératoire était environ quatre fois plus élevé que dans les cas sans parodontite périapicale.

- Il s'agit d'une procédure très opérateur-dépendant : les dents traitées par des endodontistes exclusifs présentent un taux d'échec 75% plus faible que les dents traitées par des omnipraticiens.

En conclusion, les différentes options thérapeutiques pour l'obturation des apex ouverts présentent chacune leurs limites :

- L'apexification par hydroxyde de calcium fragilise les parois radiculaires, et exige un temps de traitement long.
- Le bouchon de MTA offre une option efficace mais d'applications parfois délicates car difficile à manipuler, avec une deuxième séance nécessaire pour réaliser l'obturation définitive après la prise du ciment.

Les nouvelles biocéramiques, comme la biodentine, représentent probablement la solution la plus favorable : avec un temps de prise de 12 minutes, elle permettrait de réaliser cette thérapeutique en une seule séance, de façon plus aisée et avec de très bonnes propriétés.

Le ciment CEM (mélange enrichi en calcium) est un ciment hydrophile et alcalin aux propriétés antibactériennes supérieures à celles du MTA, qui libère de l'hydroxyde de calcium pendant et après la prise, avec une biocompatibilité et une capacité d'étanchéité semblables au MTA, et qui induit une régénération desmodontale, une cémentogenèse et une dentinogenèse. Contrairement au MTA, il est capable d'induire la formation de cristaux d'hydroxyapatite en l'absence de phosphore environnemental, sa manipulation est plus aisée et il présente moins de risque de dyschromie. Il apparaît donc comme une alternative tout-à-fait intéressante au MTA, comme matériau d'obturation apicale en vue d'une apexification (273,283,115,284,285,168).

Bayram et Bayram (286) n'ont observé aucune différence de résistance à la fracture des dents immatures traités par MTA, Bioaggregate ou Biodentine.

Jiang et al. (278) ont comparé les résultats de l'utilisation du MTA et d'iRoot BP® lors de l'apexification de molaires permanentes immatures partiellement nécrosées. Ils ont tous deux produit des résultats comparables, mais iRoot était supérieur en termes de facilité d'utilisation.

C. Revascularisation

L'apexification à l'hydroxyde de calcium et au MTA constitue une thérapeutique classique pour les dents permanentes nécrotiques immatures, qui ont montré de bons résultats au niveau de la formation de barrière apicale calcifiée et de la guérison de la lésion apicale comme nous l'avons vu précédemment. Le premier affaiblit cependant les parois dentinaires, et a tendance à échouer par manque d'observance compte tenu du nombre élevé de séances nécessaires ainsi qu'en raison de la période prolongée durant laquelle la dent est restaurée de manière provisoire ; le second présente des difficultés techniques telles que la manipulation des matériaux et le risque de remplissage excessif.

Avec les deux techniques, le problème de la longueur et de l'épaisseur des racines persiste : le développement radiculaire est interrompu, laissant la dent avec une structure radiculaire fragile aux faibles parois dentinaires, un rapport couronne / racine défavorable, et un risque élevé de fracture et de rupture parodontale, compromettant le pronostic à long terme de la dent (287,288).

L'apexogénèse a pour objectif de préserver le tissu pulpaire vital afin que le développement radiculaire avec fermeture apicale puisse se produire, entraînant le renforcement des parois dentinaires.

Il semblerait que cette attitude puisse également être utilisée au niveau des dents non vitales, afin d'augmenter le pronostic en rétablissant un tissu pulpaire fonctionnel qui favorise la poursuite du développement radiculaire et la compétence immunitaire. Cette procédure est appelée « revascularisation pulpaire » et repose sur la régénération des tissus naturels, notamment sur le recrutement des cellules souches de la papille apicale (SCAP). Elle utilise une combinaison d'antibiotiques et d'irrigants, sans instrumentation des parois canalaire, l'induction de saignements apicaux pour former un caillot sanguin et une fermeture étanche dans le canal radiculaire pour favoriser la guérison (288).

L'objectif est de prolonger le développement radiculaire et l'épaississement des parois canalaire des dents permanentes immatures nécrosées, avec ou sans parodontite apicale (288).

Les tissus formés dans le canal de la dent revitalisée sont minéralisés, de type cémentaire ou osseux, et conjonctifs fibreux. Aucun tissu de type pulpaire (cellules

polarisées odontoblastiques alignées sur un tissu dentinaire) n'a été jusqu'à présent observé (289).

Bien que l'issue des procédures de revascularisation reste quelque peu imprévisible et inconstante, et que la gestion clinique de ces dents soit difficile, elles constituent en cas de succès une amélioration thérapeutique certaine. Les avantages de ces procédures sont très importants et les inconvénients bien faibles, nous orientant vers un changement de paradigme dans la prise en charge des dents permanentes immatures nécrosées : la tentative d'un traitement par revascularisation en première intention, avec la possibilité en cas d'échec d'une apexification au MTA. L'inverse semblant quant à lui impossible. (289)(288)

L'histoire de la revascularisation débute dans les années 60, lorsque Nygaard-Østby rapporte que la formation d'un caillot sanguin dans l'endodonte suite à l'irritation du périapex permet d'obtenir une « cicatrisation » pulpaire (290). Il observe la disparition des signes pathologiques au niveau périapical et, dans certains cas, la fermeture du foramen apical. Après avoir effectué des coupes histologiques, il a pu observer que le caillot sanguin remplaçait progressivement le tissu de granulation, et se transformait à son tour progressivement en tissu conjonctif fibreux. La présence de tissu de granulation entraînait toujours la résorption des parois des canaux environnants, tandis que ce procédé provoquait toujours le dépôt de ciment lorsque le tissu de granulation devenait un tissu conjonctif (291).

Un tissu néoformé peut ainsi être induit dans le tiers apical d'un canal radiculaire de dents permanentes immatures nécrosées présentant une atteinte péri-apicale. Ostby annonce donc que le système vasculaire peut soutenir la croissance de nouveaux tissus dans la partie canalaire non remplie. L'objectif est de réamorcer le processus d'édification radiculaire, donc l'apexogenèse, afin d'allonger et d'épaissir les parois radiculaires, ce qui améliorerait à terme la résistance de la dent (292).

Ce n'est qu'en 2004, puis 2008, que la procédure de revascularisation de la pulpe a été dévoilée au monde par Banchs et Trope, qui l'a décrite et a appliqué la technique dans une deuxième prémolaire inférieure droite à apex ouvert, avec parodontite apicale et présence d'une fistule (293,294). L'irrigation a été réalisée avec de l'hypochlorite de sodium et un caillot de sang a été réalisé, suivi d'un scellement au MTA dans la région cervicale et d'une restauration en résine composite. Une cicatrisation clinique et radiographique a pu être observée après 22 jours. L'auteur a

affirmé que si la revascularisation n'est pas atteinte dans un délai de trois mois, un traitement conventionnel est alors indiqué.

Indications de la technique de vascularisation (295,296) (296,292):

- Apex ouvert : le consensus définit un diamètre du foramen apical supérieur à 1,1 mm.
Certains auteurs ont cependant déterminé qu'une revascularisation était possible à partir de 0,70 mm de diamètre apical (297,298).
- Parois radiculaires fines.
- Sujet jeune (entre 8 et 13 ans) : plus l'individu est jeune, meilleurs sont le potentiel de régénération des cellules souches et la capacité de cicatrisation. Wang et *al.* (299) ont cependant appliqué cette technique avec succès sur une patiente de 39 ans.
- Dents immatures nécrosées, avec ou sans parodontite apicale, ou traumatisées.

Contre-indications (295,296) :

- Dents présentant des signes pathologiques de résorptions
- Patients à risque infectieux ou troubles hémorragiques

Le principe de cette technique consiste à induire la formation d'un caillot sanguin au sein du canal, en provoquant un saignement apical par irritation mécanique du périapex, pour permettre une colonisation cellulaire de l'endodonte. Pour cela, celui-ci doit être vidé de son contenu et désinfecté.

Ce caillot sera alors colonisé par des cellules souches qui participeront à la formation d'un nouveau tissu capable de réamorcer le processus d'édification radiculaire, l'épaississement des parois radiculaires et la fermeture de l'apex. Ces fameuses cellules souches (SCAP) auraient la particularité de rester vivantes même en présence d'une infection majeure du système endodontique.

Les plaquettes sanguines accomplissent plusieurs fonctions essentielles dans l'organisme, y compris la formation de caillots sanguins et la libération de facteurs de croissance de cicatrisation. Ces facteurs de croissance stimulent les cellules souches à produire aussi rapidement que possible de nouveaux tissus chez l'hôte.

Un matériau dentino-inducteur est ensuite placé au contact de ce caillot pour permettre la formation d'une barrière de dentine tertiaire, puis poursuivre l'édification radiculaire (293,294,300).

Protocole opératoire (287,301,302) (292):

1^{ère} étape : désinfection canalaire

- Radiographie préopératoire.
- Anesthésie (avec vasoconstricteur) facultative
- Pose de la digue.
- Cavité d'accès
- Désinfection canalaire à l'hypochlorite de sodium
- Séchage du canal : pointes de papier stériles
- Pose de la médication intra-canalaire : Pâte tri-antibiotique ou hydroxyde de calcium

Les études ne sont toujours pas claires sur le temps nécessaire au médicament pour agir à l'intérieur du canal pour atteindre son objectif. La plage d'utilisation est très variable, allant de 2 à 11 semaines. Il semble que 2 à 4 semaines puisse être une période suffisante.

La désinfection et la pose de la médication intracanalaires sont renouvelées jusqu'à ce que la dent soit devenue asymptomatique.

- Mise en place d'un coton stérile et d'une obturation coronaire provisoire.

2^{ème} étape : bouchon de MTA après 2-4 semaines

- Anesthésie locale sans vasoconstricteur (cela pourrait empêcher le saignement)
- Pose de la digue.
- Elimination de la médication intra-canalaire au sérum physiologique ou à l'EDTA. Le NaOCl et la Chlorhexidine peuvent être cytotoxiques pour les cellules souches et peuvent inhiber leur capacité à adhérer à la dentine, donc l'utilisation d'une solution saline stérile pourrait être plus recommandée dans cette phase. L'EDTA libre expose les facteurs de croissance de la dentine et, étant un agent chélatant, il peut décalcifier la surface du canal radiculaire et exposer les fibres de collagène de la dentine, favorisant ainsi la fixation de nouvelles cellules, tandis que la décalcification de la dentine libère des facteurs de croissance liés qui peuvent attirer de nouvelles cellules et stimuler leur différenciation en cellules aux propriétés de type odontoblaste.

- Séchage : pointes de papiers stériles.
- Saignement provoqué : lime K 10 transfixiant l'apex de 2 mm.
- Temps laissé au caillot sanguin pour se former.
- Éventuellement mise en place d'une matrice de collagène, qui participera au processus de cicatrisation et à la stabilisation du caillot sanguin.
- Pose d'un bouchon de MTA : épaisseur de 3-5 mm en-dessous de la cavité d'accès, au niveau de la jonction amélo-cémentaire, avec une boulette de coton humide à son contact.
- Obturation provisoire de la cavité d'accès

Troisième étape :

- Obturation coronaire définitive après la prise du MTA.
- Cliché radiographique post-opératoire :
Qui permettra de surveiller la diminution de la lésion apicale et d'observer si une élévation radiculaire ou un épaississement éventuel des parois se produit sur les futurs clichés qui seront pris tous les 3 à 6 mois et ce pendant 18 à 24 mois.

Suivi :

- clinique : une absence de douleurs à la palpation et à la percussion.
- radiographique : comparaison avec le cliché post-opératoire de référence à 1, 3, 6, 12, 18 et 24 mois si aucun signe clinique n'apparaît.

La réduction de la lésion apicale peut être prévue entre 6 et 12 mois post-opératoire. L'élévation de la racine et l'épaississement des parois peuvent être prévues entre 12 et 24 mois post-opératoire.

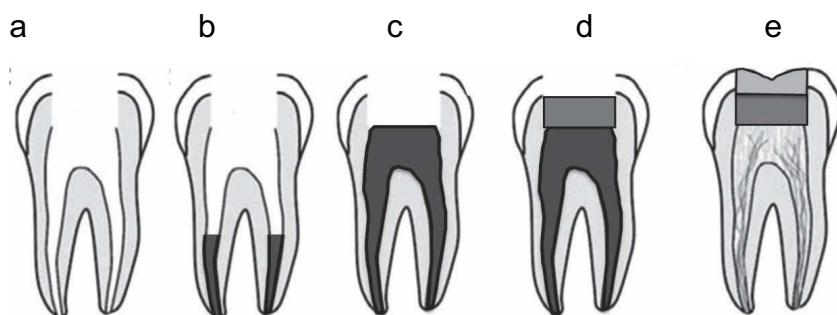


Figure 29 : Représentation schématique du protocole de revascularisation (303).

- (a) Après exérèse du tissu pulpaire,
- (b) un saignement est induit dans les canaux
- (c) et la chambre pulpaire

- (d) puis un matériau est placé dans l'endodonte pour permettre aux cellules de se différencier.
- (e) Un matériau de reconstitution coronaire est ensuite mis en place pour isoler la pulpe régénérée du milieu buccal.

La nature du tissu formé à l'intérieur du canal, probablement conjonctif, reste encore mal identifié.

Certains auteurs, sceptiques concernant l'imprévisibilité de la capacité du nouveau tissu à poursuivre le développement radiculaire, arguent que la seule certitude qu'ils ont est la présence de sang. Il ne pourrait s'agir que d'un tissu conjonctif quelconque, assurant une vitalité au sein de la dent mais dépourvu de toute propriété dentinogénétique.

Pour d'autres, les nouveaux tissus dans l'espace pulpaire ne comprennent pas uniquement les vaisseaux sanguins, mais un tissu conjonctif (pas nécessaire pulpaire) vital ayant des capacités dentinogénétiques (cicatrisation osseuse, apexogenèse, épaissement des parois), et donc proche de la pulpe.

Par ces considérations différentes, il s'agirait pour certains d'une simple « revascularisation » alors que d'autres parlent de « revitalisation » du canal. (38,304–307) (294,308)

Plusieurs hypothèses expliquent les mécanismes de la revascularisation et de l'allongement radiculaire (295,309,310)(311,312) :

- Les cellules souches de la papille apicale (SCAP), très robustes et pouvant survivre aux infections, permettent la maturation des racines. Elles seraient susceptibles de recoloniser un canal, proliférer dans la matrice nouvellement formée et se différencier en cellules odontoblastiques qui joueraient un rôle dans l'organisation des cellules de la gaine épithéliale d'Hertwig. Elles se fixeraient d'une part sur la dentine atubulaire de l'apex, provoquant l'allongement des racines, et d'autre part sur les parois latérales du canal pour renforcer et consolider la racine.
- Les cellules souches de la pulpe dentaire (DPSC) survivantes à la nécrose peuvent reconstruire le tissu pulpaire dans le canal et se différencier en cellules odontoblastiques (de remplacement), contribuant à la maturation de la racine. Ces cellules semblent jouer un rôle important, car elles sont capables de se différencier en les principales cellules responsables de la formation des racines et

de l'angiogenèse (ostéoblastes, odontoblastes, chondrocytes, myocytes et fibroblastes).

- Les cellules souches du ligament parodontal (PDLSC) proliféreraient à l'extrémité apicale et à l'intérieur du canal puis laisseraient un dépôt de tissu dur sur les parois et au niveau de l'apex.
- Le caillot de sang lui-même pourrait être une source de facteurs de croissance et de cellules souches. Il s'agirait de facteurs de croissance dérivés des plaquettes qui pourraient stimuler la différenciation, la croissance et la maturation des cellules en fibroblastes, odontoblastes et cémentoblastes.

Bien que l'absence d'une véritable régénération avec substitution des tissus souhaités ait été observée, l'évaluation histologique des tissus obtenus dans une étude sur des revascularisations de dents nécrotiques immatures de chien a montré que trois types de tissus ont été générés après le traitement, y compris des tissus type cimenteux le long des parois dentinaires responsables de l'épaississement de la paroi radiculaire, des tissus type osseux et des tissus proches du ligament parodontal (305).

Le contrôle des infections semble être crucial pour le succès de la revascularisation de la pulpe.

Il semble que l'utilisation de pâtes antibiotiques ou de l'hydroxyde de calcium a conduit à des résultats satisfaisants dans la revascularisation pulpaire, car elle a aidé à contrôler l'infection, ce qui a conduit à l'augmentation de l'épaisseur des racines améliorant la fermeture apicale. La raison principale de ces résultats satisfaisants est que la revascularisation n'est pas possible en présence de tissu pulpaire nécrotique occupant l'espace canalaire. Une fois l'infection maîtrisée et l'espace canalaire désinfecté, une néoformation capillaire a lieu afin de rétablir le flux sanguin, qui va maintenant nourrir les cellules avec les nutriments appropriés nécessaires à l'homéostasie (313).

Concernant la médication intra-canalaire, il y a encore débat :

- La triple pâte antibiotique (TAP), composée de minocycline, de métronidazole et de ciprofloxacine, est la plus utilisée dans les publications (314,315) (313). Le métronidazole est un nitroimidazolé antiprotozoaire, antibactérien et vermifuge, perturbant l'activité anaérobie (313). La ciprofloxacine a une activité contre un large éventail de bactéries gram-négatives et gram-positives, sans résistance connue de la microflore endodontique. La minocycline est une tétracycline au plus large

spectre, avec un spectre plus large que les autres membres du groupe. Il s'agit d'un antibiotique bactériostatique à action prolongée.

Elle peut cependant être néfaste à la survie cellulaire, notamment sur les cellules souches (316). Les faibles dosages ne montrent pas d'effets néfastes sur la survie des cellules souches mais semblent réduire de manière significative le potentiel de prolifération et de minéralisation des cellules souches pulpaire et de la papille apicale. L'intérêt des pâtes tri-antibiotiques semble remis en cause et il paraît nécessaire de la retirer au maximum des canaux (en cas d'utilisation) avant d'entreprendre la mise en place d'une matrice cellulaire.

La minocycline provoque des décolorations dentaires, la chambre pulpaire pourrait donc devoir être scellée avec un adhésif et / ou un composite fluide pour éviter cet effet indésirable (300,317).

- En cas de sensibilité à l'un des antibiotiques, l'utilisation de l'hydroxyde de calcium a été conseillée (292)(293). Compte tenu de son pH élevé, ce médicament peut détruire les cellules de la papille apicale et des tissus périapicaux qui sont fondamentaux pour le processus de réparation, pourrait être propice à une calcification incontrôlée de l'espace canalaire, empêchant la croissance des tissus mous avec un potentiel odontogène, et peut limiter la possibilité de saignement lors de la deuxième visite.

C'est la raison pour laquelle le Ca(OH)_2 doit être appliqué uniquement dans la moitié coronaire du canal radiculaire, pour permettre un résultat positif, obtenant ainsi les propriétés bénéfiques et limitant les possibles toxicités (318).

L'hydroxyde de calcium s'est avéré efficace dans les procédures de régénération, et des publications récentes préconisent même l'utilisation de l'hydroxyde de calcium pour éviter les inconvénients du TAP, tels que la décoloration, la cytotoxicité, la sensibilisation, le développement d'une résistance et les complications de son élimination du canal radiculaire (287).

Dans l'étude de Bose et al. (319), le groupe TAP a montré l'augmentation la plus élevée de l'épaisseur de la paroi dentinaire par rapport aux autres groupes. Dans le groupe Ca(OH)_2 , lorsque le pansement a été appliqué sur la moitié coronaire de la racine, l'augmentation de la paroi dentinaire était de 53,8%, et lorsqu'elle était placée au-delà de ce point, l'augmentation de l'épaisseur de la paroi radiculaire n'était que de 3,3%. Le groupe formocrésol a montré la plus faible augmentation de l'épaisseur de la paroi dentinaire.

Cette technique remplit les objectifs conventionnels de l'endodontie cherchant à préserver la dent le plus longtemps sur l'arcade : l'élimination de l'infection intracanaire et le rétablissement d'un environnement biologique favorable à la régénération osseuse.

Il est possible de constater une croissance dans la longueur et dans la largeur des racines traitées et parfois même jusqu'à la fermeture complète de l'apex. Certaines dents répondraient même aux tests thermiques et électriques (320).

Dans leur revue de la littérature, Araujo et al. (313) concluent que la revascularisation est une méthode efficace pour l'induction de la maturation dans les dents non vitales avec une formation racinaire incomplète, et aussi que les traitements avec PRP (platelet rich plasma) peuvent potentiellement améliorer et accélérer le résultat biologique souhaité d'une telle technique de régénération.

De plus, cette méthode nécessite peu de séances, et est moins sujette aux réinfections puisque la restauration provisoire ne reste pas en bouche pendant plusieurs mois.

Elle est rentable, techniquement simple, peut être exécuté avec les ressources actuellement disponibles, ne nécessite pas de biotechnologie coûteuse, et échappe au risque de rejet immunitaire et de transmission d'agents pathogènes en appliquant une construction à base de tissus en remplacement de la pulpe.

Néanmoins, cette technique possède également quelques inconvénients, avec notamment le risque d'une coloration. Cette dyschromie peut être causée par le MTA ou bien par la minocycline présente dans la pâte tri-antibiotique. Les antibiotiques peuvent également être à l'origine d'allergies et de résistances bactériennes.

L'édification radiculaire par cémentogenèse ou ostéogenèse, et non par dentinogenèse, pourrait modifier les propriétés mécaniques de la dent. De plus, l'ostéogenèse ou la cémentogenèse intrapulpaires pourraient avec le temps conduire à l'obturation complète du canal radiculaire et compliquer ainsi la réalisation des futurs traitements endodontiques

Cinq types de réponses ont été observées (306) :

- Épaississement des parois canalaire et poursuite de la maturation des racines.
Le résultat de la poursuite du développement radiculaire n'est pas aussi prévisible

que l'épaississement des parois canalaires après les procédures de revascularisation avec une parodontite / abcès apical.

- Pas de poursuite significative du développement radiculaire, avec l'apex racinaire devenu émoussé et fermé.

La poursuite du développement radiculaire des dents revascularisées dépend de la survie de la gaine de la racine épithéliale du Hertwig en cas de parodontite ou abcès apical

- Développement radiculaire continu, le foramen apical restant ouvert.
- Calcification sévère (oblitération) de l'espace canalaire.

Elle pourrait être une complication de la résorption de remplacement interne ou de l'union entre le tissu dur intracanal et l'os apical (ankylose) dans les dents revascularisées.

- Barrière de tissu dur formée dans le canal entre le bouchon coronal MTA et l'apex racinaire.

En utilisant le MTA sur les procédures régénératives dans les études animales, il a fourni un taux de réussite plus élevé pour augmenter la largeur, la longueur et la guérison des racines par rapport à l'apexification et aux matériaux traditionnels (287). Une étude rétrospective de Jeeruphan et al. (321) de 61 cas sur en moyenne 14 mois, a rapporté un taux de survie de 100% pour la revascularisation, de 95% pour l'apexification au MTA et de 77% pour l'apexification à l'hydroxyde de calcium. En outre, le groupe de revascularisation a produit une augmentation significativement plus élevée de la largeur et de la longueur des racines (28,2% et 14,9%) par rapport au groupe d'apexification MTA (0% et 6,1%) ou l'apexification de l'hydroxyde de calcium (1,52% et 0,4%).

Même si les études de résultats à long terme chez l'homme n'existent pas encore, une revue systématique et méta-analyse de 2017 ont rapporté que la revascularisation et l'apexification du MTA avaient des résultats positifs élevés sans différences significatives entre elles, avec respectivement un taux de survie de 97,8% et 97,1%, et un taux de réussite de 91,3% et 94,6 (322).

Les succès secondaires d'une poursuite du développement radiculaire (80%) et d'une fermeture apicale (76%) ont produit des résultats plus variables (287).

Les directives recommandent l'utilisation d'un matériau inducteur de tissus minéralisés et étanche aux bactéries, particulièrement les ciments biocéramiques.

Il a été démontré que le MTA gris offre une étanchéité efficace aux bactéries ainsi que certains cas de décoloration dentaire, tandis que le MTA blanc présentait de très rares cas de décoloration après 12 mois. Une barrière de 3-4 mm de MTA devrait être suffisante pour obtenir l'étanchéité souhaitée (298). Pour surmonter le problème de décoloration, le MTA peut être placé à 2-3mm sous la jonction email-cément ou un autre matériau peut être utilisé (323).

Le MTA est le matériau le plus utilisé pour réaliser ce scellement, mais les nouveaux ciments biocéramiques aux silicates de calcium sont progressivement recommandés. Ils partagent la plupart de leurs caractéristiques avec le MTA mais en affichant moins d'inconvénients en termes de manipulation et d'esthétique. Les nouvelles biocéramiques endodontiques induisent la formation de tissus durs et sont biocompatibles, non toxiques, non résorbables et non affectés par la contamination du sang (324).

La Biodentine pourrait être un choix intéressant, avec sa prise en 12 min environ et sa facilité de manipulation. Une étude *in vitro* sur la prolifération et la différenciation des odontoblastes dans les traitements endodontiques régénératifs a rapporté que le MTA et les matériaux à base de silicate tricalcique induisaient la prolifération des cellules souches de la papille apicale (SCAP), mais la Biodentine a également montré une différenciation de ces cellules (325).

L'Endoséquence RRM (matériel de réparation radiculaire) est un ciment prémélangé, produit sous forme de pâte seringue prête à l'emploi ou de mastic compactable, avec une manipulation particulièrement facilitée par rapport au MTA.

Le CEM (mélange enrichi en calcium) a été proposé comme alternative valable au MTA pour les procédures endodontiques régénératives (326).

Globalement, pour que la régénération se produise dans le complexe pulpo-dentinaire, trois facteurs sont nécessaires (327,328) :

- un environnement permissif dans lequel la régénération peut se produire,
- des cellules capables de sécréter des matrices extracellulaires du complexe pulpo-dentinaire,
- la sécrétion de signaux moléculaires et des interactions cellulaires pour induire la synthèse cellulaire et la sécrétion de nouveaux tissus.

À l'avenir, une plus grande distinction entre la pulpe nécrotique infectée et la pulpite irréversible sur les dents permanentes immatures devrait être établie, car le microenvironnement dans l'espace canalaire et le statut de la papille apicale et de la gaine de la racine épithéliale du Hertwig sont différents (274).

L'utilisation d'un caillot de sang comme échafaudage en endodontie régénérative doit être examinée attentivement car cela pourrait offrir un environnement pour la réparation plutôt que la régénération (329).

D. Régénération pulpaire et ingénierie tissulaire

Bien que les modalités de traitement actuelles offrent des taux de réussite élevés pour différentes indications, une forme idéale de thérapie pourrait consister en des approches régénératives dans lesquelles les tissus pulpaire pathologiques ou nécrotiques sont remplacés par du tissu pulpaire sain pour revitaliser les dents. Le concept traditionnel de remplacement des tissus dentaires / pulpaire malades par des matériaux inertes (de restauration) est donc remis en question par les récents progrès de la biologie pulpaire et de la bioingénierie conduisant à des stratégies visant à générer de nouveaux tissus vitaux.

L'association américaine des endodontistes (AAE) définit l'endodontie régénérative comme « des procédures à base biologique conçues pour remplacer physiologiquement les structures dentaires endommagées, y compris la dentine et les structures radiculaires, ainsi que les cellules du complexe dentino-pulpaire » (208).

La revascularisation/revitalisation pulpaire est une forme d'endodontie régénérative, visant une nouvelle formation de tissus dans la chambre pulpaire, après un contrôle adéquat de l'infection et la formation d'un caillot sanguin.

La société européenne d'endodontie (ESE) a publié en 2016 une prise de position pour affirmer que les procédures de revitalisation des dents immatures nécrosées font désormais partie du spectre du traitement endodontique et devraient être considérées comme une alternative à l'apexification (323).

Cependant, la différenciation d'odontoblastes est encore spéculative, et l'approche est largement limitée aux dents immatures aux apex ouverts.

L'endodontie régénérative va chercher à remplacer la pulpe pathologique, manquante et traumatisée. Ces approches potentielles comprennent donc la revascularisation du canal radiculaire, mais également la thérapie par cellules souches, l'implant pulpaire, l'implant d'échafaudage, l'impression tissulaire tridimensionnelle, les échafaudages injectables, et la thérapie génique.

Ces techniques impliqueront donc l'ingénierie tissulaire, avec l'utilisation des matrices (échafaudages), des cellules (souches) appropriées et des molécules de signalisation pour diriger les événements tissulaires

Bien que les défis liés à l'introduction de thérapies d'ingénierie tissulaire endodontique soient considérables, les avantages potentiels pour les patients et la profession sont également révolutionnaires, offrant la possibilité de restaurer la fonction naturelle. (327)(330).

L'ingénierie tissulaire est un domaine interdisciplinaire qui cherche à restaurer, maintenir ou améliorer la fonction des tissus en appliquant les principes de la biologie et de l'ingénierie (331).

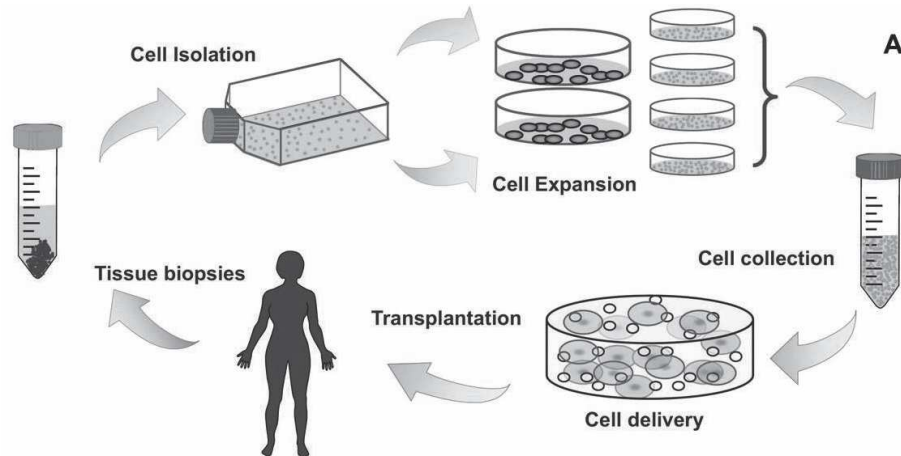


Figure 30 : Représentation schématique de l'ingénierie tissulaire (332).

Le principe est de développer des équivalents tissulaires (« tissue equivalents ») en associant des cellules, un biomatériau et des facteurs biochimiques, de telle sorte que les cellules puissent proliférer et se différencier dans un environnement proche de leur environnement naturel.

Au niveau de la pulpe dentaire, il s'agira de régénérer le tissu pulpaire en implantant dans l'endodonte un biomatériau contenant ou non des cellules.

L'objectif est de recréer un tissu *in vitro* afin d'implanter un dispositif « sur-mesure » chez le patient. Ainsi, l'ingénierie du complexe pulpodentinaire humain aura pour objectif de donner aux cellules ensemencées dans le biomatériau un environnement 3D qui permette la différenciation des cellules centrales en fibroblastes, des cellules périphériques en odontoblastes, et la colonisation de l'ensemble du tissu par les vaisseaux sanguins, les fibres nerveuses et les cellules immunocompétentes, nécessitant une fonctionnalisation par des molécules angiogéniques et neurogéniques.

Dans ce contexte, plusieurs stratégies d'ingénierie de la pulpe dentaire ont été mises en place. Chacune essaie de reconstruire un tissu pulpaire *ad integrum*, une « pulpe équivalente », en associant différents cocktails de molécules bioactives, de biomatériaux et de cellules (327,333–335).

La thérapie à base de cellules souches a été l'une des approches les mieux documentées en médecine régénérative, promettant des remèdes pour une multitude de maladies. Cependant, la culture *ex vivo* des cellules souches et leur *introduction in vivo* sont limitées par la disponibilité des sources de cellules souches, le coût excessif de la commercialisation et les difficultés de réalisation clinique.

Une alternative serait les cellules souches / progénitrices endogènes, pouvant être attirées vers les sites de blessure par des molécules chimiotactiques. De telles options seraient moins coûteuses et complexes que les approches qui nécessitent une manipulation cellulaire *ex vivo* et des véhicules artificiels pour la distribution cellulaire. Appelée homing cellulaire endogène, cette technique utilise le potentiel de régénération endogène pour la réparation des tissus endommagés, reposant sur les réponses tissulaires locales et la stimulation fonctionnelle. Elle fait notamment appel à des échafaudages cellulaires et une technologie basée sur des molécules bioactives pour diriger le recrutement cellulaire et la différenciation (332).

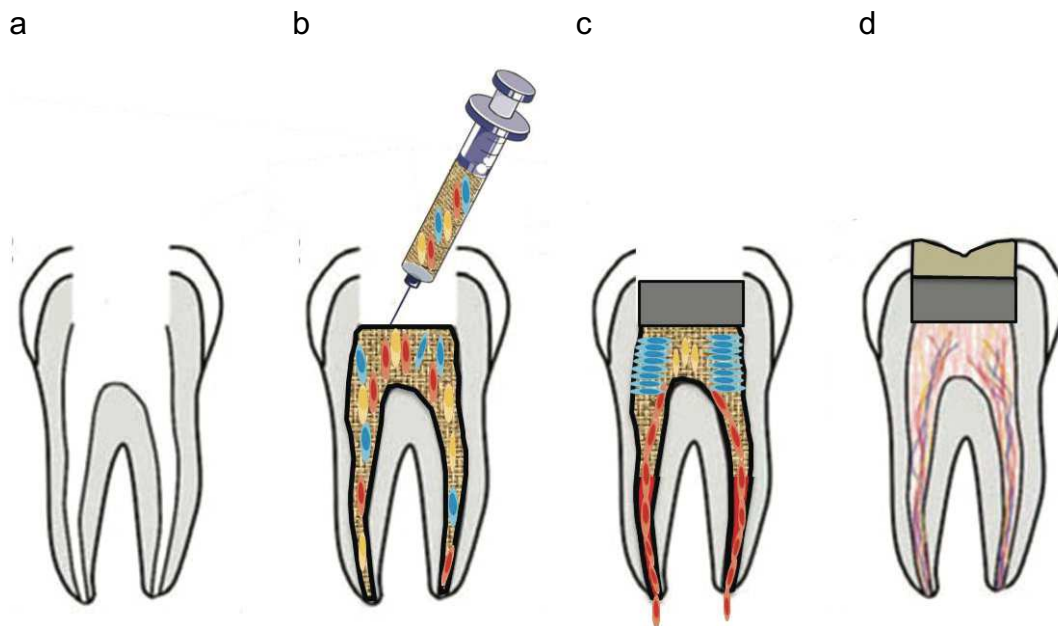


Figure 31 : Représentation schématique du concept d'ingénierie de la pulpe dentaire (303).

- (a) Éviction du tissu pulpaire lésé, désinfection et mise en forme de l'endodonte,
- (b) Implantation d'un mélange de cellules, biomatériau et facteurs de croissance
- (c) Placement d'un matériau dentino-inducteur au contact du mélange injecté pour promouvoir la différenciation odontoblastique.
- (d) Parallèlement à la dégradation et/ou au remodelage du biomatériau, les cellules s'organisent pour recréer un tissu pulpaire fonctionnel vascularisé, innervé, immunocompétent, et capable de former de la dentine au contact du matériau dentino-inducteur.

Une revue de la littérature d'Albuquerque et *al.* (336) a classé chaque article selon trois critères : le type de biomatériau utilisé, les différentes cellules souches et les molécules bioactives.

Plusieurs combinaisons cellulaires permettent de reconstruire une « pulpe équivalente », l'implantation de cellules parodontales entraînant la formation de tissu minéralisé, ou les cellules souches pulpaires conduisant à la régénération d'une pulpe dentaire vascularisée et innervée, par exemple.

Concernant les biomatériaux, les solutions injectables comme les hydrogels semblent être appropriées cliniquement grâce à leur facilité de mise en place dans l'endodonte et à leur biocompatibilité.

Concernant les molécules bioactives, les BMPs, les FGFs ou le SDF-1 apportent une aide intéressante car elles favorisent la différenciation des cellules pulpaire en odontoblastes (336). Leur cinétique de relargage est un élément-clé pour régénérer une pulpe dentaire et non pas un tissu osseux.

Un certain nombre d'études supplémentaires sont nécessaires pour développer des protocoles d'ingénierie tissulaire de la pulpe dentaire (303,330,336).

Néanmoins, l'intérêt des ciments biocéramiques ne fait aucun doute au sein de ces thérapies d'avenir. Ils cumulent en effet tous les avantages recherchés : biocompatibilité, herméticité, action antimicrobienne, propriétés mécaniques, induction de la prolifération et différenciation cellulaires...

Si les études continuent de donner raison aux nouvelles biocéramiques, celles-ci vont être largement employées avec une utilisation facilitée, en tant que matériaux de coiffage de régénération pulpaire.

E. Fracture radiculaire horizontale du tiers moyen ou apical

La fracture radiculaire intra-alvéolaire est une lésion traumatique rare des dents permanentes (0,5–7%) et parmi ces dents, la prévalence de la nécrose pulpaire (généralement limitée au fragment coronaire) est également relativement faible (5–25%).

En 1967, Andreasen et Hjørting - Hansen ont constaté que la nécrose de la pulpe ne se produit généralement que dans le fragment coronaire, tandis que la pulpe du fragment apical reste vitale

La méthodologie semble avoir été décrite pour la première fois par Cvek en 1974, et consistait à placer de l'hydroxyde de calcium dans la partie coronaire de la pulpe des dents fracturées jusqu'à l'obtention d'une cicatrisation périradiculaire et la formation de tissus durs fermant site de la fracture et le canal apicalement, formant une barrière pour réaliser l'obturation à la gutta-percha.

Le résultat bénéfique de l'hydroxyde de calcium est probablement dû à son effet antibactérien et à sa capacité à favoriser la formation d'une barrière minéralisée, facilitant ainsi un remplissage adéquat avec GP.

La fréquence de cicatrisation est de 86%.

Un inconvénient semble être le temps de traitement relativement long qu'il faut pour induire une barrière des tissus durs au site de la fracture, généralement autour de 6 mois (337,338).

L'utilisation du MTA dans les fractures radiculaires n'a encore été décrite que dans quelques rapports de cas, qui ne permettent pas de réaliser une comparaison avec l'hydroxyde de calcium (339–345).

La seule étude publiée, regroupant 19 dents, a uniquement pu conclure en des résultats de guérison satisfaisants après un traitement par MTA. 17 dents (89,5%) ont présenté une cicatrisation, et 2 dents (10,5%) ont montré l'interposition de tissu de granulation sans cicatrisation. Parmi les dents cicatrisées, 7 dents (36,8%) ont montré une cicatrisation avec du tissu calcifié, 8 dents (42,1%) ont montré une interposition de tissu conjonctif et 2 dents (10,5%) ont montré une interposition de tissu conjonctif et d'os (346).

F. Obturation endodontique orthograde

Le traitement endodontique d'une dent consiste en la désinfection du système endocanalair (élimination des produits de dégradation des protéines, des bactéries et des toxines bactériennes), sa mise en forme et son obturation tridimensionnelle assurant l'herméticité à long terme entre l'espace canalair et les tissus périradiculaires (109).

Classiquement, l'obturation est obtenue par l'association d'un cône de gutta percha et d'un ciment jouant le rôle de scellant entre la dent et le cône. La gutta-percha est le matériau d'obturation prédominant en raison de sa biocompatibilité, de sa stabilité dimensionnelle, de sa plasticité lorsqu'elle est chauffée et de sa facilité de retraitement. Si les objectifs n'ont pas changé, la composition de ces ciments a évolué (base d'eugénate, trame résineuse, biocéramiques), et les techniques d'obturations également (mono-cône, compactage à froid puis à chaud...). Les praticiens se sont vus munis d'un arsenal de matériaux et techniques présentant leurs avantages mais aussi leurs inconvénients.

Par ailleurs, l'obturation complète dans toutes les dimensions de l'espace reste un résultat incertain dû à la complexité des anatomies canalaire, notamment avec les ramifications péri-apicales et les canaux latéraux.

Avec l'avènement des ciments biocéramiques, quelle serait la technique d'obturation la plus appropriée pour obtenir ce remplissage tridimensionnel du système endocanalaire ?

Les ciments biocéramiques, de par leurs multiples propriétés physico-chimiques et biologiques, sont tout à fait capables de jouer un rôle d'obturateur canalaire, là où les ciments endodontiques classiques essayaient seulement d'assurer un joint entre la gutta et la dentine radiculaire.

Ces ciments sont hydrophiles. Ils présentent une faible viscosité et un angle de contact très élevé. Ils ont donc une excellente mouillabilité, ce qui leur assure une bonne capacité d'étalement sur les parois canalaire, et donc une capacité élevée de pénétration dans les anfractuosités, même en l'absence de pression hydraulique. Ces ciments présentent aussi une légère expansion de prise (< 0,1 %), ce qui évite la formation de vide lors de leur prise.

Ils peuvent être employés en technique monôcone ou en condensation latérale à froid. Si le MTA Fillapex n'est pas affecté par l'application de chaleur, ce n'est pas le cas pour tous les ciments. Les techniques à chaud sont déconseillées pour ces matériaux à cause de l'évaporation qu'elles entraînent avec l'élévation de la température pour amener la gutta-percha dans sa phase semi-plastique (1,2).

Les ciments sont soit injectés au sein du canal où ils prendront avec l'humidité dentinaire résiduelle (Endosequence BCS ou l'iRoot SP), soit amenés par le cône de gutta après homogénéisation de la poudre et du liquide (BioRoot RCS).

Certains cônes de gutta-percha spécifiques à ces ciments ont été commercialisés. Ils sont recouverts d'une fine couche de biocéramique à laquelle les ciments peuvent adhérer de façon plus efficace.

Protocole :

Une fois le canal préparé et l'excès d'humidité enlevé, le ciment est injecté (formes injectables) ou déposé par le maître cône (formes poudre/liquide) dans le canal jusqu'à ce que des excès commencent à apparaître.

Le maître cône est ensuite recouvert de ciment et inséré lentement au sein du canal. La partie de gutta qui dépasse de l'orifice canalaire est coupée et les excès de ciments éliminés dans la cavité d'accès. Les fabricants recommandent d'utiliser ces ciments biocéramiques à l'aide d'un cône, sans compaction.

La principale limite de l'utilisation unique de biocéramiques pour une obturation endodontique est la difficulté de retraitement. En effet, les limes traditionnelles ont des difficultés à traverser les ciments biocéramiques une fois ceux-ci pris. L'excellente adhésion aux parois dentinaires, associée à une microdureté importante des ciments de scellement canalaire à base de biocéramiques, entraînent des difficultés à retrouver une perméabilité canalaire en cas de retraitement endodontique.

En l'absence de maître cône, l'incapacité à retrouver la perméabilité du canal ainsi que la longueur de travail compromettent le retraitement en empêchant la mise en forme et le nettoyage complets de l'espace canalaire.

Il est donc fortement recommandé d'associer un cône de gutta-percha lors de l'obturation, et de s'assurer que celui-ci atteigne la longueur de travail. De plus, le maître cône facilite l'étalement et la poussée du matériau au sein du canal.

Lors d'un retraitement endodontique, plusieurs paramètres sont évalués :

- la capacité à retrouver la longueur de travail (LT),
- la perméabilité du canal,
- le temps de retraitement.

Hess et *al.* (347), ont comparé le retraitement de 40 molaires mandibulaires obturées selon deux méthodes, soit à la gutta-percha avec AH Plus en condensation verticale à chaud, soit à la gutta-percha avec Endosequence BC sealer en technique monocône, sur des échantillons où le maître cône est ajusté à la LT ou à LT- 2mm. Les canaux étaient ensuite retraités avec du chloroforme, des limes rotatives et manuelles.

La perméabilité apicale n'était retrouvée que dans 80% des cas à la LT (contre 100% avec l'AH Plus), et dans 30% des échantillons du groupe BC Sealer® à LT-2mm (contre 100% avec l'AH Plus).

Cette étude a donc permis de mettre en évidence que les méthodes habituelles (solvants et instruments) de retraitement endodontique ne permettent pas l'élimination complète des ciments à bases de biocéramiques.

Une autre étude (348) comparant le Pulp Canal Sealer et l'Endosequence BC Sealer, sur 64 canines mandibulaires montre que le pourcentage de matériau restant et que le temps de retraitement sont plus élevés avec le ciment biocéramique qu'avec un ciment oxyde de zinc – eugénol.

En revanche, il n'y aurait pas de différence entre ciment biocéramique et ciment à base de résine époxy (AH Plus), que ce soit pour la pénétration dentinaire, la quantité de débris ou le temps de retraitement (349).

Une étude menée par Uzunoglu et al. (350) a analysé le retraitement des ciments iRoot SP, MTA Fillapex et AH-26. Ils ont trouvé qu'il restait plus de débris dans le groupe avec l'iRoot SP. Le temps nécessaire pour atteindre la longueur de travail était significativement plus court pour le MTA Fillapex.

Ce résultat est corroboré par une autre étude d'Oltra et al. (351) démontrant également qu'il restait significativement plus de matériaux dans le groupe avec le ciment biocéramique (Endosequence BC sealer vs AH Plus) et que la perméabilité apicale était plus difficile à retrouver lors de retraitement de dents obturées.

Le retraitement des ciments biocéramiques semble plus difficile que pour les autres ciments. La perte de perméabilité apicale pourrait être expliquée par la capacité du ciment à adhérer à la dentine et à créer des "tag-like structures" de calcium et de phosphate créant une structure inter-liée entre la dentine et le ciment (59).

G. Obturation endodontique rétrograde – chirurgie apicale

La thérapie chirurgicale en endodontie est souvent le traitement indiqué lorsque le retraitement non chirurgical a échoué ou ne peut pas être effectué. Une estimation indique qu'environ 5,5% de tous les traitements effectués impliquent la chirurgie apicale et la réparation des perforations radiculaires (352).

L'endodontie chirurgicale repose sur la résection de 2-3 mm de l'apex, puis une rétro-préparation (aux ultrasons de préférence) jusqu'à une profondeur de 3 mm, suivie de la mise en place du matériau d'obturation radiculaire.

L'objectif est d'éliminer les processus inflammatoires non résolubles avec un abord orthograde, ou les complications iatrogènes au cours du traitement conventionnel.

Le remplissage rétrograde a pour but de sceller le canal, empêchant le passage des micro-organismes et de leurs toxines de l'espace canalaire dans les tissus périradiculaires, et d'encourager la régénération de ceux-ci (353).

Bien plus encore que les matériaux d'obturation canalaire orthograde, les matériaux d'obturation apicale sont placés en contact direct avec les tissus périapicaux vitaux. La réponse tissulaire à ces matériaux est donc primordiale et peut influencer le résultat d'un traitement chirurgical endodontique.

Le dépôt de ciment en surface de la racine coupée est considéré comme une réponse de guérison souhaitée et une condition préalable à la reformation d'un attachement parodontal fonctionnel. Le ciment fournit un « sceau biologique », en plus du « sceau physique » de l'obturation apicale, créant ainsi un « double sceau ».

Cette réponse peut être étudiée à plusieurs niveaux, c'est-à-dire en utilisant des cellules et des tissus d'animaux, des études animales et des observations d'enquêtes cliniques portant sur la pertinence du matériel (91).

Théoriquement, le matériau d'obturation apicale devrait posséder trois caractéristiques principales (144)(354):

- Biocompatible : non toxique, non irritant, non corrosif, non décolorant, stimulant la régénération du parodonte, avec des propriétés antimicrobiennes.
- Fournir un joint étanche entre les tissus pulpaire et périradiculaire : dimensionnellement stable pendant la prise, non soluble avec l'humidité et dans

les liquides tissulaires, non résorbable dans le temps, capacité d'adhésion à la dentine.

- Faciliter le traitement et l'évaluation des résultats : bonne manipulation, temps de travail adéquat, temps de prise court (pour réduire le risque de lavage) et radio-opacité.

Presque tous les matériaux de restauration disponibles (feuille d'or, gutta-percha, amalgame, résine composite, ciment carboxylate, CVI, Super EBA, IRM...) ont été préconisés comme matériau d'obturation radiculaire à un moment donné de l'histoire dentaire, avec chacun leurs inconvénients (91).

Le MTA était le matériau de choix utilisé pour l'obturation rétrograde, du fait de son excellente capacité d'étanchéité, de régénération des tissus périradiculaires et de sa biocompatibilité, par rapport aux matériaux d'obturation rétrograde traditionnels.

En effet, des études de cytotoxicité ont montré sa supériorité par rapport à l'amalgame, l'IRM, le Super EBA, le CVI et la gutta percha (191,355,356).

Les ciments biocéramiques ont la propriété de former de l'hydroxyapatite ce qui assure un joint hermétique avec la dentine et le ciment, empêchant le passage de bactéries et de toxines dans les tissus péri-apicaux. Les études sur les fuites de colorants et de bactéries ont montré que le MTA présentait une meilleure étanchéité que l'amalgame, le Super EBA et l'IRM (74,53,357,75,358).

La régénération tissulaire et l'apposition de ciment n'a été observée qu'avec le MTA, tandis que la néoformation osseuse a été observé avec les quatre matériaux (76,359).

Dans la revue systématique de Tang et *al.* (360), le MTA a montré des taux de réussite significativement plus élevés que l'amalgame, la gutta-percha et la résine composite, mais aucune différence significative n'a été trouvée par rapport à l'IRM ou au Super EBA.

Malheureusement, le MTA présente encore des inconvénients, avec principalement son temps de prise long (2h15 au minimum) qui est une préoccupation clinique car il peut disparaître avant de prendre.

Une autre préoccupation concerne sa manipulation : le mélange sableux granuleux obtenu est difficile à livrer sur le site opératoire et à condenser de manière adéquate (358).

Parmi les nouvelles biocéramiques, la Biodentine est caractérisée par des propriétés mécaniques et un comportement mécanique similaires à ceux de la dentine humaine, et possède d'excellentes propriétés d'étanchéité sans préparation dentaire. Bien que ce matériau soit conditionné en capsule et ait un mélange homogène, la biodentine reste un matériau difficile à utiliser. La biodentine a un temps de prise de 12 min (selon le fabricant) qui est encore long par rapport aux autres matériaux de restauration classiques (69).

L'Endosequence RRM est disponible sous forme de pâte ou de mastic. Il a des propriétés physiques similaires à celles du MTA une fois durci mais possède des propriétés de manipulation bien meilleures (361).

Des études *in vitro* montrent une capacité de scellement comparable de la biodentine, ERRM, BioAggregate, CEM et iRoot BP Plus par rapport au MTA (117,362–366).

L'étude de Shibori et *al.* (367) portant sur la chirurgie apicale de 113 dents avec de l'Endosequence RRM a obtenu un taux de réussite de 92%.

Aucun facteur ne semble avoir eu d'effets significatifs sur le résultat : l'âge, le sexe, la position des dents, le volume de la lésion périapicale, les symptômes préopératoires et le retraitement avant la chirurgie.

En fait, trois facteurs principaux peuvent grandement contribuer aux résultats de la chirurgie endodontique (354):

- La capacité d'éliminer les canaux latéraux et les ramifications apicales qui ne peuvent pas être nettoyés et obturés par des moyens orthogrades. Bien que l'habileté des cliniciens soit primordiale, les outils contemporains de visualisation, de nettoyage et de préparation des cavités rétrogrades ont une importance non négligeable.
- Les facteurs pronostiques dentaires : les lésions et les kystes plus volumineux impliqueraient des pronostics significativement inférieurs, bien que certaines études se contredisent.
- La mise en place d'une obturation rétrograde qui remplit toutes ou la plupart des propriétés d'un matériau d'obturation radiculaire idéal peut contribuer aux résultats du traitement.

Le développement de la microchirurgie endodontique, avec l'utilisation d'ultrasons et d'un microscope opératoire, a considérablement amélioré les résultats du traitement. Auparavant, une fraise ronde en carbure était utilisée pour la résection radiculaire avec un biseau raide à 45 degrés, afin d'observer l'extrémité radiculaire pendant la chirurgie. Cependant, cette résection diagonale de la racine causait des dommages importants et une grande ostéotomie était nécessaire (368). Les techniques contemporaines aux ultrasons qui coupent avec un biseau minimum ont montré des résultats cliniques nettement meilleurs que les fraises chirurgicales traditionnelles (369). Parallèlement, le microscope opératoire améliore considérablement la précision et la prévisibilité et a permis d'utiliser la « microchirurgie endodontique » comme terme de substitution (370).

Setzer et *al.* ont réalisé 2 méta-analyses, avec pour résultats :

- Le taux de réussite avec l'utilisation de techniques micro-chirurgicales endodontiques (94%) est très significativement supérieur par rapport à la chirurgie endodontique traditionnelle (59%) (371).
- En pratiquant la chirurgie apicale contemporaine avec des micro-instruments, l'usage d'un endoscope ou microscope opératoire (94%) présente un taux de succès significativement supérieur à l'utilisation de loupes ou aides optiques (88%) pour les molaires, sans différence significative pour les prémolaires ou dents antérieures (372).

Ainsi, il est évident que la cause des échecs ou des succès chirurgicaux n'est pas uniquement associée au type de matériaux d'obturation radiculaire.

3. Communications endo-parodontales

A. Communications iatrogènes (perforations)

La perforation radiculaire est une complication qui peut survenir lors de la thérapie canalaire. Bien que les caries ou les processus de résorption puissent provoquer des perforations, la plupart des perforations radiculaires sont iatrogènes (85). Une perforation, quel que soit le lieu ou l'étiologie, altère de façon significative le pronostic du traitement endodontique (60).

Les facteurs importants pour déterminer le succès d'une procédure de prise en charge de perforation seraient l'emplacement de la perforation, le laps de temps entre l'apparition de la perforation et la réparation, la capacité du matériau à sceller le site de perforation et sa biocompatibilité en raison de son contact intime avec le parodonte (85).

Mente et *al.* (373) ont analysé le traitement au MTA de 64 perforations radiculaires sur 12 ans, observant 86% de guérison, avec une bonne capacité d'étanchéité à long terme du MTA, quel que soit l'emplacement.

Ils ont identifié 2 facteurs pronostiques potentiels, mais qui n'ont montré aucun effet statistiquement significatif : l'expérience des praticiens et le placement d'un tenon après le traitement.

Sousa Reis et *al.* (374) n'ont observé aucune différence dans la réponse au traitement de perforation inter-radiculaire entre MTA Angelus et Biodentine.

Jeevani et *al.* (375) ont observé que l'Endoséquence présentait une meilleure capacité d'étanchéité dans la réparation de la furcation de molaires mandibulaires en comparaison avec le MM MTA et la Biodentine.

B. Communications pathologiques (résorption)

Selon l'American Association of Endodontists, une résorption est un état associé à un processus physiologique (dents temporaires) ou pathologique (dents permanentes) provoquant une perte de tissu dentinaire, cémentaire ou osseux (208).

Un diagnostic précoce et un traitement approprié peuvent prévenir ses complications allant jusqu'à la perte de la dent.

Le processus de résorption pathologique correspond à une interaction entre les cellules inflammatoires, les cellules résorbantes (ostéoclastes, odontoclastes ou dentinoclastes) et les tissus durs. Elle est initiée par une lésion des tissus non minéralisés recouvrant la surface externe de la racine (précément) ou la surface interne du canal radiculaire (prédentine). La transformation des cellules précurseurs en cellules clastiques est induite par les cytokines, dont l'interleukine-1 β qui joue un rôle pivot (376).

Parmi les diverses études, la classification d'Andreasen est largement acceptée : elle partage les résorptions entre interne (de remplacement et inflammatoire), externe (superficielle, de remplacement, inflammatoire ou cervicale) ou combinée (377).

La résorption externe est un processus pathologique de destruction partielle ou totale des tissus dentaires, consécutif à une inflammation et/ou un traumatisme. Elle est plus courante que la résorption interne et est souvent confondue radiographiquement avec elle.

La résorption interne est rare (0,1 à 1,6%) et entraîne une dystrophie de la pulpe qui conduit à la destruction des tissus durs. Une fois détectée, elle doit être traitée le plus tôt possible pour limiter sa progression.

Habituellement, le processus est asymptomatique et diagnostiqué lors d'un examen radiographique de routine (376,378–380).

Une prise en charge réussie de la résorption radiculaire implique un diagnostic précis. Celui-ci devrait à présent être réalisé à l'aide du CBCT, qui permet de réaliser une observation tridimensionnelle, présente des images précises de haute résolution spatiale isotropique et a une sensibilité et une spécificité élevées dans la détection des lésions inflammatoires et de résorption (381,382).

La résorption interne nécessite la suppression de l'approvisionnement en sang supportant ce défaut de résorption ; le processus devrait cesser, à condition que cela puisse être réalisé efficacement.

La résorption radiculaire externe est plus compliquée à traiter, nécessitant soit une stimulation des processus naturels de réparation en éliminant les agents étiologiques ; soit une réparation artificielle impliquant le curetage du défaut et la mise en place d'un matériau de réparation approprié ; soit une résection partielle ou complète (383).

La thérapie combinée impliquant une extrusion orthodontique est utile dans certains défauts de la région cervicale.

L'insertion d'une restauration appropriée dans la cavité de résorption est d'une importance capitale, mais le traitement ne doit pas être instauré en l'absence d'avantage thérapeutique ou lorsque le processus cesse naturellement avec l'élimination de la cause initiale (384).

Pour la prise en charge de ces cas, il est essentiel d'inactiver le tissu résorptif avant la mise en place interne d'un matériau de restauration (385).

Le traitement à l'hydroxyde de calcium de la résorption radiculaire externe inflammatoire a fait ses preuves, et est capable d'arrêter 98% des résorptions sur dents luxées et 90% dans les dents avec réimplantation intentionnelle (386,387).

Les intérêts de l'hydroxyde de calcium sont toujours l'inhibition des enzymes bactériennes, les effets antimicrobiens, l'activation des enzymes tissulaires comme la phosphatase alcaline et l'induction de la minéralisation. Les inconvénients restent l'exigence d'une longue durée de traitement, la nécessité de séances de remplacements et l'affaiblissement de la structure dentaire au long terme (388,389).

Le MTA a évidemment été envisagé, car il présente une action similaire à l'hydroxyde de calcium, doublée de caractéristiques physiques favorables.

Les biocéramiques peuvent être placées en contact permanent et étroit avec le tissu parodontal : bioactivité, biocompatibilité ainsi que propriétés mécaniques proches de la dentine, elles peuvent ainsi être utilisées comme substitut dentinaire.

Une étude expérimentale chez le singe montre que le MTA utilisé une semaine après la réimplantation intentionnelle pourrait dans une large mesure prévenir la résorption inflammatoire. Le traitement au MTA n'a pas présenté de différences significatives avec l'hydroxyde de calcium (390).

Zare Jahromi et Kalentar Motamedi (391) ont comparé en 2019 l'hydroxyde de calcium et le MTA dans le traitement des résorptions radiculaires inflammatoires et de remplacement, mais n'ont pas pu tirer de conclusions autres que les modalités d'utilisation intéressantes du MTA.

Par rapport au MTA, les nouvelles biocéramiques se manipulent facilement, nécessitent beaucoup moins de temps pour la prise et n'entraînent pas ou peu de décoloration dentaire ou gingivale.

Que la résorption se soit étendue d'une lésion externe pour toucher la surface interne ou vice versa, une lésion perforante est créée.

La résorption inflammatoire externe est un processus inflammatoire progressif, et le principal facteur expliquant son maintien est la pulpe nécrotique. La présence de résidus tissulaires de pulpe nécrotique ou de bactéries dans les tubules dentinaires attire un grand nombre d'ostéoclastes au niveau du site. Par conséquent, la résorption progresse de façon continue jusqu'au canal radiculaire qui est finalement exposé. Dans les cas sans perforation, l'exérèse et la réparation du site de perforation avec un

matériau d'étanchéité approprié devraient être suffisants. Cependant, dans les cas où une voie entre le canal et les tissus parodontaux sont présents, un traitement canalaire doit également être effectué (383).

À propos d'une résorption interne de remplacement perforante, Subay et al. (392) préconisent une médication intra-canalaire à l'hydroxyde de calcium pendant 3 mois, suivie d'une obturation au MTA du canal et de la perforation.

Mehra et al. (393) ont présenté 3 rapports de cas de résorptions radiculaires, traitées de trois différentes manières :

- Résorption interne non perforante :
 - CaOH₂ pendant 2 semaines
 - Obturation unique à la gutta-percha chaude
- Résorption interne perforante :
 - CaOH₂ pendant 4 semaines
 - Obturation de la perforation au MTA Angelus
 - Obturation canalaire à la gutta-percha chaude le jour suivant
- Résorption externe perforante :
 - CaOH₂ pendant 4 semaines
 - Obturation de la résorption à la Biodentine
 - Obturation canalaire au MTA Fillapex + gutta-percha

VI. ENQUÊTE D'ÉVALUATION DES PRATIQUES PROFESSIONNELLES PORTANT SUR LES CONNAISSANCES ET L'UTILISATION DES BIOCÉRAMIQUES ENDODONTIQUES

1. Objectifs de l'étude

Nous avons réalisé une enquête afin de dresser un état des lieux des connaissances et pratiques professionnelles sur les biocéramiques endodontiques.

2. Matériel et méthodes

A. Questionnaire utilisé

Vous êtes :

- Etudiant (années cliniques uniquement)
- Praticien libéral / salarié du secteur privé
- Praticien hospitalier

Nombre d'années de pratique :

Quelle faculté (la plus proche pour les praticiens) :

- Brest
- Bordeaux
- Clermont-Ferrand
- Lille
- Lyon
- Marseille
- Montpellier
- Nancy
- Nantes
- Nice
- Paris V
- Paris VII
- Reims

- Rennes
- Strasbourg
- Toulouse

Utilisez-vous des biocéramiques endodontiques :

Si oui, laquelle / lesquelles :

- Biodentine
- BioRoot RCS
- MTA Angelus
- MTA Repair HP
- MTA Fillapex
- ProRoot MTA
- ProRoot Endo
- TheraCal
- TotalFill BC RMM
- TotalFill BC Sealer
- iRoot SP
- iRoot BP (Paste)
- iRoot BP Plus (Putty)
- BioAggregate
- iRoot BP FS
- Calcium-enriched Mixture (CEM) cement
- Autre :

Lesquelles connaissez-vous

- Biodentine
- BioRoot RCS
- Endocem MTA
- Endocem Zr
- Endoseal MTA
- Harward MTA Caps
- MTA Angelus
- MTA Repair HP

- MTA Fillapex
- MTA Plus
- ProRoot MTA
- ProRoot Endo
- TheraCal
- TotalFill BC RMM
- TotalFill BC Sealer
- iRoot SP
- iRoot BP (Paste)
- iRoot BP Plus (Putty)
- BioAggregate
- iRoot BP FS
- Calcium-enriched Mixture (CEM) cement
- Autre :

Quelles procédures endodontiques connaissez-vous :

- Coiffage indirect
- Coiffage direct
- Pulpotomie partielle
- Pulpotomie totale
- Apexification
- Obturation endodontique orthograde
- Obturation rétrograde / chirurgie apicale
- Traitement des communications endo-parodontales (perforations, résorptions)
- Revascularisation

Pour quelles procédures endodontiques utilisez-vous les biocéramiques endodontiques :

- Coiffage indirect
- Coiffage direct
- Pulpotomie partielle
- Pulpotomie totale
- Apexification

- Obturation endodontique orthograde
- Obturation rétrograde / chirurgie apicale
- Traitement des perforations
- Traitement des résorptions
- Revascularisation
- Aucune

Quels sont les intérêts des biocéramiques endodontiques, selon vous :

- Propriétés physico-chimiques
- Propriétés biologiques
- Facilité d'utilisation
- Coût
- Retraitement
- Taux de réussite
- Reproductibilité
- Raison technique (organisation au cabinet, ...)
- Autre :

Vous pouvez argumenter ici :

Quels inconvénients voyez-vous aux biocéramiques endodontiques :

- Propriétés physico-chimiques
- Propriétés biologiques
- Facilité d'utilisation
- Coût
- Retraitement
- Taux de réussite
- Reproductibilité
- Raison technique (organisation au cabinet, ...)
- Autre :

Vous pouvez argumenter ici :

Que savez-vous des données de la littérature scientifique ?

Est-elle en faveur des biocéramiques pour toutes les procédures endodontiques, et dans quelles mesures (dent permanente immature, résorption pathologique...) ?

Prévoyez-vous de développer votre utilisation des biocéramiques endodontiques ?

- Oui
- Non

Pour quelles raisons ?

Si vous souhaitez recevoir le résultat de cette enquête, veuillez indiquer ici votre mail :

B. Critères d'inclusion et d'exclusion des praticiens inclus dans l'étude

Ce questionnaire s'adressait à l'ensemble des praticiens en chirurgie dentaire de France, qu'il s'agisse des chirurgiens-dentistes libéraux, salariés du secteur privés, praticiens hospitaliers ou étudiants (externes et internes) ayant une activité clinique. Les étudiants hors cycle clinique ou les autres professions du secteur dentaire non susceptibles d'être en rapport avec les biocéramiques (orthodontistes, assistantes dentaires, prothésistes) n'ont pas été invités à répondre à cette enquête.

C. Diffusion du questionnaire

Ce questionnaire a été diffusé sur internet via Google Forms, sur différents groupes de réseaux sociaux rassemblant les praticiens en chirurgie dentaire (Amicale des étudiants en chirurgie dentaire de Strasbourg, Dentistes de France, Chirurgiens-Dentistes de France, Professionnels de la Santé Bucco-Dentaire – PSBD, Pédiodontistes de France, [France] Dentistes...), mais également par contact direct auprès des praticiens.

Les réponses ont été recueillies entre le 5 mars 2020 et le 23 mars 2020.

D. Analyses statistiques

Les données ont été organisées dans une feuille de calcul Excel, où l'utilisation de tableaux croisés dynamiques a permis de tirer les divers résultats suivants.

3. Résultats

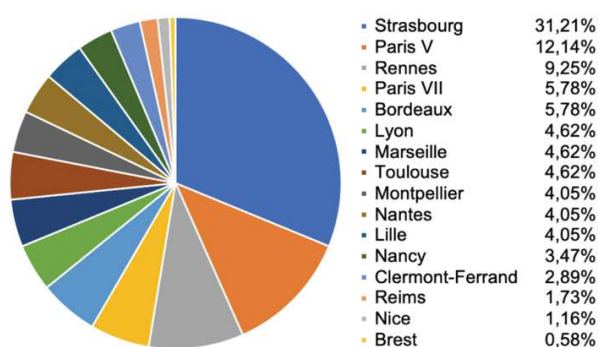


Figure 1 : Répartition des sondés selon la faculté d'origine.

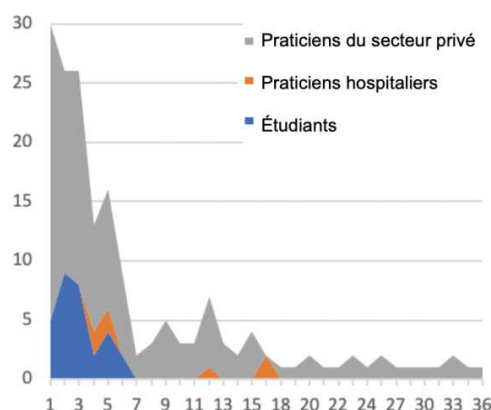


Figure 2 : Répartition des sondés en fonction du nombre d'années de pratique

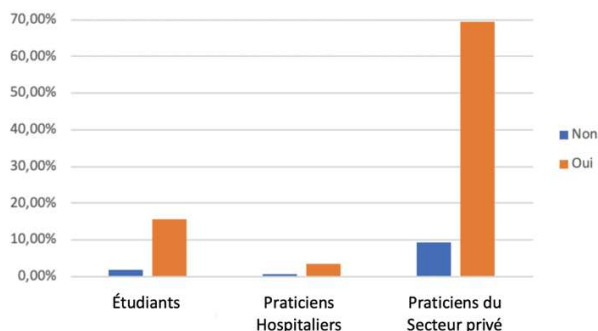


Figure 3 : proportion d'utilisateurs de biocéramiques en fonction de la catégorie des sondés

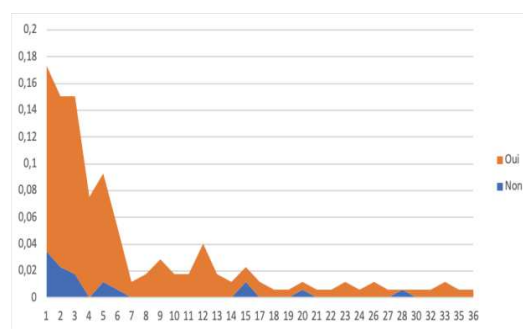


Figure 4 : répartition des sondés en fonction du nombre d'années de pratique selon leur utilisation ou non des biocéramiques

Les produits biocéramiques les plus utilisés par les praticiens sont la Biodentine (94,1%), BioRoot RCS (35,9%), TheraCal (13,1%), ProRoot MTA (10,5%), TotalFill BC Sealer (6,5%), MTA Angelus, MTA Repair HOP et Neo MTA (3,9%), MTA Fillapex (3,3%), TotalFill BC RMM (2,6%) et ProRoot Endo (1,3%).

Les sondés connaissent davantage de produits qu'ils n'en utilisent, puisqu'un plus grand nombre déclare connaître Biodentine (99,4%), ProRoot MTA (90%), Bioroot RCS (35,9%), MTA Plus (29,5%), MTA Fillapex (27,2%), TheraCal (24,9%), TotalFill BC sealer (24,3%), ProRoot Endo (20,2%), MTA Angelus (17,3%), MTA Repair HP (16,8%), Endoseal MTA (15,6%), TotalFill BC RMM (10,4%), Endocem MTA (7,5%), Bioaggregate (4,6%), Harward MTA Caps et CEM cement (4%), iRoot SP (2,9%), Endocem Zr, ijRoot BP et iRoot BP Plus (1,2%).

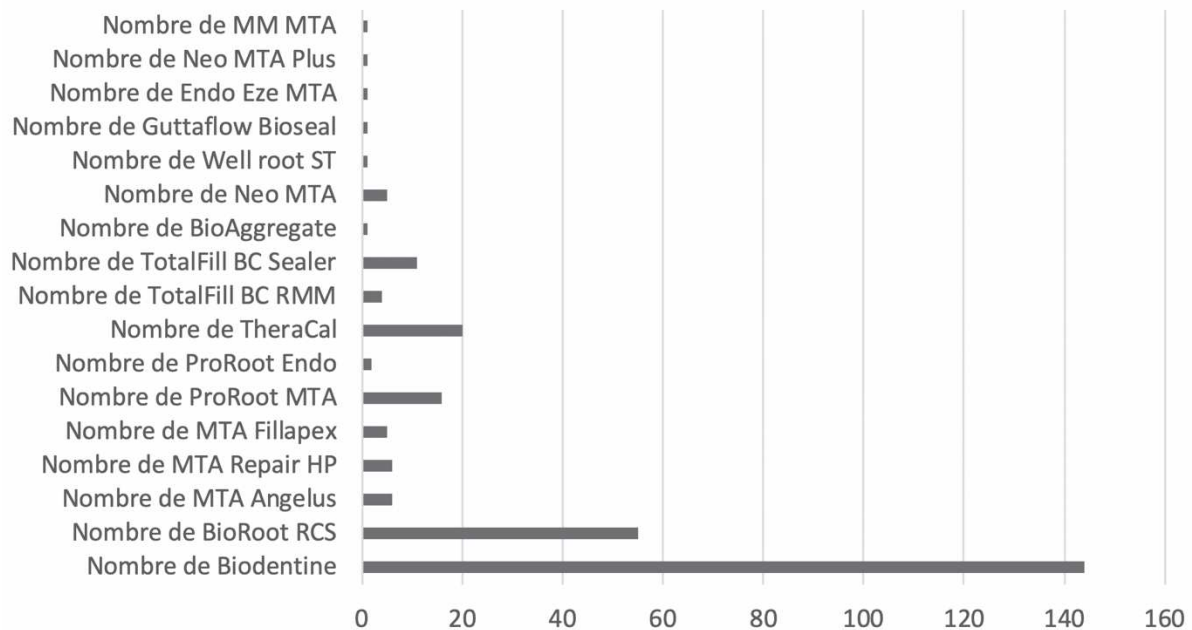


Figure 5 : Produits biocéramiques utilisés par les sondés

Les sondés connaissent certaines procédures endodontiques correspondant à des indications de biocéramiques mieux que d'autres : coiffage indirect (98,8%), coiffage direct (99,4%), pulpotomie partielle (90,8%), pulpotomie totale (96%), apexification (88,4%), obturation endodontique orthograde (87,3%), obturation rétrograde (69,4%), traitement des communications endo-parodontales telles que perforation ou résorption (75,1%), revascularisation (56,1%).

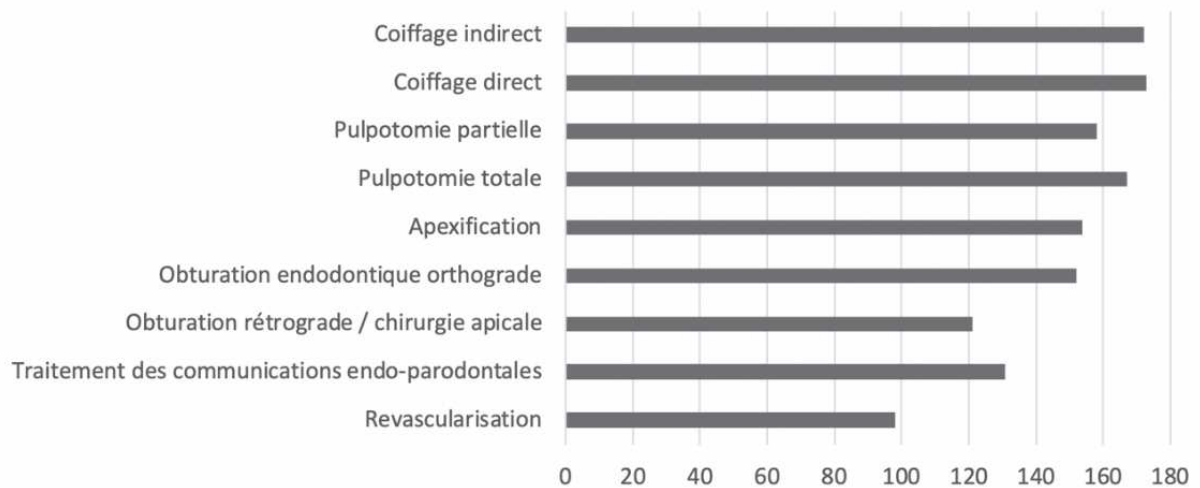


Figure 6 : Procédures endodontiques connues des praticiens correspondant à une indication d'utilisation de biocéramique

Les sondés utilisent les biocéramiques de façon inégale selon ces procédures endodontiques : coiffage direct (89,6%), pulpotomie partielle (60,1%), pulpotomie totale ou traitement des perforations (57,2%), coiffage indirect (52%), apexification (38,2), traitement des résorptions (30,6%), obturation endodontique orthograde (28,9%), obturation rétrograde ou revascularisation (12,7%).

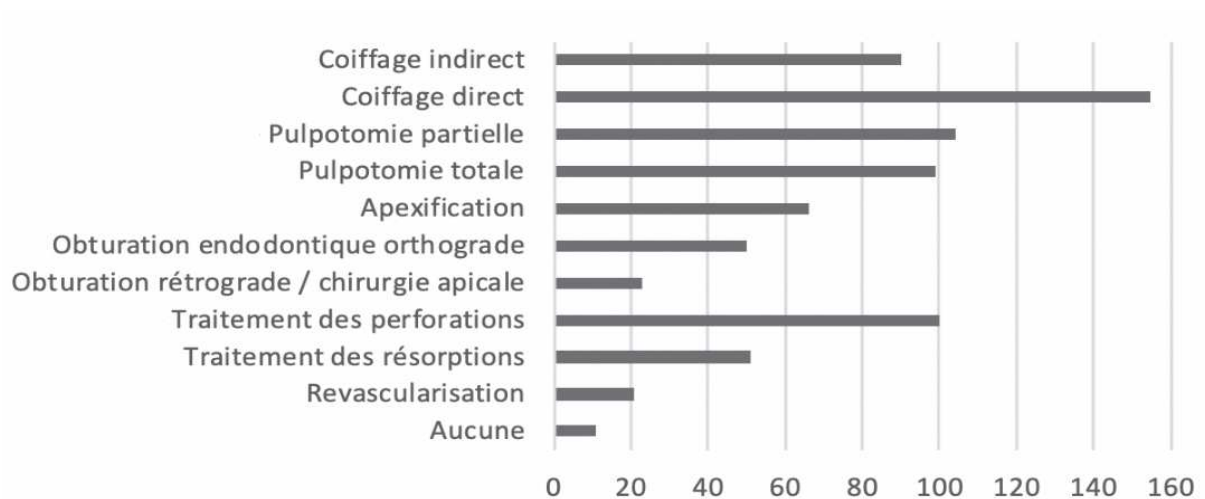


Figure 7 : Nombre de sondés utilisant les biocéramiques pour chaque procédure endodontique

Nombreux sont ceux qui associent biocéramiques et intérêt de la préservation de la vitalité pulpaire, avec une diminution des biopulpectomies et la volonté de conserver

de facto l'hydratation de la dent et son innervation. Les praticiens répondant ont relevé l'avantage d'un même produit pour plusieurs indications, avec un protocole opératoire simple. Plusieurs praticiens inclus dans l'étude soulignent que la facilité d'utilisation dépend des présentations et des fabricants.

Tandis que certains présentent les biocéramiques comme un gold standard actuel dans tous les traitements endodontiques, d'autres les trouvent plutôt utiles quand il n'y a plus d'autre solution.

Beaucoup relèvent un meilleur taux de succès, le peu d'échecs avec le recul, l'expérience positive sur retraitements et/ou LIPOE sévère, ou encore les résultats excellents sur le long terme dans les coiffages directs/indirects.

Ils relèvent les qualités d'un matériau basique au moment de la prise et hydrotolérant, biocompatible, très compact, avec une pose rapide et une forte adhésion, étanche et rentable.

La simplicité et fiabilité de la technique monocône grâce aux biocéramiques est également soulignée, bien que certains estiment que c'est un matériau difficile à manipuler en pulpectomie.

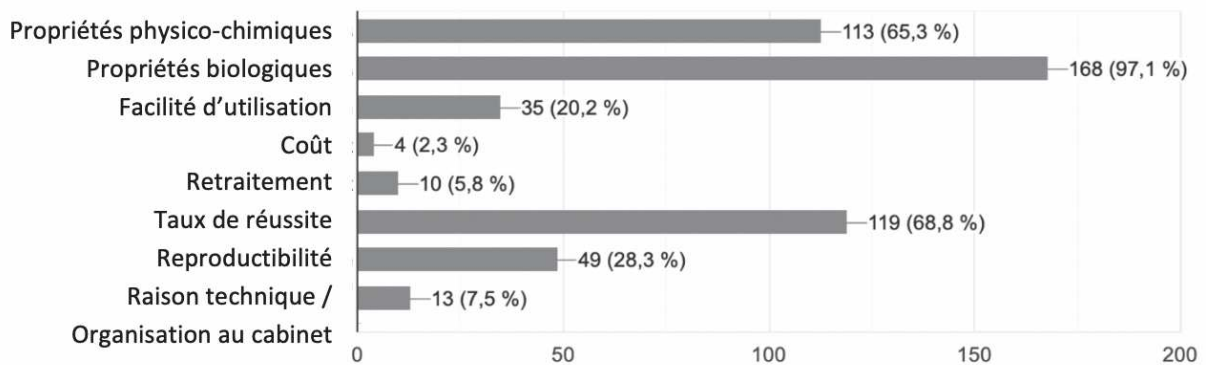


Figure 8 : intérêts des biocéramiques selon les praticiens

L'inconvénient le plus souvent relevé est le coût important du matériau, non rentable par rapport à la rémunération accordée. La chronophagie de l'acte, long à mettre en œuvre et avec un temps de prise long (particulièrement difficile pour une application pédiatrique), entre également en compte, pouvant s'ajouter à un manque de garantie quant au résultat clinique et radiologique à long terme.

Un nombre important de praticiens décrit le problème de l'ergonomie, la consistance et la manipulation du matériau : texture aléatoire, reproductibilité difficile dans le

dosage poudre/liquide (MTA, Biodentine/Bioroot, etc), systèmes pré-dosés ne permettant pas l'utilisation de quantité ajustée, proportions suggérées par le fabricant pas toujours pertinentes pour avoir une consistance utilisable, pénibilité à mettre en place ou difficulté à positionner le matériau avec précision sur les expositions pulpaire, consistance finale très dure entraînant des difficultés pour effectuer un traitement endodontique ou un RTE secondairement. Un praticien déclare qu'il préfère le TotalFill Putty pour les apexifications, mais qu'il sèche très vite et qu'il a eu deux cas de bouchons qui ont durci au milieu du canal en moins de 5 minutes et qu'il a dû adresser à un endodontiste exclusif. Un autre praticien rapporte également des difficultés d'utilisation en apexification avec le NeoMTA. Un dernier explique qu'en cas de besoin de retraitement endodontique, même s'il y a présence d'un cône de gutta, on peut difficilement enlever tout le ciment des parois pour libérer les tubulis infectés, et lorsque le ciment arrive à l'apex mais pas la pointe de gutta il est impossible de retraiter le canal entièrement.

De plus, la radio-opacité est jugée perfectible, avec la difficulté d'évaluation de la qualité du traitement à J0.

La courbe d'apprentissage importante est également regrettée, notamment dans le cas de praticiens en première année post-fac ne se sentant pas capables de faire un bouchon de MTA pour apexification sur une dent immature même s'il connaît la théorie. Un étudiant salarié explique qu'il est difficile de faire changer les organisations pour avoir les produits adaptés aux différentes situations cliniques et indications spécifiques.

Un autre praticien, lui, explique qu'il n'y voit pas vraiment d'inconvénients, et qu'il a tellement l'habitude de les utiliser que même les timings sont inclus dans sa pratique.

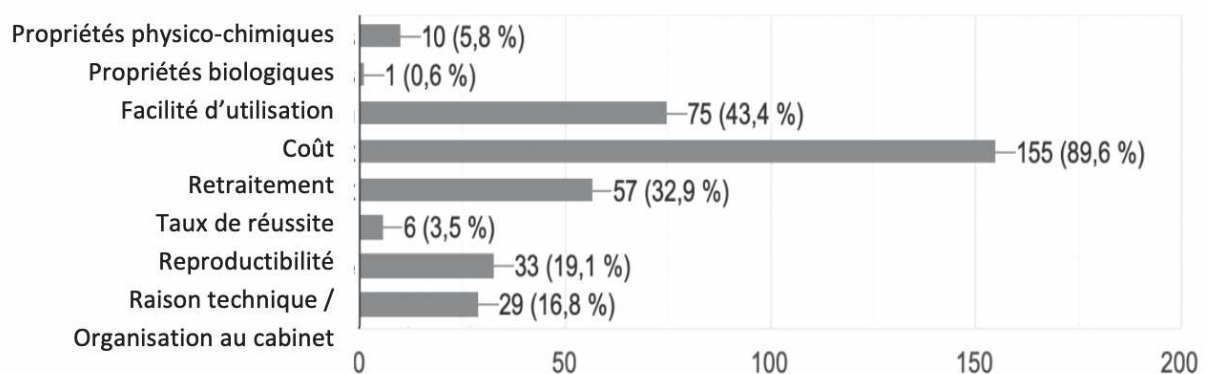


Figure 9 : Inconvénients des biocéramiques selon les praticiens

La littérature est parfois présentée comme favorable aux biocéramiques dans toutes les procédures endodontiques, peu importe la dent, parfois uniquement pour certaines combinaisons d'indications propres à chacun.

Plusieurs praticiens écrivent que la littérature est en faveur des biocéramiques versus hydroxyde de calcium, tandis qu'un praticien tempère en déclarant qu'il n'y a pas encore assez de recul clinique, mais que ce sont des matériaux biocompatibles très prometteurs.

Un praticien expose le fait que la littérature met souvent en avant la Biodentine et le MTA, avec des indications et des résultats similaires. Un autre pense plutôt que la preuve de l'apport des biocéramiques est encore difficile à affirmer totalement, mais qu'il n'y a pas de preuves non plus d'une moindre efficacité. Un dernier présente les nouvelles bioceramiques (type biodentine) comme le meilleur matériau pour coiffage pulpaire direct mais manquant de recul par rapport aux autres matériaux plus anciens, tandis que le MTA serait le gold standard pour obturation apicale sur dent immature et obturation des perforations. Plusieurs praticiens semblent se contenter de savoir qu'elles sont recommandées par Stéphane Simon.

Un étudiant raconte en entendre parler dans tous les chapitres en odontologie conservatrice-endodontie, traitement rétrograde, coiffage, revitalisation, résorption.

Un des répondants explique que les nouvelles biocéramiques présentent des taux similaires au MTA mais avec un acte en un temps opératoire, temps de travail plus long mais moins opérateur-dépendant par rapport à d'autres matériaux, avec un énorme intérêt malgré le coût et le manque de simplicité des protocoles de préparation (Bioroot notamment). FKG BC sealer, bien que plus cher, serait plus pratique (injection), et permettrait un gain de temps tout en étant moins opérateur-dépendant en technique monocône que la condensation latérale classique.

Un certain nombre de praticien relève la biocompatibilité (notamment la très bonne réponse de la pulpe à son contact), la stimulation des cellules souches pour permettre une réparation tissulaire, la bonne étanchéité et les propriétés mécaniques proches de la dentine qui en font un très bon substitut.

Les praticiens inclus voient l'intérêt dans les biocéramiques de la création rapide de pont minéralisé dans les cas de conservation de la vitalité pulpaire et pour l'apexification des dents immatures. Pour les traitements endodontiques elles permettent une obturation tridimensionnelle avec un ciment qui ne sera pas perméable dans le temps.

Globalement, on peut considérer que les retours d'expériences sont très positifs et que beaucoup y voient la possibilité du maintien de la vitalité pulpaire. Nous pourrions penser qu'elles sont perçues comme une alternative intéressante aux techniques traditionnelles plus délabrantes et invasives.

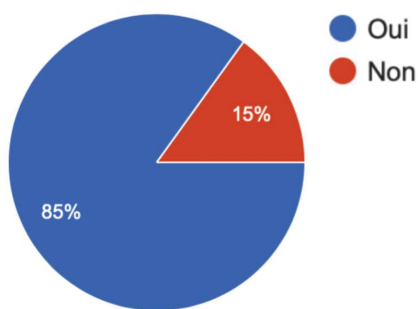


Figure 10 : proportion de praticiens souhaitant développer leur utilisation des biocéramiques ou non

De multiples raisons motivent les praticiens à envisager de développer leur utilisation des biocéramiques : rechercher l'économie tissulaire, favoriser le maintien de la vitalité pulpaire et améliorer le pronostic de conservation des dents (démarche encouragée par le récent remboursement du coiffage direct), obtenir une meilleure biocompatibilité que les ciments résineux ou eugénate, réaliser des traitements de meilleure qualité et un meilleur taux de réussite, respecter le gradient thérapeutique et suivre les données acquises de la science, rester moderne.

Certains avouent ne pas aimer réaliser les traitements endodontiques, et y voient donc l'intérêt évident de sauver la pulpe et d'éviter ce type de traitements. D'autres praticiens complètent cette logique en expliquant qu'on pourra toujours réaliser une technique conventionnelle si l'utilisation des biocéramiques échoue. Beaucoup y voient une solution pour la prise en charge des perforations, des DPI ou encore des lésions apicales importantes.

Tandis que certains praticiens s'y intéressent afin d'élargir les indications de leurs traitements et leur arsenal thérapeutique ou pour proposer des soins de meilleure qualité, d'autres s'en détournent en déclarant n'avoir pas assez de connaissances ni de formation sur le sujet, en préférant adresser pour les procédures endodontiques qu'ils ne savent pas réaliser. Quelques-uns n'envisagent pas de développer d'avantage leur utilisation des biocéramiques car ils les utilisent déjà suffisamment (un praticien évoquant notamment le trio Bioroot – Biodentine – Theracal).

Tandis que certains y voient un bel avenir où la compétitivité sur le marché des fournisseurs permet des tarifs qui deviennent attractifs, d'autres pensent à l'inverse que l'aspect médico-économique et le coût constituent les principaux freins à une utilisation plus large des biocéramiques.

Enfin, certains déclarent qu'au vu du taux de succès et de la popularité grandissante sur les réseaux sociaux notamment des biocéramiques, ils comptent s'intéresser davantage à la littérature sur ce sujet. Un dernier praticien déclare que ce questionnaire lui a donné envie de développer ses connaissances et son utilisation des biocéramiques endodontiques.

4. Discussion

Les 173 réponses recueillies présentent une répartition relativement équilibrée concernant la faculté d'origine, si l'on excepte Strasbourg (31%), dont les ressortissants se sont naturellement sentis davantage concernés par mon travail.

Si 153 répondants ont déclaré utiliser les biocéramiques, cela ne signifie évidemment pas que 88% des praticiens en France utilisent les biocéramiques endodontiques, mais que 88% des praticiens qui se sont intéressés à cette enquête sont utilisateurs de biocéramiques.

Nous pouvons donc envisager que les connaissances des professionnels sur ce sujet sont probablement inférieures à celles observées dans cette enquête, du fait que les réponses proviennent aux deux tiers de jeunes praticiens (dont la formation est récente), et à 88% de praticiens utilisant eux-mêmes ces matériaux.

Il est intéressant de noter que le secteur privé (88%) et le secteur publique (90% pour les étudiants, 86% pour les praticiens hospitaliers) ne présentent pas de différence significative dans l'utilisation des biocéramiques (Figure 3).

Il semblerait que l'âge (le nombre d'années de pratique) des sondés n'aie pas d'influence sur l'utilisation ou non des biocéramiques, avec une proportion apparemment indépendante de l'ancienneté des praticiens (Figure 4). Nous n'avons cependant pas assez de données pour pouvoir confirmer ou infirmer cette idée.

La formation continue et la communication professionnelle auprès des praticiens longuement installés ne paraissent pas moins efficaces que l'information apportée dans la formation initiale concernant les biocéramiques.

Nous observons que les deux produits biocéramiques les plus utilisés par les praticiens sont la Biodentine (94,1%) et le BioRoot RCS (35,9%), tous deux commercialisés par la société française Septodont (Figure 5).

Par ailleurs, il y a exactement autant de sondés (35,9%) qui déclarent connaître BioRoot RCS que d'utilisateurs de BioRoot RCS. Soit le marketing effectué par les commerciaux est particulièrement efficace, soit les praticiens ont réellement trouvé leur intérêt dans cette nouvelle biocéramique pour les obturations endodontique.

On retrouve un ratio très favorable à l'autre produit phare de Septodont, la Biodentine, que 163 praticiens (94,1%) utilisent parmi les 172 (99,4%) qui le connaissent.

À l'inverse, tandis que 90% déclarent connaître ProRoot MTA, seuls 10,5% l'utilisent.

Il est étonnant que seuls 151 répondants (87,3%) déclarent connaître la procédure d'obturation endodontique orthograde (Figure 6), ce qui traduit plutôt la méconnaissance de ce terme (procédure souvent nommée abusivement « traitement endodontique », « traitement radiculaire », etc...) que l'ignorance de la procédure elle-même.

Il en est probablement de même pour d'autres termes, comme les « communications endo-parodontales » qui regroupe ce que nombre de praticiens appellent classiquement « perforations » et « résorptions ».

Nous pouvons penser que les praticiens n'appliquent pas tous leurs connaissances sur les procédures endodontiques, ou en tout cas qu'ils n'utilisent pas les biocéramiques pour les appliquer (Figures 6 et 7).

Tandis que les procédures de coiffage, pulpotomie et traitement des perforations restent relativement bien représentées, nous pouvons observer qu'un bien plus faible nombre de répondants utilisent les biocéramiques pour l'obturation orthograde et rétrograde, pour le traitement des résorptions ou pour les revascularisations.

Si nous ne pouvons pas douter de la réalisation courante de traitements endodontiques orthogrades en cabinet (pour lesquels les biocéramiques ne seraient encore que peu choisies), nous pouvons penser que les autres actes pour lesquels les biocéramiques sont peu utilisées sont peut-être tout simplement des actes peu réalisés par les praticiens inclus dans l'étude. Leur faible utilisation ne serait que la traduction de leur faible pratique, et non de leur faible utilité par rapport à d'autres matériaux. Il aurait ainsi été intéressant de connaître le pourcentage de praticiens effectuant réellement chaque procédure, afin de connaître la proportion d'utilisation des biocéramiques plutôt que la proportion d'utilisateurs pour chaque procédure.

Bien que cela ne traduise pas le pourcentage d'utilisation des biocéramiques pour ces procédures, les praticiens ne pratiquant peut-être tout simplement pas ces procédures moins représentées, ces résultats nous permettent toutefois de comprendre que le coiffage direct est extrêmement lié à l'utilisation des biocéramiques, et que les pulpotomies partielles/totales et le traitement des perforations requièrent les biocéramiques dans plus de la moitié des réponses. Au travers de leur utilisation dans ces procédures courantes, l'action bioactive et régénératrice pulpaire des biocéramiques semble avoir convaincu un grand nombre de praticiens, cette classe de matériaux ayant probablement permis de démocratiser la préservation pulpaire. En revanche, la faible utilisation des biocéramiques observée pour les autres indications pourrait être le signe d'une moindre importance portée aux propriétés régénératrices osseuses (obturation rétrograde ou traitement des perforations) ou aux capacités d'obturation physico-chimique (obturation orthograde).

Les sondés s'accordent à penser que les points forts des biocéramiques sont leurs propriétés biologiques (97,1%) et physico-chimiques (65,3%), ainsi que leur taux de réussite (68,8%).

À l'inverse, leurs principaux défauts sont le coût (89,6%) et le problème du retraitement (32,9%).

Enfin, les avis sont partagés (y voyant un point fort pour certains, un point faible pour d'autres) concernant la facilité d'utilisation (20% contre 43%), la reproductibilité (28% contre 19%) ou encore l'organisation au cabinet (7,5% contre 16,8%).

5. Conclusion

Cette enquête rassemble 173 praticiens, qui sont soit étudiants (17%), soit praticiens hospitaliers (4%) ou du secteur privé (79%). Il s'agit majoritairement de jeunes praticiens et près de 9 sondés sur 10 sont utilisateurs de biocéramiques, ce qui nous laisse penser qu'il s'agit probablement de participants mieux informés que la moyenne des praticiens français.

Il n'apparaît aucune réelle distinction dans l'utilisation des biocéramiques selon que les praticiens proviennent du secteur privé ou publique.

Au sein d'un panel relativement large de produits connus, il semble que les nouvelles biocéramiques soient très majoritairement préférées au MTA, où l'on peut notamment citer la Biodentine qui est utilisée par neuf fois plus de praticiens que le ProRoot MTA. Nous avons pu observer que les deux produits les plus utilisés par les praticiens sont la Biodentine et le BioRoot RCS, tous deux commercialisés par la société française Septodont, avec un rapport très favorable entre connaisseurs et utilisateurs de ces produits (respectivement environ 94,7% et 100%). À l'inverse, seuls environ 11,7% des praticiens connaissant le ProRoot MTA l'utilisent.

Les praticiens ont un recours aux biocéramiques très différent suivant les procédures endodontiques : tandis qu'elles sont requises à 89,6% pour le coffrage direct, elles ne sont utilisées que par 57,2% des sondés pour les pulpotomies totales ou le traitement des perforations, par 28,9% pour l'obturation endodontique orthograde, ou en encore par 12,7% à des fins d'obturation rétrograde ou de revascularisation.

Nous serions tentés d'y voir un intérêt des praticiens porté aux biocéramiques principalement pour leurs propriétés bioactives permettant le maintien de la vitalité

pulpaire, plutôt que pour leurs propriétés de régénération parodontale ou d'obturation physico-chimique.

Il ressort de cette enquête que les principales qualités que voient les praticiens dans les biocéramiques sont leurs propriétés bio-physico-chimique, leur taux de réussite, la possibilité de préserver la vitalité pulpaire, les multiples indications pour un même produit, l'hydrotolérance et l'étanchéité.

Les principales limites relevées sont le coût, le retraitement difficile, la chronophagie, la radio-opacité perfectible et la courbe d'apprentissage à suivre.

Enfin, les avis sont partagés concernant la facilité d'utilisation, la reproductibilité ou encore l'organisation au cabinet, certains y voyant tantôt un avantage, tantôt un inconvénient.

La distinction entre MTA et nouvelles biocéramiques (type Biodentine) semble bien claire pour de nombreux praticiens. En revanche, la position de la littérature quant aux données objectives et aux indications semble beaucoup plus vague pour la plupart, qui déclare davantage s'informer sur les réseaux sociaux ou se baser sur les avis d'experts que se renseigner dans les revues spécialisées.

Il n'empêche que la majorité exprime les principes avantageux des biocéramiques, à savoir la basicité, l'hydrophilie, la stimulation des cellules souches réparatrices, l'étanchéité par liaison, la légère expansion de prise, ou encore les propriétés mécaniques proches de la dentine.

85% des sondés souhaitent développer leur utilisation des biocéramiques, pour de multiples raisons : économie tissulaire, maintien de la vitalité pulpaire, améliorer le pronostic de conservation des dents, meilleure biocompatibilité, élargir les indications et l'arsenal thérapeutique, proposer des soins de meilleure qualité, obtenir un meilleur taux de réussite, respecter le gradient thérapeutique et suivre les données acquises de la science... ou tout simplement rester moderne.

D'autres n'envisagent pas de développer leur utilisation des biocéramiques car ils estiment n'avoir pas suffisamment de connaissances, n'être pas suffisamment formés, ne pas en avoir les moyens... ou tout simplement car ils les utilisent déjà au maximum !

Une cause possible de frein pour les praticiens à l'utilisation des biocéramiques pourrait être l'enchaînement des difficultés : c'est cher, donc peu utilisé, donc peu ergonomique car par intégré dans la pratique, donc peu reproductible et très praticien-dépendant, et finalement peu rentable.

Il semble cependant que cette nouvelle classe de matériaux intéresse les praticiens français, qui y voient principalement l'occasion d'améliorer leurs traitements et d'élargir leurs offres de soin.

Beaucoup semblent à présent informés et nombreux en sont déjà les utilisateurs, avec un intérêt particulièrement porté sur le maintien de la vitalité pulpaire.

Peut-être la principale leçon de cette enquête est-elle que les biocéramiques endodontiques auront permis, ou du moins facilité, de développer la mode de l'économie tissulaire, le souci de la préservation tissulaire, le paradigme du gradient thérapeutique.

La prochaine étape sera de réussir à franchir l'obstacle financier souvent cité, et d'élargir l'utilisation des biocéramiques à l'ensemble de leurs indications.

VII. CONCLUSION

À une époque où l'on aurait tendance à trop facilement condamner une dent, suite aux progrès de l'implantologie et de la prothèse, il convient de reconsidérer les objectifs et moyens de l'endodontie moderne, et les bénéfices que son éthique conservatrice apporte : elle aussi a réalisé de grands progrès, tant au niveau des techniques que des matériaux.

Non seulement elle n'implique pas le préjudice esthétique de l'avulsion ni ne nécessite de prothèse transitoire, mais elle permet en outre de conserver la fonction de la dent en tout temps et d'éviter des mouvements orthodontiques des dents adjacentes. Elle cherche à conserver la résistance (mécanique et biologique) dans les procédures de maintien de la vitalité pulpaire, à restaurer la vitalité et le développement physiologique dans les procédures de régénération, ou encore à conserver l'organe dentaire sur l'arcade en restaurant l'état parodontal et préservant le niveau osseux dans les procédures non vitales.

Aucun outil ne permet aujourd'hui d'évaluer le degré d'inflammation pulpaire de manière fiable et reproductible, la corrélation des symptômes rapportés par le patient à un bilan de l'état pulpaire permettra donc l'établissement du diagnostic. La classification de Baume pourra ensuite servir de guide thérapeutique afin d'instaurer le traitement le plus approprié à chaque situation clinique et permettre de mettre en œuvre des procédures conservatrices respectueuses du gradient thérapeutique.

Le challenge quotidien de l'odontologie moderne est donc la recherche de la conservation de la vitalité pulpaire, de la régénération pulpaire ou, à défaut, du maintien de l'organe dentaire sur l'arcade. Au cours des dernières décennies, l'évolution des techniques et des matériaux d'obturation a permis de rendre l'acte endodontique plus rapide, plus prédictible, plus reproductible, mais surtout plus accessible.

La biologie pulpaire se plaçant au centre de la thérapeutique endodontique, l'arrivée sur le marché des ciments biocéramiques s'inscrit dans la volonté de matériaux toujours plus biocompatibles, et va dans ce sens de simplification des étapes du traitement canalaire tout en apportant de nouvelles solutions cliniques.

Les biocéramiques se sont progressivement imposées dans le traitement d'une variété de complications pulpaires et parodontales, qu'elles soient pathologiques ou iatrogènes, combinant les propriétés de l'hydroxyde de calcium et des matériaux d'obturation. Nous avons pu observer tout au long de ce document que les biocéramiques sont indiquées dans toutes les situations impliquant une communication entre l'endodonte et le parodonte, mais également dans toutes les procédures de maintien ou de rétablissement de la vitalité pulpaire.

Ces traitements comprennent des dents aux pulpes enflammées ou exposées (coiffage et pulpotomie), aux racines immatures et nécrosées (apexification, revascularisation et nouvelles régénérations pulpaires), aux canaux infectés (obturation endodontique orthograde/rétrograde et réimplantation intentionnelle), avec des fractures radiculaire conjuguées à une nécrose pulpaire de la partie coronaire, et aux perforations ou résorptions radiculaire.

La qualité d'un traitement endodontique est influencée par l'expérience du praticien, la technique employée et les matériaux utilisés. Il doit être efficace, reproductible, simple et à moindre coût. L'analyse de la littérature montre que les ciments biocéramiques possèdent des propriétés qui se rapprochent d'un ciment idéal, ayant évolué pour répondre le plus fidèlement possible aux critères énoncés par Grossman.

La technique monocône présentait des lacunes avec les ciments plus anciens. La technique de référence est la condensation verticale à chaud de Schilder, jouant sur le caractère plastique de la gutta-percha permettant une obturation supérieure du système endodontique si complexe. Elle reste cependant difficile à appliquer en omnipratique, le coût du matériel est important, et elle nécessite une phase d'apprentissage longue.

Avec les ciments biocéramiques, les défauts inhérents à la technique à froid que sont l'absence d'obturation tridimensionnelle, la grande quantité de ciment et la percolation immédiate et à moyen terme, semblent être résolus. Ainsi, une technique monocône associant un cône de gutta-percha et un ciment biocéramique semble prometteuse. Elle apparaît efficace, rapide, reproductible, simple et à moindre coût, sans besoin de matériel satellite. La limite principale est la capacité ou non de retraiter les dents.

Les ciments biocéramiques sont aussi employés dans d'autres domaines de l'endodontie, comme en chirurgie endodontique et en endodontie conservatrice et régénératrice. Ainsi, la conservation de la vitalité pulpaire et la régénération tissulaire

deviennent des techniques sûres et reproductibles avec le développement de ces matériaux au détriment de la pulpectomie conventionnelle.

De plus, en permettant l'induction au niveau périapical d'un tissu osseux minéralisé, ces biomatériaux offrent de nouvelles perspectives d'avenir à l'endodontie, puisqu'ils se placent ainsi comme des matériaux de régénération osseuse à part entière.

Les matériaux MTA sont dérivés du ciment Portland, et possèdent de nombreuses qualités : biocompatibilité, stabilité dimensionnelle, excellente étanchéité (adhésion naturelle et progressive dans le temps à la structure dentaire), hydrophilie, radio-opacité (bien que moins marquée par rapport aux autres ciments), adaptation au volume endodontique (excellente mouillabilité, légère expansion de prise et viscosité adaptée), sans douleurs post-opératoires et avec un temps de travail suffisant.

Outre ces propriétés de matériaux d'obturation, ce sont également des matériaux bioactifs : alcalinisation des milieux, formation d'hydroxyapatite au contact de solutions physiologiques par relargage d'ions Ca^{2+} , induction des réponses régénératives (migration, prolifération et différenciation cellulaires) et de la minéralisation ostéo-cémento-dentinaire, activité antibactérienne (notamment contre *E. faecalis* souvent mis en cause dans les cas d'infections persistantes) et antifongique.

Les rapports suggèrent fortement que la performance biologique favorable présentée par les biocéramiques est due principalement à la formation d'hydroxyapatite lorsque ces matériaux sont exposés à des solutions physiologiques.

Un problème relevé a été un effet apparent de coloration du MTA lorsqu'il est utilisé pour le coiffage pulpaire, la pulpotomie et l'apexification dans les dents antérieures.

Ainsi, les nouveaux ciments biocéramiques se sont développés, possédant des capacités physico-chimiques et biologiques comparables ou supérieures au MTA, sans toutefois induire de dyschromies secondaires. Ils sont en outre plus ergonomiques et présentent des propriétés mécaniques meilleures, notamment une résistance à la compression, une micro-dureté et un module l'élasticité proches voire identiques à la dentine.

Non contents de remplacer l'hydroxyde de calcium, le MTA et les nouvelles biocéramiques semblent améliorer ses défauts : le retard d'induction des tissus durs,

la qualité de ces tissus durs induits et enfin l'effet d'affaiblissement de la dentine par l'hydroxyde de calcium, qui dans certains cas conduit à la fracture radiculaire cervicale. Les études décrites peuvent amener à se demander si le moment est venu de remplacer l'hydroxyde de calcium.

Les ciments biocéramiques sont une réelle avancée en endodontie. Leurs nombreuses propriétés nous permettent d'envisager une augmentation du taux de succès de nos traitements dans tous les domaines endodontiques.

La littérature étudiée semble être en faveur des ciments biocéramiques dans toutes les procédures endodontiques, hormis pour le coiffage pulpaire indirect où ils égalent le CVI.

Cependant, il convient de noter que les données proviennent en grande partie d'études *in vitro* ou animales. Les études humaines existantes impliquant les biocéramiques sont très prometteuses, cependant il n'existe pas suffisamment d'études cliniques randomisées en double aveugle d'une durée suffisante pour toutes les indications cliniques. D'autres études cliniques sont donc nécessaires dans ces domaines.

SIGNATURE DES CONCLUSIONS

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

Nom - prénom de l'impétrant : DE LAJUDIE Emilien

Titre de la thèse : Intérêts pédiatriques et protocoles opératoires des biocéramiques endodontiques sur dents permanentes immatures et dents matures jeunes. Connaissances et pratiques professionnelles des biocéramiques endodontiques en France.

Directeur de thèse : Professeur François CLAUSS

VU

Strasbourg, le :

27 AOUT 2020

Le Président du Jury,


Professeur Y. HAIKEL

VU

Strasbourg, le :

27 AOUT 2020

Le Doyen de la Faculté
de Chirurgie Dentaire de Strasbourg,


Professeur C. TADDEI-GROSS

VIII. BIBLIOGRAPHIE

1. OMS | Santé bucco-dentaire [Internet]. WHO. [cited 2018 Dec 9]. Available from: <https://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs318/fr/>
2. Santé bucco dentaire [Internet]. [cited 2018 Dec 11]. Available from: <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/oral-health>
3. L'état de santé de la population en France - Rapport 2011 - Ministère des Solidarités et de la Santé [Internet]. [cited 2018 Dec 11]. Available from: <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/etudes-et-statistiques/publications/recueils-ouvrages-et-rapports/recueils-annuels/l-etat-de-sante-de-la-population/article/l-etat-de-sante-de-la-population-en-france-rapport-2011>
4. Épidémiologie des pathologies bucco-dentaires des enfants de 6 ans et de 12 ans en Corse [Internet]. [cited 2018 Dec 12]. Available from: <https://docplayer.fr/4324678-Epidemiologie-des-pathologies-bucco-dentaires-des-enfants-de-6-ans-et-de-12-ans-en-corse.html>
5. Simon S, Cooper P, Berdal A, Machtou P, Smith AJ. Biologie pulpaire : comprendre pour appliquer au quotidien. *Rev Odonto Stomatol*. 2008;37(3):209–35.
6. Goracci G, Mori G. [Micromorphological aspects of dentin]. *Minerva Stomatol*. 1995 Sep;44(9):377–87.
7. Bleicher F. Odontoblast physiology. *Exp Cell Res*. 2014 Jul 15;325(2):65–71.
8. La dent normale et pathologique [Internet]. De Boeck Supérieur. 2019 [cited 2019 Feb 9]. Available from: <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782804134891-la-dent-normale-et-pathologique>
9. Goldberg M, Smith AJ. Cells and extracellular matrices of dentin and pulp : a biological basis for repair and tissue engineering. *Crit Rev Oral Biol Med Off Publ Am Assoc Oral Biol*. 2004 Jan 1;15(1):13–27.
10. Goldberg M. Histologie du complexe dentinopulpaire. *Datatraite*122-46861 [Internet]. 2008 Jun 3 [cited 2019 Jan 12]; Available from: <https://www.em-consulte.com/en/article/165193>
11. Illustrated Dental Embryology, Histology, and Anatomy - 4th Edition [Internet]. [cited 2019 Jan 12]. Available from: <https://www.elsevier.com/books/illustrated-dental-embryology-histology-and-anatomy/fehrenbach/978-1-4557-7685-6>
12. Odontoblast Layer | www.imagenesmy.com [Internet]. [cited 2019 Jan 13]. Available from: <https://www.imagenesmy.com/imagenes/odontoblast-layer-ec.html>
13. Farges J-C, Alliot-Licht B, Renard E, Ducret M, Gaudin A, Smith AJ, et al. Dental Pulp Defence and Repair Mechanisms in Dental Caries. *Mediators Inflamm*. 2015;2015:230251.
14. Durand SH, Flacher V, Roméas A, Carrouel F, Colomb E, Vincent C, et al. Lipoteichoic acid increases TLR and functional chemokine expression while reducing dentin formation in in vitro differentiated human odontoblasts. *J Immunol Baltim Md 1950*. 2006 Mar 1;176(5):2880–7.
15. Le système digestif (Cours 1 et 2) [Internet]. [cited 2019 Jan 12]. Available from: <http://www.isto.ucl.ac.be/safe/dig12.htm>
16. Oral Histology: Dental Pulp Lecture [Internet]. [cited 2019 Jan 13]. Available from: <http://www.uky.edu/~brmacp/oralhist/module4/lecture/oh4lect.htm>
17. Yu C, Abbott PV. An overview of the dental pulp: its functions and responses to injury. *Aust Dent J*. 2007 Mar;52(1 Suppl):S4-16.
18. Abd-Elmeguid A, Yu DC. Dental pulp neurophysiology: part 1. Clinical and diagnostic implications. *J Can Dent Assoc*. 2009 Feb;75(1):55–9.

19. Frank RM. Attachment sites between the odontoblast process and the intradental nerve fibre. *Arch Oral Biol.* 1968 Jul;13(7):833–4.
20. Raslan N, Wetzel W-E. Exposed human pulp caused by trauma and/or caries in primary dentition: a histological evaluation. *Dent Traumatol.* 2006;22(3):145–53.
21. Andreasen JO, Andreasen FM, Andersson L. *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth.* 4th Edition. Oxford, UK ; Ames, Iowa: Wiley-Blackwell; 2007. 912 p.
22. Smith AJ, Scheven BA, Takahashi Y, Ferracane JL, Shelton RM, Cooper PR. Dentine as a bioactive extracellular matrix. *Arch Oral Biol.* 2012 Feb 1;57(2):109–21.
23. Smith AJ, Tobias RS, Plant CG, Browne RM, Lesot H, Ruch JV. In vivo morphogenetic activity of dentine matrix proteins. *J Biol Buccale.* 1990 Jun;18(2):123–9.
24. Smith AJ, Tobias RS, Cassidy N, Plant CG, Browne RM, Begue-Kirn C, et al. Odontoblast stimulation in ferrets by dentine matrix components. *Arch Oral Biol.* 1994 Jan;39(1):13–22.
25. Smith AJ, Tobias RS, Murray PE. Transdental stimulation of reactionary dentinogenesis in ferrets by dentine matrix components. *J Dent.* 2001 Jul;29(5):341–6.
26. Melin M, Joffre-Romeas A, Farges JC, Couble ML, Magloire H, Bleicher F. Effects of TGFbeta1 on dental pulp cells in cultured human tooth slices. *J Dent Res.* 2000 Sep;79(9):1689–96.
27. Zhang W, Walboomers XF, Jansen JA. The formation of tertiary dentin after pulp capping with a calcium phosphate cement, loaded with PLGA microparticles containing TGF-beta1. *J Biomed Mater Res A.* 2008 May;85(2):439–44.
28. da Rosa WLO, Piva E, da Silva AF. Disclosing the physiology of pulp tissue for vital pulp therapy. *Int Endod J.* 2018 Aug;51(8):829–46.
29. Fitzgerald M, Chiego DJ, Heys DR. Autoradiographic analysis of odontoblast replacement following pulp exposure in primate teeth. *Arch Oral Biol.* 1990;35(9):707–15.
30. Alliot-licht B, Bluteau G, Lopez-Cazaux S, Vinatier C, Guicheux J. Cellules progénitrices pulpaire et réparation dentinaire. *Cah ADF.* 2006 Jan 1;
31. Casagrande L, Cordeiro MM, Nör SA, Nör JE. Dental pulp stem cells in regenerative dentistry. *Odontology.* 2011 Jan;99(1):1–7.
32. Smith AJ. Vitality of the dentin-pulp complex in health and disease: growth factors as key mediators. *J Dent Educ.* 2003 Jun 1;67(6):678–89.
33. Diogenes A, Henry MA, Teixeira FB, Hargreaves KM. An update on clinical regenerative endodontics. *Endod Top.* 2013;28(1):2–23.
34. Rohée J, Valérie A, Cécile D, d'Odontologie U de NU de F et de R. *Diagnostic de l'état pulpaire état des lieux de l'enseignement en France.* [S.l.]: [s.n.]; 2011.
35. Harndt R. [Diseases of the pulp and their diagnosis]. *Dtsch Zahnartzl Z.* 1969 May;24(5):389–400.
36. Baume LJ. Diagnosis of diseases of the pulp. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1970 Jan;29(1):102–16.
37. Grossman L Irwin. *Endodontic practice* [Internet]. Philadelphia: Lea & Febiger; 1970 [cited 2020 Jan 19]. xiii, 483 p. p. Available from: <https://catalog.hathitrust.org/Record/001571890>
38. Simon S, Machtou P, Pertot W-J. *Endodontie.* Rueil-Malmaison: CDP; 2012. 514 p.
39. Guillaume Camut. *Les ciments endodontiques : le point en 2016.* Université de Nantes; 2016.
40. Park J, Lakes RS. *Biomaterials: An Introduction* [Internet]. 3rd ed. New York: Springer-Verlag; 2007 [cited 2020 Jan 20]. Available from: <https://www.springer.com/gp/book/9780387378794>
41. Williams DF. On the mechanisms of biocompatibility. *Biomaterials.* 2008 Jul;29(20):2941–53.

42. Donaruma LG. Definitions in biomaterials, D. F. Williams, Ed., Elsevier, Amsterdam, 1987, 72 pp. *J Polym Sci Part C Polym Lett.* 1987;26(9):414–414.
43. Williams DF. There is no such thing as a biocompatible material. *Biomaterials.* 2014 Dec;35(38):10009–14.
44. Ratner BD, Hoffman AS, Schoen FJ, Lemons JE. *Biomaterials Science: An Introduction to Materials in Medicine.* Elsevier; 2004. 879 p.
45. Rosenblum MA, Schulman A. A Review of All-Ceramic Restorations. *J Am Dent Assoc.* 1997 Mar 1;128(3):297–307.
46. Raghavendra SS, Jadhav GR, Gathani KM, Kotadia P. Bioceramics in endodontics – a review. *J Istanbul Univ Fac Dent.* 2017;51(3 Suppl 1):S128.
47. Prati C, Gandolfi MG. Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dent Mater.* 2015 Apr 1;31(4):351–70.
48. Semennikova K, Colon P, Pradelle-Plasse N. Les ciments tricalciques partie 1 - Présentation, composition et propriétés. 2016;1:10.
49. Eckel EC. *Portland Cement Materials and Industry in the United States.* U.S. Government Printing Office; 1913. 446 p.
50. Les biocéramiques et leur utilisation en endodontie [Internet]. *Le Fil Dentaire magazine dentaire.* 2018 [cited 2020 Jan 22]. Available from: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/endodontie/les-bioceramiques-et-leur-utilisation-en-endodontie/>
51. Lee SJ, Monsef M, Torabinejad M. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate for repair of lateral root perforations. *J Endod.* 1993 Nov;19(11):541–4.
52. Torabinejad M, White DJ. Tooth filling material and method of use. US Pat 5415547 [Internet]. 1993 [cited 2020 Mar 20]; Available from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/54/b2/6e/d187fc09f2e396/US5415547.pdf>
53. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR. Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod.* 1995 Jul 1;21(7):349–53.
54. Schwartz RS, Mauger M, Clement DJ, Walker WA. Mineral trioxide aggregate: a new material for endodontics. *J Am Dent Assoc.* 1999 Jul;130(7):967–75.
55. Camilleri J. Mineral trioxide aggregate: present and future developments. *Endod Top.* 2015;32(1):31–46.
56. Holland R, de Souza V, Nery MJ, Otoboni Filho JA, Bernabé PF, Dezan Júnior E. Reaction of dogs' teeth to root canal filling with mineral trioxide aggregate or a glass ionomer sealer. *J Endod.* 1999 Nov;25(11):728–30.
57. Holland R, de Souza V, Nery MJ, Bernabé o FE, Filho JAO, Junior ED, et al. Calcium salts deposition in rat connective tissue after the implantation of calcium hydroxide-containing sealers. *J Endod.* 2002 Mar;28(3):173–6.
58. Ma J, Shen Y, Stojicic S, Haapasalo M. Biocompatibility of two novel root repair materials. *J Endod.* 2011 Jun;37(6):793–8.
59. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod.* 2010 Jan;36(1):16–27.
60. Torabinejad M, Parirokh M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--part II: leakage and biocompatibility investigations. *J Endod.* 2010 Feb;36(2):190–202.
61. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *J Endod.* 2010 Mar;36(3):400–13.
62. Bortoluzzi EA, Broon NJ, Bramante CM, Felipe WT, Tanomaru Filho M, Esberard RM. The influence of calcium chloride on the setting time, solubility, disintegration, and pH

- of mineral trioxide aggregate and white Portland cement with a radiopacifier. *J Endod.* 2009 Apr;35(4):550–4.
63. Formosa LM, Mallia B, Camilleri J. The effect of curing conditions on the physical properties of tricalcium silicate cement for use as a dental biomaterial. *Int Endod J.* 2012 Apr;45(4):326–36.
 64. Dutta A, Saunders WP. Calcium silicate materials in endodontics. *Dent Update.* 2014 Oct 2;41(8):708–22.
 65. Bali PK, ShivekshithA K, AllamaprabhuC R, Vivekh P. Calcium enriched mixture cement: A review. In 2015.
 66. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M, Ghodduji J, Kheirieh S, Brink F. Comparison of mineral trioxide aggregate's composition with Portland cements and a new endodontic cement. *J Endod.* 2009 Feb;35(2):243–50.
 67. Ghoneim AG, Lutfy RA, Sabet NE, Fayyad DM. Resistance to fracture of roots obturated with novel canal-filling systems. *J Endod.* 2011 Nov;37(11):1590–2.
 68. Aggarwal V, Singla M, Miglani S, Kohli S. Comparative evaluation of push-out bond strength of ProRoot MTA, Biodentine, and MTA Plus in furcation perforation repair. *J Conserv Dent JCD.* 2013 Sep;16(5):462–5.
 69. Brochure Biodentine-FR.pdf [Internet]. [cited 2020 Mar 20]. Available from: <https://www.septodont-fr.be/sites/default/files/Brochure%20Biodentine-FR.pdf>
 70. Camilleri J. *Mineral Trioxide Aggregate in Dentistry: From Preparation to Application.* Springer; 2014. 214 p.
 71. Asgary S, Parirokh M, Eghbal MJ, Brink F. Chemical differences between white and gray mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005 Feb;31(2):101–3.
 72. Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Ford TRP. The constitution of mineral trioxide aggregate. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* 2005 Apr;21(4):297–303.
 73. Shie M-Y, Huang T-H, Kao C-T, Huang C-H, Ding S-J. The effect of a physiologic solution pH on properties of white mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2009 Jan;35(1):98–101.
 74. Torabinejad M, Watson TF, Pitt Ford TR. Sealing ability of a mineral trioxide aggregate when used as a root end filling material. *J Endod.* 1993 Dec;19(12):591–5.
 75. Fischer EJ, Arens DE, Miller CH. Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as compared with zinc-free amalgam, intermediate restorative material, and Super-EBA as a root-end filling material. *J Endod.* 1998 Mar;24(3):176–9.
 76. Tang HM, Torabinejad M, Kettering JD. Leakage evaluation of root end filling materials using endotoxin. *J Endod.* 2002 Jan;28(1):5–7.
 77. Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR. Long-term seal provided by some root-end filling materials. *J Endod.* 1998 Aug;24(8):557–60.
 78. Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2005 Feb;31(2):97–100.
 79. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Antibacterial effects of some root end filling materials. *J Endod.* 1995 Aug;21(8):403–6.
 80. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Cytotoxicity of four root end filling materials. *J Endod.* 1995 Oct;21(10):489–92.
 81. Laurent P, Camps J, De Méo M, Déjou J, About I. Induction of specific cell responses to a Ca(3)SiO(5)-based posterior restorative material. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* 2008 Nov;24(11):1486–94.
 82. Keiser K, Johnson CC, Tipton DA. Cytotoxicity of mineral trioxide aggregate using human periodontal ligament fibroblasts. *J Endod.* 2000 May;26(5):288–91.
 83. Huang TH, Yang CC, Ding SJ, Yeng M, Kao CT, Chou MY. Inflammatory cytokines

- reaction elicited by root-end filling materials. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2005 Apr;73(1):123–8.
84. Simon S, Cooper P, Smith A, Picard B, Ifi CN, Berdal A. Evaluation of a new laboratory model for pulp healing: preliminary study. *Int Endod J.* 2008 Sep;41(9):781–90.
 85. Main C, Mirzayan N, Shabahang S, Torabinejad M. Repair of root perforations using mineral trioxide aggregate: a long-term study. *J Endod.* 2004 Feb;30(2):80–3.
 86. Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong CU, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1995 Jun;79(6):756–63.
 87. Hakki SS, Bozkurt SB, Hakki EE, Belli S. Effects of mineral trioxide aggregate on cell survival, gene expression associated with mineralized tissues, and biomineralization of cementoblasts. *J Endod.* 2009 Apr;35(4):513–9.
 88. Chen C-L, Huang T-H, Ding S-J, Shie M-Y, Kao C-T. Comparison of calcium and silicate cement and mineral trioxide aggregate biologic effects and bone markers expression in MG63 cells. *J Endod.* 2009 May;35(5):682–5.
 89. Camilleri J, Formosa L, Damidot D. The setting characteristics of MTA Plus in different environmental conditions. *Int Endod J.* 2013 Sep;46(9):831–40.
 90. Rajasekharan S, Martens LC, Cauwels RGEC, Anthonappa RP, Verbeeck RMH. Biodentine™ material characteristics and clinical applications: a 3 year literature review and update. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent.* 2018;19(1):1–22.
 91. Saxena P, Gupta SK, Newaskar V. Biocompatibility of root-end filling materials: recent update. *Restor Dent Endod.* 2013 Aug;38(3):119–27.
 92. Siboni F, Taddei P, Zamparini F, Prati C, Gandolfi MG. Properties of BioRoot RCS, a tricalcium silicate endodontic sealer modified with povidone and polycarboxylate. *Int Endod J.* 2017 Dec;50 Suppl 2:e120–36.
 93. Zhou H, Shen Y, Zheng W, Li L, Zheng Y, Haapasalo M. Physical properties of 5 root canal sealers. *J Endod.* 2013 Oct;39(10):1281–6.
 94. Wang Z. Bioceramic materials in endodontics. *Endod Top.* 2015;32(1):3–30.
 95. Lai Y, Yang M-L, Lee S-Y. Microhardness and color changes of human dentin with repeated intracoronary bleaching. *Oper Dent.* 2003 Dec;28(6):786–92.
 96. Wang Z, Ma J, Shen Y, Haapasalo M. Acidic pH weakens the microhardness and microstructure of three tricalcium silicate materials. *Int Endod J.* 2015 Apr;48(4):323–32.
 97. Shojaee NS, Adl A, Jafarpur D, Sobhnamayan F. Effect of Different Water-to-Powder Ratios on the Compressive Strength of Calcium-enriched Mixture Cement. *Iran Endod J.* 2018;13(3):395–7.
 98. Basturk FB, Nekoofar MH, Gunday M, Dummer PMH. Effect of varying water-to-powder ratios and ultrasonic placement on the compressive strength of mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2015 Apr;41(4):531–4.
 99. Moshaverinia A, Brantley WA, Chee WWL, Rohpour N, Ansari S, Zheng F, et al. Measure of microhardness, fracture toughness and flexural strength of N-vinylcaprolactam (NVC)-containing glass-ionomer dental cements. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* 2010 Dec;26(12):1137–43.
 100. Walker MP, Diliberto A, Lee C. Effect of setting conditions on mineral trioxide aggregate flexural strength. *J Endod.* 2006 Apr;32(4):334–6.
 101. Sagsen B, Ustün Y, Demirbuga S, Pala K. Push-out bond strength of two new calcium silicate-based endodontic sealers to root canal dentine. *Int Endod J.* 2011 Dec;44(12):1088–91.
 102. Candeiro GT de M, Correia FC, Duarte MAH, Ribeiro-Siqueira DC, Gavini G. Evaluation of radiopacity, pH, release of calcium ions, and flow of a bioceramic root canal sealer. *J Endod.* 2012 Jun;38(6):842–5.

103. Zarrabi MH, Javidi M, Jafarian AH, Joushan B. Histologic assessment of human pulp response to capping with mineral trioxide aggregate and a novel endodontic cement. *J Endod.* 2010 Nov;36(11):1778–81.
104. Kossev D, Stefanov V. Ceramics-based sealers as new alternative to currently used endodontic sealers. 2009;7.
105. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M. Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against *Enterococcus faecalis*. *J Endod.* 2009 Jul;35(7):1051–5.
106. Hua D, Li H, Yang B, Song L, Liu T, Cong Y, et al. [Determination of contact angle of pharmaceutical excipients and regulating effect of surfactants on their wettability]. *Yao Xue Xue Bao.* 2015 Oct;50(10):1342–5.
107. John AD, Webb TD, Imamura G, Goodell GG. Fluid flow evaluation of Fuji Triage and gray and white ProRoot mineral trioxide aggregate intraorifice barriers. *J Endod.* 2008 Jul;34(7):830–2.
108. Silva EJNL, Rosa TP, Herrera DR, Jacinto RC, Gomes BPFA, Zaia AA. Evaluation of cytotoxicity and physicochemical properties of calcium silicate-based endodontic sealer MTA Fillapex. *J Endod.* 2013 Feb;39(2):274–7.
109. Schilder H. Filling root canals in three dimensions. 1967. *J Endod.* 2006 Apr;32(4):281–90.
110. Khalil I, Naaman A, Camilleri J. Properties of Tricalcium Silicate Sealers. *J Endod.* 2016 Oct;42(10):1529–35.
111. Fridland M, Rosado R. Mineral trioxide aggregate (MTA) solubility and porosity with different water-to-powder ratios. *J Endod.* 2003 Dec;29(12):814–7.
112. Prüllage R-K, Urban K, Schäfer E, Dammaschke T. Material Properties of a Tricalcium Silicate-containing, a Mineral Trioxide Aggregate-containing, and an Epoxy Resin-based Root Canal Sealer. *J Endod.* 2016 Dec;42(12):1784–8.
113. Ersahan S, Aydin C. Solubility and apical sealing characteristics of a new calcium silicate-based root canal sealer in comparison to calcium hydroxide-, methacrylate resin- and epoxy resin-based sealers. *Acta Odontol Scand.* 2013 Jul;71(3–4):857–62.
114. Cox CF, Keall CL, Keall HJ, Ostro E, Bergenholtz G. Biocompatibility of surface-sealed dental materials against exposed pulps. *J Prosthet Dent.* 1987 Jan;57(1):1–8.
115. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M. Sealing ability of a novel endodontic cement as a root-end filling material. *J Biomed Mater Res A.* 2008 Dec 1;87(3):706–9.
116. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Ashoftehyazdi K, Zahraee S, Khoshkhounejad M. Marginal adaptation of new bioceramic materials and mineral trioxide aggregate: a scanning electron microscopy study. *Iran Endod J.* 2014;9(2):144–8.
117. Leal F, De-Deus G, Brandão C, Luna A, Souza E, Fidel S. Similar sealability between bioceramic putty ready-to-use repair cement and white MTA. *Braz Dent J.* 2013;24(4):362–6.
118. Shi S, Zhang D-D, Chen X, Bao Z-F, Guo Y-J. Apical Sealing Ability of Bioceramic Paste and Mineral Trioxide Aggregate Retrofillings: A Dye Leakage Study. *Iran Endod J.* 2015;10(2):99–103.
119. Zhang W, Li Z, Peng B. Assessment of a new root canal sealer's apical sealing ability. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009 Jun;107(6):e79-82.
120. Debelian G, Trope M. The use of premixed bioceramic materials in endodontics. *G Ital Endodonzia.* 2016 Nov;30(2):70–80.
121. Keskin C, Demiryurek EO, Ozyurek T. Color stabilities of calcium silicate-based materials in contact with different irrigation solutions. *J Endod.* 2015 Mar;41(3):409–11.
122. Rajasekharan S, Martens LC, Cauwels RGEC, Anthonappa RP, Verbeeck RMH. Biodentine™ material characteristics and clinical applications: a 3 year literature review and update. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent.* 2018;19(1):1–22.

123. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Pirmoazen S, Shamshiri AR, Dummer PMH. Evaluation and Comparison of Occurrence of Tooth Discoloration after the Application of Various Calcium Silicate-based Cements: An Ex Vivo Study. *J Endod.* 2016 Jan;42(1):140–4.
124. Możyńska J, Metlerski M, Lipski M, Nowicka A. Tooth Discoloration Induced by Different Calcium Silicate-based Cements: A Systematic Review of In Vitro Studies. *J Endod.* 2017 Oct;43(10):1593–601.
125. Shokouhinejad N, Razmi H, Nekoofar MH, Sajadi S, Dummer PM, Khoshkhounejad M. Push-Out Bond Strength of Bioceramic Materials in a Synthetic Tissue Fluid. *J Dent Tehran Iran.* 2013 Nov;10(6):540.
126. Ersahan S, Aydin C. Dislocation resistance of iRoot SP, a calcium silicate-based sealer, from radicular dentine. *J Endod.* 2010 Dec;36(12):2000–2.
127. Sa A, Rs S, Ma E-S. The effect of prior calcium hydroxide intracanal placement on the bond strength of two calcium silicate-based and an epoxy resin-based endodontic sealer. *J Endod.* 2012 Mar 22;38(5):696–9.
128. Özcan E, Çapar İD, Çetin AR, Tunçdemir AR, Aydınbelge HA. The effect of calcium silicate-based sealer on the push-out bond strength of fibre posts. *Aust Dent J.* 2012 Jun;57(2):166–70.
129. Türker SA, Uzunoğlu E. Effect of powder-to-water ratio on the push-out bond strength of white mineral trioxide aggregate. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol.* 2016 Apr;32(2):153–5.
130. Droulers L. Endodontie a minima: concept. 2017;110.
131. Sağsen B, Ustün Y, Pala K, Demırbuğa S. Resistance to fracture of roots filled with different sealers. *Dent Mater J.* 2012;31(4):528–32.
132. Topçuoğlu HS, Tuncay Ö, Karataş E, Arslan H, Yeter K. In vitro fracture resistance of roots obturated with epoxy resin-based, mineral trioxide aggregate-based, and bioceramic root canal sealers. *J Endod.* 2013 Dec;39(12):1630–3.
133. Ulusoy ÖİA, Nayır Y, Darendeliler-Yaman S. Effect of different root canal sealers on fracture strength of simulated immature roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Oct;112(4):544–7.
134. BioRoot™ RCS - ENDODONTIE - Septodont [Internet]. [cited 2020 Mar 11]. Available from: <https://www.septodont-fr.be/produits/bioroot-rcs>
135. Ozcan E, Yula E, Arslanoğlu Z, Inci M. Antifungal activity of several root canal sealers against *Candida albicans*. *Acta Odontol Scand.* 2013 Nov;71(6):1481–5.
136. Zoufan K, Jiang J, Komabayashi T, Wang Y-H, Safavi KE, Zhu Q. Cytotoxicity evaluation of Gutta Flow and Endo Sequence BC sealers. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Nov;112(5):657–61.
137. Loushine BA, Bryan TE, Looney SW, Gillen BM, Loushine RJ, Weller RN, et al. Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. *J Endod.* 2011 May;37(5):673–7.
138. Torabinejad M, Moazzami SM, Moaddel H, Hawkins J, Gustefson C, Faras H, et al. Effect of MTA particle size on periapical healing. *Int Endod J.* 2017 Dec;50 Suppl 2:e3–8.
139. Bojar W, Marczevska J, Drozd E, Anuszevska E. Cytotoxicity and Mutagenicity of N2 Cement - Root Canal Filling Material. *Adv Clin Exp Med.* 2009 Nov 1;18:615–21.
140. Watts A, Paterson RC. Bacterial contamination as a factor influencing the toxicity of materials to the exposed dental pulp. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1987 Oct;64(4):466–74.
141. Baume LJ, Holz J. Long term clinical assessment of direct pulp capping. *Int Dent J.* 1981 Dec;31(4):251–60.
142. Küçükkaya S, Görduysus MÖ, Zeybek ND, Müftüoğlu SF. In Vitro Cytotoxicity of Calcium Silicate-Based Endodontic Cement as Root-End Filling Materials. *Scientifica.*

2016;2016:9203932.

143. Kokate SR, Pawar AM. An in vitro comparative stereomicroscopic evaluation of marginal seal between MTA, glass ionomer cement & biodentine as root end filling materials using 1% methylene blue as tracer. :7.
144. Damas BA, Wheeler MA, Bringas JS, Hoen MM. Cytotoxicity comparison of mineral trioxide aggregates and EndoSequence bioceramic root repair materials. *J Endod.* 2011 Mar;37(3):372–5.
145. Samyuktha V, Ravikumar P, Nagesh B, Ranganathan K, Jayaprakash T, Sayesh V. Cytotoxicity evaluation of root repair materials in human-cultured periodontal ligament fibroblasts. *J Conserv Dent JCD.* 2014 Sep;17(5):467–70.
146. Alanezi AZ, Jiang J, Safavi KE, Spangberg LSW, Zhu Q. Cytotoxicity evaluation of endosequence root repair material. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010 Mar;109(3):e122-125.
147. De-Deus G, Canabarro A, Alves GG, Marins JR, Linhares ABR, Granjeiro JM. Cytocompatibility of the ready-to-use bioceramic putty repair cement iRoot BP Plus with primary human osteoblasts. *Int Endod J.* 2012 Jun;45(6):508–13.
148. Zhou H, Shen Y, Wang Z, Li L, Zheng Y, Häkkinen L, et al. In vitro cytotoxicity evaluation of a novel root repair material. *J Endod.* 2013 Apr;39(4):478–83.
149. Chung C-R, Kim E, Shin S-J. Biocompatibility of bioaggregate cement on human pulp and periodontal ligament (PDL) derived cells. *J Korean Acad Conserv Dent.* 2010 Nov 1;35(6):473–8.
150. Kim M, Ko H, Yang W, Lee Y, Kim S, Mante FK. A new resin-bonded retrograde filling material. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009 Nov;108(5):e111-116.
151. Yang W-K, Ko H-J, Kim M-R. Evaluation of the rat tissue reaction to experimental new resin cement and mineral trioxide aggregate cement. *Restor Dent Endod.* 2012 Nov;37(4):194–200.
152. Michel A, Erber R, Frese C, Gehrig H, Saure D, Mente J. In vitro evaluation of different dental materials used for the treatment of extensive cervical root defects using human periodontal cells. *Clin Oral Investig.* 2017 Apr;21(3):753–61.
153. Saberi EA, Karkehabadi H, Mollashahi NF. Cytotoxicity of Various Endodontic Materials on Stem Cells of Human Apical Papilla. *Iran Endod J.* 2016;11(1):17–22.
154. Jung S, Mielert J, Kleinheinz J, Dammaschke T. Human oral cells' response to different endodontic restorative materials: an in vitro study. *Head Face Med.* 2014 Dec 23;10:55.
155. Escobar-García DM, Aguirre-López E, Méndez-González V, Pozos-Guillén A. Cytotoxicity and Initial Biocompatibility of Endodontic Biomaterials (MTA and Biodentine™) Used as Root-End Filling Materials. *BioMed Res Int.* 2016;2016:7926961.
156. Corral Nuñez CM, Bosomworth HJ, Field C, Whitworth JM, Valentine RA. Biodentine and mineral trioxide aggregate induce similar cellular responses in a fibroblast cell line. *J Endod.* 2014 Mar;40(3):406–11.
157. Silva EJNL, Senna PM, De-Deus G, Zaia AA. Cytocompatibility of Biodentine using a three-dimensional cell culture model. *Int Endod J.* 2016 Jun;49(6):574–80.
158. Poggio C, Arciola CR, Beltrami R, Monaco A, Dagna A, Lombardini M, et al. Cytocompatibility and Antibacterial Properties of Capping Materials. *Sci World J.* 2014;2014:e181945.
159. Poggio C, Ceci M, Beltrami R, Dagna A, Colombo M, Chiesa M. Biocompatibility of a new pulp capping cement. *Ann Stomatol (Roma).* 2014 Jun 18;5(2):69–76.
160. Ceci M, Beltrami R, Chiesa M, Colombo M, Poggio C. Biological and chemical-physical properties of root-end filling materials: A comparative study. *J Conserv Dent JCD.*

2015 Apr;18(2):94–9.

161. Zhang W, Li Z, Peng B. Ex vivo cytotoxicity of a new calcium silicate-based canal filling material. *Int Endod J*. 2010 Sep;43(9):769–74.

162. Zhang W, Li Z, Peng B. Effects of iRoot SP on mineralization-related genes expression in MG63 cells. *J Endod*. 2010 Dec;36(12):1978–82.

163. Güven EP, Yalvaç ME, Kayahan MB, Sunay H, Şahin F, Bayirli G. Human tooth germ stem cell response to calcium-silicate based endodontic cements. *J Appl Oral Sci Rev FOB*. 2013 Aug;21(4):351–7.

164. Ruparel NB, Ruparel SB, Chen PB, Ishikawa B, Diogenes A. Direct effect of endodontic sealers on trigeminal neuronal activity. *J Endod*. 2014 May;40(5):683–7.

165. Chang S-W, Lee S-Y, Kang S-K, Kum K-Y, Kim E-C. In vitro biocompatibility, inflammatory response, and osteogenic potential of 4 root canal sealers: Sealapex, Sankin apatite root sealer, MTA Fillapex, and iRoot SP root canal sealer. *J Endod*. 2014 Oct;40(10):1642–8.

166. Ciasca M, Aminoshariae A, Jin G, Montagnese T, Mickel A. A comparison of the cytotoxicity and proinflammatory cytokine production of EndoSequence root repair material and ProRoot mineral trioxide aggregate in human osteoblast cell culture using reverse-transcriptase polymerase chain reaction. *J Endod*. 2012 Apr;38(4):486–9.

167. Asgary S, Shahabi S, Jafarzadeh T, Amini S, Kheirieh S. The properties of a new endodontic material. *J Endod*. 2008 Aug;34(8):990–3.

168. Asgary S, Eghbal MJ, Parirokh M, Ghoddusi J. Effect of two storage solutions on surface topography of two root-end fillings. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc*. 2009 Dec;35(3):147–52.

169. Koch KA, Brave D. EndoSequence: melding endodontics with restorative dentistry, part 3. *Dent Today*. 2009 Mar;28(3):88, 90, 92 passim.

170. Koch D. Bioceramic Technology A Game Changer in Endodontic Obturation. *Art Dent*. 2011 Aug 22;9(3(41)):164–73.

171. Koch KA, Brave DG. Bioceramics, part I: the clinician's viewpoint. *Dent Today*. 2012 Jan;31(1):130–5.

172. Cheng L, Ye F, Yang R, Lu X, Shi Y, Li L, et al. Osteoinduction of hydroxyapatite/beta-tricalcium phosphate bioceramics in mice with a fractured fibula. *Acta Biomater*. 2010 Apr;6(4):1569–74.

173. Reyes-Carmona JF, Felipe MS, Felipe WT. Biomineralization ability and interaction of mineral trioxide aggregate and white portland cement with dentin in a phosphate-containing fluid. *J Endod*. 2009 May;35(5):731–6.

174. Shabahang S, Torabinejad M, Boyne PP, Abedi H, McMillan P. A comparative study of root-end induction using osteogenic protein-1, calcium hydroxide, and mineral trioxide aggregate in dogs. *J Endod*. 1999 Jan;25(1):1–5.

175. Azimi S, Fazlyab M, Sadri D, Saghiri MA, Khosravanifard B, Asgary S. Comparison of pulp response to mineral trioxide aggregate and a bioceramic paste in partial pulpotomy of sound human premolars: a randomized controlled trial. *Int Endod J*. 2014 Sep;47(9):873–81.

176. Shokouhinejad N, Nekoofar MH, Razmi H, Sajadi S, Davies TE, Saghiri MA, et al. Bioactivity of EndoSequence root repair material and bioaggregate. *Int Endod J*. 2012 Dec;45(12):1127–34.

177. Schröder U. Effects of calcium hydroxide-containing pulp-capping agents on pulp cell migration, proliferation, and differentiation. *J Dent Res*. 1985 Apr;64 Spec No:541–8.

178. Jung J-Y, Woo S-M, Lee B-N, Koh J-T, Nör JE, Hwang Y-C. Effect of Biodentine and Bioaggregate on odontoblastic differentiation via mitogen-activated protein kinase pathway in human dental pulp cells. *Int Endod J*. 2015 Feb;48(2):177–84.

179. Zhang S, Yang X, Fan M. BioAggregate and iRoot BP Plus optimize the proliferation

- and mineralization ability of human dental pulp cells. *Int Endod J.* 2013 Oct;46(10):923–9.
180. Luo Z, Li D, Kohli MR, Yu Q, Kim S, He W-X. Effect of Biodentine™ on the proliferation, migration and adhesion of human dental pulp stem cells. *J Dent.* 2014 Apr;42(4):490–7.
181. Araújo LB, Cosme-Silva L, Fernandes AP, de Oliveira TM, Cavalcanti B das N, Gomes JE, et al. Effects of mineral trioxide aggregate, Biodentine™ and calcium hydroxide on viability, proliferation, migration and differentiation of stem cells from human exfoliated deciduous teeth. *J Appl Oral Sci [Internet].* 2018 Jan 16 [cited 2020 Mar 10];26. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5777405/>
182. Güven EP, Taşlı PN, Yalvac ME, Sofiev N, Kayahan MB, Sahin F. In vitro comparison of induction capacity and biomineralization ability of mineral trioxide aggregate and a bioceramic root canal sealer. *Int Endod J.* 2013 Dec;46(12):1173–82.
183. Chang S-W, Lee S-Y, Ann H-J, Kum K-Y, Kim E-C. Effects of calcium silicate endodontic cements on biocompatibility and mineralization-inducing potentials in human dental pulp cells. *J Endod.* 2014 Aug;40(8):1194–200.
184. Luo Z, Kohli MR, Yu Q, Kim S, Qu T, He W. Biodentine induces human dental pulp stem cell differentiation through mitogen-activated protein kinase and calcium-/calmodulin-dependent protein kinase II pathways. *J Endod.* 2014 Jul;40(7):937–42.
185. Widbiller M, Lindner SR, Buchalla W, Eidt A, Hiller K-A, Schmalz G, et al. Three-dimensional culture of dental pulp stem cells in direct contact to tricalcium silicate cements. *Clin Oral Investig.* 2016 Mar;20(2):237–46.
186. Lee B-N, Lee K-N, Koh J-T, Min K-S, Chang H-S, Hwang I-N, et al. Effects of 3 endodontic bioactive cements on osteogenic differentiation in mesenchymal stem cells. *J Endod.* 2014 Aug;40(8):1217–22.
187. Peters OA, Galicia J, Arias A, Tolar M, Ng E, Shin SJ. Effects of two calcium silicate cements on cell viability, angiogenic growth factor release and related gene expression in stem cells from the apical papilla. *Int Endod J.* 2016 Dec;49(12):1132–40.
188. Costa F, Sousa Gomes P, Fernandes MH. Osteogenic and Angiogenic Response to Calcium Silicate-based Endodontic Sealers. *J Endod.* 2016 Jan;42(1):113–9.
189. Willershausen I, Wolf T, Kasaj A, Weyer V, Willershausen B, Marroquin BB. Influence of a bioceramic root end material and mineral trioxide aggregates on fibroblasts and osteoblasts. *Arch Oral Biol.* 2013 Sep;58(9):1232–7.
190. Camps J, Jeanneau C, El Ayachi I, Laurent P, About I. Bioactivity of a Calcium Silicate-based Endodontic Cement (BioRoot RCS): Interactions with Human Periodontal Ligament Cells In Vitro. *J Endod.* 2015 Sep;41(9):1469–73.
191. Zhu Q, Haglund R, Safavi KE, Spangberg LS. Adhesion of human osteoblasts on root-end filling materials. *J Endod.* 2000 Jul;26(7):404–6.
192. Candeiro GTM, Moura-Netto C, D’Almeida-Couto RS, Azambuja-Júnior N, Marques MM, Cai S, et al. Cytotoxicity, genotoxicity and antibacterial effectiveness of a bioceramic endodontic sealer. *Int Endod J.* 2016 Sep;49(9):858–64.
193. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ. The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1965 Sep 1;20(3):340–9.
194. Sundqvist G. Ecology of the root canal flora. *J Endod.* 1992 Sep;18(9):427–30.
195. Orstavik D. Antibacterial properties of root canal sealers, cements and pastes. *Int Endod J.* 1981 May;14(2):125–33.
196. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M. Dental materials with antibiofilm properties. *Dent Mater Off Publ Acad Dent Mater.* 2014 Feb;30(2):e1-16.
197. McHugh CP, Zhang P, Michalek S, Eleazer PD. pH required to kill *Enterococcus faecalis* in vitro. *J Endod.* 2004 Apr;30(4):218–9.

198. Wang Z, Shen Y, Haapasalo M. Dentin extends the antibacterial effect of endodontic sealers against *Enterococcus faecalis* biofilms. *J Endod.* 2014 Apr;40(4):505–8.
199. Jitaru S, Hodisan I, Timis L, Lucian A, Bud M. The use of bioceramics in endodontics - literature review. *Clujul Med.* 2016;89(4):470–3.
200. Asgary S, Akbari Kamrani F, Taheri S. Evaluation of antimicrobial effect of MTA, calcium hydroxide, and CEM cement. *Iran Endod J.* 2007;2(3):105–9.
201. Lovato KF, Sedgley CM. Antibacterial activity of endosequence root repair material and proroot MTA against clinical isolates of *Enterococcus faecalis*. *J Endod.* 2011 Nov;37(11):1542–6.
202. Arias-Moliz MT, Camilleri J. The effect of the final irrigant on the antimicrobial activity of root canal sealers. *J Dent.* 2016;52:30–6.
203. Singh G, Elshamy FM, Homeida HE, Boreak N, Gupta I. An in vitro Comparison of Antimicrobial Activity of Three Endodontic Sealers with Different Composition. *J Contemp Dent Pract.* 2016 Jul 1;17(7):553–6.
204. Hiremath GS, Kulkarni RD, Naik BD. Evaluation of minimal inhibitory concentration of two new materials using tube dilution method: An in vitro study. *J Conserv Dent JCD.* 2015 Apr;18(2):159–62.
205. Bhavana V, Chaitanya KP, Gandhi P, Patil J, Dola B, Reddy RB. Evaluation of antibacterial and antifungal activity of new calcium-based cement (Biodentine) compared to MTA and glass ionomer cement. *J Conserv Dent JCD.* 2015 Feb;18(1):44–6.
206. Alsalleeh F, Chung N, Stephenson L. Antifungal activity of endosequence root repair material and mineral trioxide aggregate. *J Endod.* 2014 Nov;40(11):1815–9.
207. Simon S, Perard M, Zanini M, Smith AJ, Charpentier E, Djole SX, et al. Should pulp chamber pulpotomy be seen as a permanent treatment? Some preliminary thoughts. *Int Endod J.* 2013 Jan;46(1):79–87.
208. Glossary of Endodontic Terms [Internet]. American Association of Endodontists. [cited 2020 Feb 5]. Available from: <https://www.aae.org/specialty/clinical-resources/glossary-endodontic-terms/>
209. American Academy of Pediatric Dentistry (AAPD) Guideline on pulp therapy for primary and immature permanent tooth [Internet]. 2014 [cited 2020 Mar 1]. Available from: https://www.aapd.org/globalassets/media/policies_guidelines/bp_pulptherapy.pdf
210. Pimenta HC, Borges ÁH, Bandeca MC, Neves ATS, Fontes RG, da Silva PV, et al. Antimicrobial activity of filling materials used in primary teeth pulpotomy. *J Int Oral Health JIOH.* 2015 Apr;7(4):54–7.
211. Goldberg M, Schmalz G. Toward a strategic plan for pulp healing: from repair to regeneration. *Clin Oral Investig.* 2011 Feb;15(1):1–2.
212. Simon L, Aucler C. Le traitement pulpaire des dents permanentes immatures. :153.
213. Lipski M, Nowicka A, Kot K, Postek-Stefańska L, Wysoczańska-Jankowicz I, Borkowski L, et al. Factors affecting the outcomes of direct pulp capping using Biodentine. *Clin Oral Investig.* 2018;22(5):2021–9.
214. Waterhouse P, Whitworth J, Camp J, Fuks A. Pediatric endodontics: Endodontic treatment for the primary and young permanent dentition. *Pathw Pulp.* 2011 Jan 1;808–57.
215. Matsuo T, Nakanishi T, Shimizu H, Ebisu S. A clinical study of direct pulp capping applied to carious-exposed pulps. *J Endod.* 1996 Oct;22(10):551–6.
216. Stanley HR. Criteria for standardizing and increasing credibility of direct pulp capping studies. *Am J Dent.* 1998 Jan;11 Spec No:S17-34.
217. Özgür B, Uysal S, Güngör HC. Partial Pulpotomy in Immature Permanent Molars After Carious Exposures Using Different Hemorrhage Control and Capping Materials. *Pediatr Dent.* 2017 Sep 15;39(5):364–70.
218. Shabahang S, Torabinejad M. Treatment of teeth with open apices using mineral

- trioxide aggregate. *Pract Periodontics Aesthetic Dent PPAD*. 2000 Apr;12(3):315–20; quiz 322.
219. Hermann BW. Ein weiterer Beitrag zur Frage der Pulpenbehandlung. *Zahnartzl Rundsch*. 1928;33:1372–6.
220. Mohammadi Z, Dummer PMH. Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology. *Int Endod J*. 2011 Aug;44(8):697–730.
221. Ferracane JL, Cooper PR, Smith AJ. Can interaction of materials with the dentin-pulp complex contribute to dentin regeneration? *Odontology*. 2010 Feb;98(1):2–14.
222. Bakland LK, Andreasen JO. Will mineral trioxide aggregate replace calcium hydroxide in treating pulpal and periodontal healing complications subsequent to dental trauma? A review. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2012 Feb;28(1):25–32.
223. Komabayashi T, Zhu Q, Eberhart R, Imai Y. Current status of direct pulp-capping materials for permanent teeth. *Dent Mater J*. 2016;35(1):1–12.
224. Cox CF, Sübay RK, Ostro E, Suzuki S, Suzuki SH. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. *Oper Dent*. 1996 Feb;21(1):4–11.
225. Poggio C, Ceci M, Dagna A, Beltrami R, Colombo M, Chiesa M. In vitro cytotoxicity evaluation of different pulp capping materials: A comparative study. *Arch Ind Hyg Toxicol*. 2015 Sep 25;66:181–8.
226. Camilleri J. The chemical composition of mineral trioxide aggregate. *J Conserv Dent JCD*. 2008 Oct;11(4):141–3.
227. Tomson PL, Grover LM, Lumley PJ, Sloan AJ, Smith AJ, Cooper PR. Dissolution of bio-active dentine matrix components by mineral trioxide aggregate. *J Dent*. 2007 Aug;35(8):636–42.
228. Fridland M, Rosado R. MTA solubility: a long term study. *J Endod*. 2005 May;31(5):376–9.
229. Kuratate M, Yoshiba K, Shigetani Y, Yoshiba N, Ohshima H, Okiji T. Immunohistochemical analysis of nestin, osteopontin, and proliferating cells in the reparative process of exposed dental pulp capped with mineral trioxide aggregate. *J Endod*. 2008 Aug;34(8):970–4.
230. Tziafas D, Pantelidou O, Alvanou A, Belibasakis G, Papadimitriou S. The dentinogenic effect of mineral trioxide aggregate (MTA) in short-term capping experiments. *Int Endod J*. 2002 Mar;35(3):245–54.
231. Tselnik M, Baumgartner JC, Marshall JG. Bacterial leakage with mineral trioxide aggregate or a resin-modified glass ionomer used as a coronal barrier. *J Endod*. 2004 Nov;30(11):782–4.
232. Tawil PZ, Duggan DJ, Galicia JC. Mineral trioxide aggregate (MTA): its history, composition, and clinical applications. *Compend Contin Educ Dent Jamesburg NJ* 1995. 2015 Apr;36(4):247–52; quiz 254, 264.
233. Smaïl-Faugeron V, Glenny A-M, Courson F, Durieux P, Muller-Bolla M, Fron Chabouis H. Pulp treatment for extensive decay in primary teeth. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018 31;5:CD003220.
234. El-Meligy OAS, Avery DR. Comparison of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide as pulpotomy agents in young permanent teeth (apexogenesis). *Pediatr Dent*. 2006 Oct;28(5):399–404.
235. Siddiqui SH, Mohamed AN. Calcific Metamorphosis: A Review. *Int J Health Sci*. 2016 Jul;10(3):437–42.
236. Hauteville DA. Coiffage pulpaire [Internet]. Conseil Dentaire Dr.Hauteville. [cited 2020 Mar 24]. Available from: <https://conseildentaire.com/glossary/coiffage-pulpaire-2/>
237. Hilton T. Keys to Clinical Success with Pulp Capping: A Review of the Literature.

Oper Dent. 2009;34(5):615–25.

238. Thompson V, Craig RG, Curro FA, Green WS, Ship JA. Treatment of deep carious lesions by complete excavation or partial removal. *J Am Dent Assoc* 1939. 2008 Jun;139(6):705–12.
239. Ricketts D, Lamont T, Innes NPT, Kidd E, Clarkson JE. Operative caries management in adults and children. *Cochrane Database Syst Rev*. 2013 Mar 28;(3):CD003808.
240. Schwendicke F, Dörfer CE, Paris S. Incomplete caries removal: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res*. 2013 Apr;92(4):306–14.
241. Leye Benoist F, Gaye Ndiaye F, Kane AW, Benoist HM, Farge P. Evaluation of mineral trioxide aggregate (MTA) versus calcium hydroxide cement (Dycal®) in the formation of a dentine bridge: a randomised controlled trial. *Int Dent J*. 2012 Feb;62(1):33–9.
242. Mente J, Hufnagel S, Leo M, Michel A, Gehrig H, Panagidis D, et al. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide direct pulp capping: long-term results. *J Endod*. 2014 Nov;40(11):1746–51.
243. Hilton TJ, Ferracane JL, Manel L, Northwest Practice-based Research Collaborative in Evidence-based Dentistry (NWP). Comparison of CaOH with MTA for direct pulp capping: a PBRN randomized clinical trial. *J Dent Res*. 2013 Jul;92(7 Suppl):16S-22S.
244. Chen Y, Chen X, Zhang Y, Zhou F, Deng J, Zou J, et al. Materials for pulpotomy in immature permanent teeth: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* [Internet]. 2019 Oct 23 [cited 2020 Mar 1];19. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6813108/>
245. Mahmoud SH, El-Negoly SA, Zaen El-Din AM, El-Zekrid MH, Grawish LM, Grawish HM, et al. Biodentine versus mineral trioxide aggregate as a direct pulp capping material for human mature permanent teeth – A systematic review. *J Conserv Dent JCD*. 2018;21(5):466–73.
246. Paula A, Carrilho E, Laranjo M, Abrantes AM, Casalta-Lopes J, Botelho MF, et al. Direct Pulp Capping: Which is the Most Effective Biomaterial? A Retrospective Clinical Study. *Materials* [Internet]. 2019 Oct 16 [cited 2020 Mar 2];12(20). Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6829284/>
247. Al-Dlaigan YH. Pulpotomy Medicaments used in Deciduous Dentition: An Update. *J Contemp Dent Pract*. 2015 01;16(6):486–503.
248. Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J*. 2006;39(12):921–30.
249. Shabahang S. Treatment Options: Apexogenesis and Apexification. *J Endod*. 2013 Mar 1;39(3):S26–9.
250. Cvek M. A clinical report on partial pulpotomy and capping with calcium hydroxide in permanent incisors with complicated crown fracture. *J Endod*. 1978 Jan 1;4(8):232–7.
251. Yildiz E, Tosun G. Evaluation of formocresol, calcium hydroxide, ferric sulfate, and MTA primary molar pulpotomies. *Eur J Dent*. 2014 Apr;8(2):234–40.
252. Caruso S, Dinoi T, Marzo G, Campanella V, Giuca MR, Gatto R, et al. Clinical and radiographic evaluation of biodentine versus calcium hydroxide in primary teeth pulpotomies: a retrospective study. *BMC Oral Health* [Internet]. 2018 Apr 2 [cited 2020 Mar 1];18. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5879808/>
253. Lin P-Y, Chen H-S, Wang Y-H, Tu Y-K. Primary molar pulpotomy: a systematic review and network meta-analysis. *J Dent*. 2014 Sep;42(9):1060–77.
254. Eghbal MJ, Asgary S, Baglue RA, Parirokh M, Ghodduzi J. MTA pulpotomy of human permanent molars with irreversible pulpitis. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc*. 2009 Apr;35(1):4–8.
255. Asgary S, Eghbal MJ. Treatment outcomes of pulpotomy in permanent molars with irreversible pulpitis using biomaterials: a multi-center randomized controlled trial. *Acta*

- Odontol Scand. 2013 Jan;71(1):130–6.
256. Chueh L-H, Chiang C-P. Histology of Irreversible pulpitis premolars treated with mineral trioxide aggregate pulpotomy. *Oper Dent.* 2010 Jun;35(3):370–4.
257. Duncan HF, Bjørndal L, Sluis L van der, Rechenberg DK, Simon S, Cooper PR, et al. Third European Society of Endodontology (ESE) research meeting: ACTA, Amsterdam, The Netherlands, 26th October 2018. *Int Endod J.* 2019;52(2):135–8.
258. R20-Réaliser un coiffage direct avec materiau bioactif.pdf [Internet]. [cited 2020 Feb 5]. Available from: <http://www.cneoc.eu/docs/R20-R%C3%A9aliser%20un%20coiffage%20direct%20avec%20materiau%20bioactif.pdf>
259. Yassen GH. The Orthograde Application of Mineral Trioxide Aggregate Apical Plug May Be an Effective Treatment Approach in Teeth With Open Apices. *J Evid Based Dent Pract.* 2013 Sep 1;13(3):104–6.
260. Dionnet C. L'obturation endodontique des dents permanentes à apex largement ouvert : étude comparative de l'étanchéité apicale entre la technique du cône moulé associée à la biocéramique et le bouchon de MTA. :88.
261. Collège national des enseignants en odontologie conservatrice et endodontie. Dictionnaire francophone des termes d'odontologie conservatrice: endodontie & odontologie restauratrice : lexique anglais-français et annexes inclus. Lasfargues J-J, Machtou P, editors. Paris, France: Editions SNPMD; 2004. 96 p.
262. Thé SD. The solvent action of sodium hypochlorite on fixed and unfixed necrotic tissue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1979 Jun;47(6):558–61.
263. Shabahang S, Pouresmail M, Torabinejad M. In vitro antimicrobial efficacy of MTAD and sodium hypochlorite. *J Endod.* 2003 Jul;29(7):450–2.
264. Morgan RW, Carnes DL, Montgomery S. The solvent effects of calcium hydroxide irrigating solution on bovine pulp tissue. *J Endod.* 1991 Apr;17(4):165–8.
265. Sjögren U, Figdor D, Spångberg L, Sundqvist G. The antimicrobial effect of calcium hydroxide as a short-term intracanal dressing. *Int Endod J.* 1991 May;24(3):119–25.
266. Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dent Traumatol.* 2002;18(3):134–7.
267. Das S. Apexification in a nonvital tooth by control of infection. *J Am Dent Assoc* 1939. 1980 Jun;100(6):880–1.
268. Torabinejad M, Khademi AA, Babagoli J, Cho Y, Johnson WB, Bozhilov K, et al. A new solution for the removal of the smear layer. *J Endod.* 2003 Mar;29(3):170–5.
269. Torabinejad M, Shabahang S, Aprecio RM, Kettering JD. The antimicrobial effect of MTAD: an in vitro investigation. *J Endod.* 2003 Jun;29(6):400–3.
270. Torabinejad M, Abu-Tahun I. Management of teeth with necrotic pulps and open apices. *Endod Top.* 2010;23(1):105–30.
271. Rafter M. Apexification: a review. *Dent Traumatol.* 2005;21(1):1–8.
272. Sheehy EC, Roberts GJ. Use of calcium hydroxide for apical barrier formation and healing in non-vital immature permanent teeth: a review. *Br Dent J.* 1997 Oct 11;183(7):241–6.
273. Nosrat A, Asgary S, Eghbal MJ, Ghodduji J, Bayat-Movahed S. Calcium-enriched mixture cement as artificial apical barrier: A case series. *J Conserv Dent JCD.* 2011;14(4):427–31.
274. Trope M. Treatment of the immature tooth with a non-vital pulp and apical periodontitis. *Dent Clin North Am.* 2010 Apr;54(2):313–24.
275. Holden DT, Schwartz SA, Kirkpatrick TC, Schindler WG. Clinical Outcomes of Artificial Root-end Barriers with Mineral Trioxide Aggregate in Teeth with Immature Apices. *J Endod.* 2008 Jul 1;34(7):812–7.
276. Moore A, Howley MF, O'Connell AC. Treatment of open apex teeth using two types

- of white mineral trioxide aggregate after initial dressing with calcium hydroxide in children. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2011 Jun;27(3):166–73.
277. Annamalai S, Mungara J. Efficacy of mineral trioxide aggregate as an apical plug in non-vital young permanent teeth: preliminary results. *J Clin Pediatr Dent*. 2010;35(2):149–55.
278. Jiang S, Wu H, Zhang CF. Partial Pulpotomy of Immature Teeth with Apical Periodontitis using Bioceramics and Mineral Trioxide Aggregate: A Report of Three Cases. *Chin J Dent Res Off J Sci Sect Chin Stomatol Assoc CSA*. 2016 Jun;19(2):115–20.
279. Chala S, Abouqal R, Rida S. Apexification of immature teeth with calcium hydroxide or mineral trioxide aggregate: systematic review and meta-analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2011 Oct;112(4):e36-42.
280. Lin J-C, Lu J-X, Zeng Q, Zhao W, Li W-Q, Ling J-Q. Comparison of mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide for apexification of immature permanent teeth: A systematic review and meta-analysis. *J Formos Med Assoc Taiwan Yi Zhi*. 2016 Jul;115(7):523–30.
281. El-Meligy OAS, Avery DR. Comparison of apexification with mineral trioxide aggregate and calcium hydroxide. *Pediatr Dent*. 2006 Jun;28(3):248–53.
282. Hatibović-Kofman Š, Raimundo L, Zheng L, Chong L, Friedman M, Andreasen JO. Fracture resistance and histological findings of immature teeth treated with mineral trioxide aggregate. *Dent Traumatol*. 2008 Jun 1;24(3):272–6.
283. Asgary S, Kamrani FA. Antibacterial effects of five different root canal sealing materials. *J Oral Sci*. 2008 Dec;50(4):469–74.
284. Tabarsi B, Parirokh M, Eghbal MJ, Haghdoost AA, Torabzadeh H, Asgary S. A comparative study of dental pulp response to several pulpotomy agents. *Int Endod J*. 2010 Jul;43(7):565–71.
285. Asgary S, Eghbal MJ, Ehsani S. Periradicular regeneration after endodontic surgery with calcium-enriched mixture cement in dogs. *J Endod*. 2010 May;36(5):837–41.
286. Bayram E, Bayram HM. Fracture resistance of immature teeth filled with mineral trioxide aggregate, bioaggregate, and biodentine. *Eur J Dent*. 2016;10(2):220–4.
287. Staffoli S, Plotino G, Nunez Torrijos BG, Grande NM, Bossù M, Gambarini G, et al. Regenerative Endodontic Procedures Using Contemporary Endodontic Materials. *Materials* [Internet]. 2019 Mar 19 [cited 2020 Mar 14];12(6). Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6471897/>
288. Moubarak J-P. Attitude thérapeutique face à une dent immature nécrosée (double point): Enquête auprès des praticiens en Alsace [Thèse d'exercice]. [2009-....., France]: Université de Strasbourg; 2016.
289. Shimizu E, Ricucci D, Albert J, Alobaid AS, Gibbs JL, Huang GT-J, et al. Clinical, radiographic, and histological observation of a human immature permanent tooth with chronic apical abscess after revitalization treatment. *J Endod*. 2013 Aug;39(8):1078–83.
290. Ostby BN. The role of the blood clot in endodontic therapy. An experimental histologic study. *Acta Odontol Scand*. 1961 Dec;19:324–53.
291. Nygaard-Ostby B, Hjortdal O. Tissue formation in the root canal following pulp removal. *Scand J Dent Res*. 1971;79(5):333–49.
292. Wigler R, Kaufman AY, Lin S, Steinbock N, Hazan-Molina H, Torneck CD. Revascularization: A Treatment for Permanent Teeth with Necrotic Pulp and Incomplete Root Development. *J Endod*. 2013 Mar 1;39(3):319–26.
293. Banchs F, Trope M. Revascularization of immature permanent teeth with apical periodontitis: new treatment protocol? *J Endod*. 2004 Apr;30(4):196–200.
294. Trope M. Regenerative potential of dental pulp. *J Endod*. 2008 Jul;34(7 Suppl):S13-17.
295. Shin SY, Albert JS, Mortman RE. One step pulp revascularization treatment of an immature permanent tooth with chronic apical abscess: a case report. *Int Endod J*. 2009

Dec;42(12):1118–26.

296. Thomson A, Kahler B. Regenerative endodontics--biologically-based treatment for immature permanent teeth: a case report and review of the literature. *Aust Dent J*. 2010 Dec;55(4):446–52.

297. Iohara K, Murakami M, Takeuchi N, Osako Y, Ito M, Ishizaka R, et al. A novel combinatorial therapy with pulp stem cells and granulocyte colony-stimulating factor for total pulp regeneration. *Stem Cells Transl Med*. 2013 Jul;2(7):521–33.

298. Law AS. Considerations for regeneration procedures. *J Endod*. 2013 Mar;39(3 Suppl):S44-56.

299. Wang Y, Zhu X, Zhang C. Pulp Revascularization on Permanent Teeth with Open Apices in a Middle-aged Patient. *J Endod*. 2015 Sep;41(9):1571–5.

300. Reynolds K, Johnson JD, Cohenca N. Pulp revascularization of necrotic bilateral bicuspid using a modified novel technique to eliminate potential coronal discoloration: a case report. *Int Endod J*. 2009 Jan;42(1):84–92.

301. Simon S. La revascularisation canalaire : les premiers pas de l'ingénierie tissulaire en endodontie. *Clinic (Paris) [Internet]*. 2010 [cited 2020 Mar 14];31. Available from: <https://docplayer.fr/14398330-La-revascularisation-canalaire.html>

302. Moreno-Hidalgo MC, Caleza-Jimenez C, Mendoza-Mendoza A, Iglesias-Linares A. Revascularization of immature permanent teeth with apical periodontitis. *Int Endod J*. 2014 Apr;47(4):321–31.

303. Ducret M. Ingénierie tissulaire de la pulpe dentaire : vers le développement d'un médicament de thérapie innovante [Internet] [phdthesis]. Université Claude Bernard - Lyon I; 2015 [cited 2020 Mar 14]. Available from: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01313316>

304. Huang GT-J, Lin LM. Letter to the editor: comments on the use of the term “revascularization” to describe root regeneration. *J Endod*. 2008 May;34(5):511; author reply 511-512.

305. Wang X, Thibodeau B, Trope M, Lin LM, Huang GT-J. Histologic characterization of regenerated tissues in canal space after the revitalization/revascularization procedure of immature dog teeth with apical periodontitis. *J Endod*. 2010 Jan;36(1):56–63.

306. Chen MY-H, Chen K-L, Chen C-A, Tayebaty F, Rosenberg PA, Lin LM. Responses of immature permanent teeth with infected necrotic pulp tissue and apical periodontitis/abscess to revascularization procedures. *Int Endod J*. 2012 Mar;45(3):294–305.

307. Shimizu E, Jong G, Partridge N, Rosenberg PA, Lin LM. Histologic observation of a human immature permanent tooth with irreversible pulpitis after revascularization/regeneration procedure. *J Endod*. 2012 Sep;38(9):1293–7.

308. Lenzi R, Trope M. Revitalization procedures in two traumatized incisors with different biological outcomes. *J Endod*. 2012 Mar;38(3):411–4.

309. Huang GT-J, Sonoyama W, Liu Y, Liu H, Wang S, Shi S. The hidden treasure in apical papilla: the potential role in pulp/dentin regeneration and bioroot engineering. *J Endod*. 2008 Jun;34(6):645–51.

310. Lovelace TW, Henry MA, Hargreaves KM, Diogenes A. Evaluation of the delivery of mesenchymal stem cells into the root canal space of necrotic immature teeth after clinical regenerative endodontic procedure. *J Endod*. 2011 Feb;37(2):133–8.

311. Sonoyama W, Liu Y, Fang D, Yamaza T, Seo B-M, Zhang C, et al. Mesenchymal stem cell-mediated functional tooth regeneration in swine. *PloS One*. 2006 Dec 20;1:e79.

312. Sonoyama W, Liu Y, Yamaza T, Tuan RS, Wang S, Shi S, et al. Characterization of the apical papilla and its residing stem cells from human immature permanent teeth: a pilot study. *J Endod*. 2008 Feb;34(2):166–71.

313. Araújo PR de S, Silva LB, Neto AP dos S, Almeida de Arruda JA, Álvares PR, Sobral APV, et al. Pulp Revascularization: A Literature Review. *Open Dent J*. 2017 Jan 31;10:48–

56.

314. Sato I, Ando-Kurihara N, Kota K, Iwaku M, Hoshino E. Sterilization of infected root-canal dentine by topical application of a mixture of ciprofloxacin, metronidazole and minocycline in situ. *Int Endod J*. 1996 Mar;29(2):118–24.
315. Hoshino E, Kurihara-Ando N, Sato I, Uematsu H, Sato M, Kota K, et al. In-vitro antibacterial susceptibility of bacteria taken from infected root dentine to a mixture of ciprofloxacin, metronidazole and minocycline. *Int Endod J*. 1996 Mar;29(2):125–30.
316. Ruparel NB, Teixeira FB, Ferraz CCR, Diogenes A. Direct effect of intracanal medicaments on survival of stem cells of the apical papilla. *J Endod*. 2012 Oct;38(10):1372–5.
317. Cheek CC, Heymann HO. Dental and oral discolorations associated with minocycline and other tetracycline analogs. *J Esthet Dent*. 1999;11(1):43–8.
318. Huang GT-J. A paradigm shift in endodontic management of immature teeth: conservation of stem cells for regeneration. *J Dent*. 2008 Jun;36(6):379–86.
319. Bose R, Nummikoski P, Hargreaves K. A retrospective evaluation of radiographic outcomes in immature teeth with necrotic root canal systems treated with regenerative endodontic procedures. *J Endod*. 2009 Oct;35(10):1343–9.
320. Petrino JA, Boda KK, Shambarger S, Bowles WR, McClanahan SB. Challenges in regenerative endodontics: a case series. *J Endod*. 2010 Mar;36(3):536–41.
321. Jeeruphan T, Jantarat J, Yanpiset K, Suwannapan L, Khewsawai P, Hargreaves KM. Mahidol study 1: comparison of radiographic and survival outcomes of immature teeth treated with either regenerative endodontic or apexification methods: a retrospective study. *J Endod*. 2012 Oct;38(10):1330–6.
322. Torabinejad M, Nosrat A, Verma P, Udochukwu O. Regenerative Endodontic Treatment or Mineral Trioxide Aggregate Apical Plug in Teeth with Necrotic Pulp and Open Apices: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Endod*. 2017 Nov;43(11):1806–20.
323. Galler KM, Krastl G, Simon S, Van Gorp G, Meschi N, Vahedi B, et al. European Society of Endodontology position statement: Revitalization procedures. *Int Endod J*. 2016 Aug;49(8):717–23.
324. Parirokh M, Torabinejad M, Dummer PMH. Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: an updated overview - part I: vital pulp therapy. *Int Endod J*. 2018 Feb;51(2):177–205.
325. Wongwatanasanti N, Jantarat J, Sritanaudomchai H, Hargreaves KM. Effect of Bioceramic Materials on Proliferation and Odontoblast Differentiation of Human Stem Cells from the Apical Papilla. *J Endod*. 2018 Aug;44(8):1270–5.
326. Nosrat A, Seifi A, Asgary S. Regenerative endodontic treatment (revascularization) for necrotic immature permanent molars: a review and report of two cases with a new biomaterial. *J Endod*. 2011 Apr;37(4):562–7.
327. Murray PE, Garcia-Godoy F, Hargreaves KM. Regenerative endodontics: a review of current status and a call for action. *J Endod*. 2007 Apr;33(4):377–90.
328. Smith AJ, Smith JG, Shelton RM, Cooper PR. Harnessing the natural regenerative potential of the dental pulp. *Dent Clin North Am*. 2012 Jul;56(3):589–601.
329. Nazzal H, Duggal MS. Regenerative endodontics: a true paradigm shift or a bandwagon about to be derailed? *Eur Arch Paediatr Dent*. 2017;18(1):3–15.
330. Schmalz G, Smith AJ. Pulp development, repair, and regeneration: challenges of the transition from traditional dentistry to biologically based therapies. *J Endod*. 2014 Apr;40(4 Suppl):S2-5.
331. ingénierie tissulaire [Internet]. [cited 2020 Mar 18]. Available from: http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17013235
332. Chen F-M, Wu L-A, Zhang M, Zhang R, Sun H-H. Homing of endogenous

- stem/progenitor cells for in situ tissue regeneration: Promises, strategies, and translational perspectives. *Biomaterials*. 2011 Apr;32(12):3189–209.
333. Rosa V, Zhang Z, Grande RHM, Nör JE. Dental pulp tissue engineering in full-length human root canals. *J Dent Res*. 2013 Nov;92(11):970–5.
334. Dissanayaka WL, Zhu L, Hargreaves KM, Jin L, Zhang C. Scaffold-free Prevascularized Microtissue Spheroids for Pulp Regeneration. *J Dent Res*. 2014 Dec;93(12):1296–303.
335. Cao Y, Song M, Kim E, Shon W, Chugal N, Bogen G, et al. Pulp-dentin Regeneration: Current State and Future Prospects. *J Dent Res*. 2015 Nov;94(11):1544–51.
336. Albuquerque MTP, Valera MC, Nakashima M, Nör JE, Bottino MC. Tissue-engineering-based Strategies for Regenerative Endodontics. *J Dent Res*. 2014 Dec;93(12):1222–31.
337. Cvek M. Treatment of non-vital permanent incisors with calcium hydroxide. IV. Periodontal healing and closure of the root canal in the coronal fragment of teeth with intra-alveolar fracture and vital apical fragment. A follow-up. *Odontol Revy*. 1974;25(3):239–46.
338. Cvek M, Mejàre I, Andreasen JO. Conservative endodontic treatment of teeth fractured in the middle or apical part of the root. *Dent Traumatol*. 2004;20(5):261–9.
339. Bramante CM, Menezes R, Moraes IG, Bernardinelli N, Garcia RB, Letra A. Use of MTA and intracanal post reinforcement in a horizontally fractured tooth: a case report. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2006 Oct;22(5):275–8.
340. Yildirim T, Gençoğlu N. Use of mineral trioxide aggregate in the treatment of horizontal root fractures with a 5-year follow-up: report of a case. *J Endod*. 2009 Feb;35(2):292–5.
341. Erdem AP, Ozdas DO, Dincol E, Sepet E, Aren G. Case Series: root healing with MTA after horizontal fracture. *Eur Arch Paediatr Dent Off J Eur Acad Paediatr Dent*. 2009 Jun;10(2):110–3.
342. Kusgoz A, Yildirim T, Tanriver M, Yesilyurt C. Treatment of horizontal root fractures using MTA as apical plug: report of 3 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2009 May;107(5):e68-72.
343. Roig M, Espona J, Mercadé M, Duran-Sindreu F. Horizontal root fracture treated with MTA, a case report with a 10-year follow-up. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2011 Dec;27(6):460–3.
344. Celikten B, Uzuntas CF, Safaralizadeh R, Demirel G, Sevimay S. Multidisciplinary approach for the treatment of horizontal root-fractured maxillary anterior teeth. *Case Rep Dent*. 2014;2014:472759.
345. Chaniotis A. The use of MTA/blood mixture to induce hard tissue healing in a root fractured maxillary central incisor. Case report and treatment considerations. *Int Endod J*. 2014 Oct;47(10):989–99.
346. Kim D, Yue W, Yoon T-C, Park S-H, Kim E. Healing of Horizontal Intra-alveolar Root Fractures after Endodontic Treatment with Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod*. 2016 Feb;42(2):230–5.
347. Hess D, Solomon E, Spears R, He J. Retreatability of a bioceramic root canal sealing material. *J Endod*. 2011 Nov;37(11):1547–9.
348. de Siqueira Zuolo A, Zuolo ML, da Silveira Bueno CE, Chu R, Cunha RS. Evaluation of the Efficacy of TRUShape and Reciproc File Systems in the Removal of Root Filling Material: An Ex Vivo Micro-Computed Tomographic Study. *J Endod*. 2016 Feb;42(2):315–9.
349. Kim H, Kim E, Lee S-J, Shin S-J. Comparisons of the Retreatment Efficacy of Calcium Silicate and Epoxy Resin-based Sealers and Residual Sealer in Dentinal Tubules. *J Endod*. 2015 Dec;41(12):2025–30.
350. Uzunoglu E, Yilmaz Z, Sungur DD, Altundasar E. Retreatability of Root Canals

- Obtured Using Gutta-Percha with Bioceramic, MTA and Resin-Based Sealers. *Iran Endod J.* 2015;10(2):93–8.
351. Oltra E, Cox TC, LaCourse MR, Johnson JD, Paranjpe A. Retreatability of two endodontic sealers, EndoSequence BC Sealer and AH Plus: a micro-computed tomographic comparison. *Restor Dent Endod.* 2017 Feb;42(1):19–26.
352. Testori T, Capelli M, Milani S, Weinstein RL. Success and failure in periradicular surgery: a longitudinal retrospective analysis. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1999 Apr;87(4):493–8.
353. Gatewood RS. Endodontic materials. *Dent Clin North Am.* 2007 Jul;51(3):695–712, vii.
354. Abusrewil SM, McLean W, Scott JA. The use of Bioceramics as root-end filling materials in periradicular surgery: A literature review. *Saudi Dent J.* 2018 Oct;30(4):273–82.
355. Osorio RM, Hefti A, Vertucci FJ, Shawley AL. Cytotoxicity of endodontic materials. *J Endod.* 1998 Feb;24(2):91–6.
356. Souza NJA, Justo GZ, Oliveira CR, Haun M, Bincoletto C. Cytotoxicity of materials used in perforation repair tested using the V79 fibroblast cell line and the granulocyte-macrophage progenitor cells. *Int Endod J.* 2006 Jan;39(1):40–7.
357. Torabinejad M, Rastegar AF, Kettering JD, Pitt Ford TR. Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material. *J Endod.* 1995 Mar;21(3):109–12.
358. Kogan P, He J, Glickman GN, Watanabe I. The effects of various additives on setting properties of MTA. *J Endod.* 2006 Jun;32(6):569–72.
359. Fernández-Yáñez Sánchez A, Leco-Berrocal MI, Martínez-González JM. Metaanalysis of filler materials in periapical surgery. *Med Oral Patol Oral Cirugia Bucal.* 2008 Mar 1;13(3):E180-185.
360. Tang Y, Li X, Yin S. Outcomes of MTA as root-end filling in endodontic surgery: a systematic review. *Quintessence Int Berl Ger 1985.* 2010 Aug;41(7):557–66.
361. Walsh RM, Woodmansey KF, Glickman GN, He J. Evaluation of compressive strength of hydraulic silicate-based root-end filling materials. *J Endod.* 2014 Jul;40(7):969–72.
362. Bolhari B, Ashofteh Yazdi K, Sharifi F, Pirmoazen S. Comparative Scanning Electron Microscopic Study of the Marginal Adaptation of Four Root-End Filling Materials in Presence and Absence of Blood. *J Dent Tehran Iran.* 2015 Mar;12(3):226–34.
363. Saraswathi DD, Tejavath SK, Babu MR, Swetha B, Gandhi B, Shaanthi. A Comparative Evaluation of Sealing Ability of Three Recent Root-End Filling Materials: An In Vitro Study. *J Adv Oral Res.* 2015 May 1;6(2):33–9.
364. Antunes HS, Gominho LF, Andrade-Junior CV, Dessaune-Neto N, Alves FRF, Rôças IN, et al. Sealing ability of two root-end filling materials in a bacterial nutrient leakage model. *Int Endod J.* 2016 Oct;49(10):960–5.
365. Nair U, Ghattas S, Saber M, Natera M, Walker C, Pileggi R. A comparative evaluation of the sealing ability of 2 root-end filling materials: an in vitro leakage study using *Enterococcus faecalis*. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011 Aug;112(2):e74-77.
366. Moradi S, Lomee M, Gharechahi M. Comparison of fluid filtration and bacterial leakage techniques for evaluation of microleakage in endodontics. *Dent Res J.* 2015 Apr;12(2):109–14.
367. Shinbori N, Grama AM, Patel Y, Woodmansey K, He J. Clinical outcome of endodontic microsurgery that uses EndoSequence BC root repair material as the root-end filling material. *J Endod.* 2015 May;41(5):607–12.
368. Kim S, Kratchman S. Modern endodontic surgery concepts and practice: a review. *J Endod.* 2006 Jul;32(7):601–23.

369. de Lange J, Putters T, Baas EM, van Ingen JM. Ultrasonic root-end preparation in apical surgery: a prospective randomized study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2007 Dec;104(6):841–5.
370. Kim S. Principles of endodontic microsurgery. *Dent Clin North Am.* 1997 Jul;41(3):481–97.
371. Setzer FC, Shah SB, Kohli MR, Karabucak B, Kim S. Outcome of endodontic surgery: a meta-analysis of the literature--part 1: Comparison of traditional root-end surgery and endodontic microsurgery. *J Endod.* 2010 Nov;36(11):1757–65.
372. Setzer FC, Kohli MR, Shah SB, Karabucak B, Kim S. Outcome of endodontic surgery: a meta-analysis of the literature--Part 2: Comparison of endodontic microsurgical techniques with and without the use of higher magnification. *J Endod.* 2012 Jan;38(1):1–10.
373. Mente J, Leo M, Panagidis D, Saure D, Pfefferle T. Treatment outcome of mineral trioxide aggregate: repair of root perforations-long-term results. *J Endod.* 2014 Jun;40(6):790–6.
374. de Sousa Reis M, Scarparo RK, Steier L, de Figueiredo JAP. Periradicular inflammatory response, bone resorption, and cementum repair after sealing of furcation perforation with mineral trioxide aggregate (MTA Angelus™) or Biodentine™. *Clin Oral Investig.* 2019 Nov;23(11):4019–27.
375. Jeevani E, Jayaprakash T, Bolla N, Vemuri S, Sunil CR, Kalluru RS. Evaluation of sealing ability of MM-MTA, Endosequence, and biodentine as furcation repair materials: UV spectrophotometric analysis. *J Conserv Dent JCD.* 2014 Jul;17(4):340–3.
376. Ne RF, Witherspoon DE, Gutmann JL. Tooth resorption. *Quintessence Int Berl Ger* 1985. 1999 Jan;30(1):9–25.
377. Aidos H, Diogo P, Santos JM. Root Resorption Classifications: A Narrative Review and a Clinical Aid Proposal for Routine Assessment. *Eur Endod J.* 2018;3(3):134–45.
378. Fuss Z, Tsesis I, Lin S. Root resorption--diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol.* 2003 Aug;19(4):175–82.
379. Gunraj MN. Dental root resorption. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 1999 Dec;88(6):647–53.
380. Andreasen JO. Luxation of permanent teeth due to trauma. A clinical and radiographic follow-up study of 189 injured teeth. *Scand J Dent Res.* 1970;78(3):273–86.
381. Patel S. New dimensions in endodontic imaging: Part 2. Cone beam computed tomography. *Int Endod J.* 2009 Jun;42(6):463–75.
382. Durack C, Patel S. Cone beam computed tomography in endodontics. *Braz Dent J.* 2012;23(3):179–91.
383. Heithersay GS. Management of tooth resorption. *Aust Dent J.* 2007 Mar;52(1 Suppl):S105-121.
384. Heithersay GS. Clinical endodontic and surgical management of tooth and associated bone resorption. *Int Endod J.* 1985;18(2):72–92.
385. Heithersay GS. Treatment of invasive cervical resorption: an analysis of results using topical application of trichloroacetic acid, curettage, and restoration. *Quintessence Int Berl Ger* 1985. 1999 Feb;30(2):96–110.
386. Cvek M. Treatment of non-vital permanent incisors with calcium hydroxide. II. Effect on external root resorption in luxated teeth compared with effect of root filling with guttapercha. A follow-up. *Odontol Revy.* 1973;24(4):343–54.
387. Andreasen JO, Borum MK, Jacobsen HL, Andreasen FM. Replantation of 400 avulsed permanent incisors. 4. Factors related to periodontal ligament healing. *Endod Dent Traumatol.* 1995 Apr;11(2):76–89.
388. Panzarini SR, Trevisan CL, Brandini DA, Poi WR, Sonoda CK, Luvizuto ER, et al.

- Intracanal dressing and root canal filling materials in tooth replantation: a literature review. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2012 Feb;28(1):42–8.
389. Farhad A, Mohammadi Z. Calcium hydroxide: a review. *Int Dent J*. 2005 Oct;55(5):293–301.
390. Panzarini SR, Holland R, de Souza V, Poi WR, Sonoda CK, Pedrini D. Mineral trioxide aggregate as a root canal filling material in reimplanted teeth. Microscopic analysis in monkeys. *Dent Traumatol Off Publ Int Assoc Dent Traumatol*. 2007 Oct;23(5):265–72.
391. Zare Jahromi M, Kalantar Motamedi MR. Effect of calcium hydroxide on inflammatory root resorption and ankylosis in replanted teeth compared with other intracanal materials: a review. *Restor Dent Endod*. 2019 Aug;44(3):e32.
392. Subay RK, Subay MO, Tuzcu SB. Endodontic management of root perforating internal replacement resorption. *Eur J Dent*. 2018 Sep;12(3):450–3.
393. Mehra N, Yadav M, Kaushik M, Roshni R. Clinical Management of Root Resorption: A Report of Three Cases. *Cureus [Internet]*. [cited 2020 Mar 9];10(8). Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6205902/>

IX. ANNEXE : TABLEAUX DE PRODUITS CÉRAMIQUES

Nous avons relevé les différents produits rencontrés dans les documents de recherche, ainsi que leurs indications annoncées.

Il ne s'agit nullement d'une liste exhaustive des ciments biocéramiques endodontiques disponibles, mais plutôt d'un exemple de la variété des produits proposés (et cités) et des indications traitées.

			Coiffage Pulpotomie	Réséction apicale	Ciment d' obturation endodontique	Perforations Résorptions	Apexification
Biocéramiques endodontiques à base de MTA	Maruchi Wonju, Corée du Sud	Endocem MTA	x	x		x	
		Endoseal MTA			x	x	
	Harvard Dental International GmbH, Hoppegarten, Allemagne	Harward MTA Caps	x	x		x	
	Riemser, Riems, Allemagne	Ledermix MTA	x	x		x	x
	Micromega, Besancon, France	MM MTA	x	x		x	x
	Angelus dental solutions, Londrina, Brésil	MTA Angelus white	x	x		x	x
		MTA Repair HP	x			x	x
		MTA Fillapex			x		x
	Avalon Biomed, Bradenton, USA	MTA Plus (grey)	x	x	x	x	x
		MTA Plus (white)	x	x	x	x	x
	Prevest Detpro Limited, Jammu, Inde	MTA Plus (white)	x	x	x	x	x
	Dentsply Tulsa, Johnson City, USA	ProRoot MTA grey	x	x		x	x
		ProRoot MTA white	x	x		x	x
		ProRoot Endo			x		
		Generex A		x		x	
	BioMTA, Seoul, Corée du Sud	Retro MTA		x		x	
Ortho MTA				x		x	
Produits Dentaires, Vevey, Suisse	PD MTA white		x	x	x	x	
Giovanni Ogna and Figli, Milan, Italie	Aureoseal MTA		x		x		

			Coiffage Pulpotomie	Résection apicale	Ciment d' obturation endodontique	Perforations Résorptions	Apexification
Nouvelles Biocéramiques endodontiques	Septodont Saint-Maur-des-Fossés, France	Biodentine	x	x		x	
		BioRoot RCS					
	Egeo Srl, Buenos Aires, Argentine	CPM	x	x		x	x
		Endo CPM Sealer			x		
	Bisco Inc, Schaumburg, USA	TheraCal LC	x				
	Brasseler, Savanah, USA	EndoSequence BC RMM = TotalFill BC RMM	x	x		x	x
		EndoSequence BC sealer = TotalFill BC Sealer			x		
	Innovative BioCeramik Inc, Vancouver, Canada	iRoot SP = BC Sealer			x		x
		iRoot BP (Paste)	x			x	
		iRoot BP Plus (Putty)	x	x		x	x
		BioAggregate			x	x	
		iRoot FS (Fast Set = prise rapide)	x	x		x	x
	Primus Consulting, Bradenton, USA	Capasio			x		
	Isasan srl, Rovello Porro, Italie	Tech Biosealer endo			x		
		Tech Biosealer root end		x		x	
		Tech Biosealer capping	x				
		Tech Biosealer apex					x
	Vericom Co., Gyeonggi-do, Corée du Sud	Well-Root PT	x	x		x	x
		Well-Root ST			x		
	BioniqueDent, Téhéran, Iran	Calcium-enriched Mixture (CEM) cement			x		
	Australian Dental Manufacturing Brisbane, Australie	Odontocem	x				
	Binderware, Sao Carlos, Brésil	Endobinder	x			x	
	Angelus dental solutions, Londrina, Brésil	Bio-C sealer			x		
Maruchi Wonju, Corée du Sud	Endocem Zr	x					
Avalon Biomed, Bradenton, USA	NeoMTA Plus	x	x	x	x	x	
	NeoMTA 2	x	x			x	

DE LAJUDIE (Emilien) – Intérêts pédiatriques et protocoles opératoires des biocéramiques endodontiques sur dents permanentes immatures et dents matures jeunes - Connaissances et pratiques professionnelles des biocéramiques endodontiques en France.

(Thèse : 3^{ème} cycle Sci. odontol. : Strasbourg : 2020 ; N° 38)

N° 43.22.20.38

Résumé :

Après un rappel de l'histologie dentaire et de la physiologie pulpaire (saine et pathologique), ainsi que des différents degrés d'atteintes pulpaires à travers la classification de Baume, nous avons pu décrire les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des biocéramiques endodontiques. Puis, suivant le gradient thérapeutique, nous nous sommes intéressés aux différentes atteintes de la pathologie pulpaire correspondant à des thérapeutiques progressives, et à l'intérêt des biocéramiques endodontiques concernant les dents permanentes chez l'enfant.

L'analyse de la littérature montre que les ciments biocéramiques possèdent des propriétés qui se rapprochent d'un ciment idéal. Ils se sont imposés dans le traitement d'une variété de complications pulpaires et parodontales, combinant les propriétés de l'hydroxyde de calcium et des matériaux d'obturation : dents aux pulpes inflammatoires ou exposées (coiffage et pulpotomie), aux racines immatures et nécrosées (apexification, revascularisation et nouvelles régénérations pulpaires), aux canaux infectés (obturation endodontique orthograde/rétrograde et réimplantation intentionnelle), avec des fractures radiculaires conjuguées à une nécrose pulpaire de la partie coronaire, et aux perforations ou résorptions radiculaires. Ces ciments sont également employés comme substituts dentinaires, pour des reminéralisations dentinaires, ou dans le traitement des hypersensibilités dentinaires...

Elles ont permis de mettre la biologie pulpaire et la nécessité de maintenir l'organe dentaire vivant au centre des thérapeutiques cliniques. La littérature étudiée semble être en faveur des ciments biocéramiques dans toutes les procédures endodontiques, hormis pour le coiffage pulpaire indirect où ils égalent le CVI (ciment verre ionomère).

La dernière partie de ce travail est consacrée à une enquête d'évaluation des pratiques professionnelles, basée sur un questionnaire diffusé en ligne incluant 173 praticiens. Il semble que cette nouvelle classe de matériaux intéresse les praticiens français, qui y voient principalement l'occasion d'améliorer leurs traitements et d'élargir leurs offres de soin. Beaucoup sont à présent informés et nombreux en sont déjà les utilisateurs, surtout pour les thérapeutiques avec maintien de la vitalité pulpaire.

Rubrique de classement : ENDODONTIE, ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE

Mots clés :

Biocéramique endodontique, Dent immature

Me SH :

Bioceramics, Permanent immature teeth

Jury :

Président : Professeur HAÏKEL Youssef
Assesseurs : Professeur CLAUSS François
Docteur STRUB Marion
Docteur MANCINO Davide
Membre invité : Docteur ROOS Thierry

Coordonnées de l'auteur :

Adresse postale : DE LAJUDIE Emilien, 30 rue Berthe Molly, 68000 Colmar

Adresse de messagerie : emiliendelajudie@hotmail.fr