

SOMMAIRE

INTRODUCTION..... 1

1^{ERE} PARTIE : LES CIMENTS ENDOCANALAIRES: REVUE DE LA LITTERATURE

I. LES CIMENTS D'OBTURATION CANALAIRE.....	3
1.1. Cahier de charge	3
1.2. Les familles de ciments d'obturation canalaire.....	6
1.2.1.Les ciments organiques	6
1.2.2.Ciments minéraux	9
II. EVALUATION DU TRAITEMENT ENDODONTIQUE.....	13
2.1. La qualité technique du traitement endodontique	13
2.2. Quand et comment évaluer la qualité technique de l'obturation ?.....	13
2.3. Critères d'évaluation.....	14
2.3.1.Critères cliniques	14
2.3.2.Critères radiologiques	14
2.3.2.1.La position de la limite apicale d'obturation	15
2.3.2.2.La densité de l'obturation	15

2^{EME} PARTIE : ACTUALITE ET PERSPECTIVES DES CIMENTS D'OBTURATION CANALAIRE: REVUE DE LA LITTERATURE

I. JUSTIFICATION	16
II. METHODOLOGIE.....	17
2.1. Stratégie de recherche pour la localisation des écrits	17
2.1.1.Recherche électronique	18
2.1.2.Recherche manuelle	19
2.2. Sélection des études	20
III. RESULTATS.....	21

IV. SYNTHESE ET DISCUSSION	22
4.1. Matériaux biocéramiques utilisés en endodontie	22
4.1.1. MTA	22
4.1.2. Biodentine TM	25
4.1.3. EndoSequence BC TM sealer et pâte d'obturation rétrograde	26
4.1.4. BioAggregate TM	28
4.1.5. Generex A TM	28
4.2. Caractéristiques des biocéramiques utilisées en endodontie	29
4.2.1. Force de liaison	29
4.2.2. Microfuite	31
4.2.3. Microbiologie	32
4.2.4. Cytotoxicité sur les fibroblastes du ligament parodontal	32
4.3. Applications cliniques	34
4.3.1. Recouvrement direct de la pulpe	34
4.3.2. Cicatrisation apicale	34
4.3.3. Régénération (revitalisation) des espaces canalaires	36
CONCLUSION	39
BIBLIOGRAPHIE	41

INTRODUCTION

Le succès du traitement endodontique passe par la gestion du facteur microbien au sein d'une anatomie canalaire complexe, particulièrement au niveau de la zone apicale. Ce résultat est obtenu par une préparation canalaire suivie d'une obturation tridimensionnelle du système canalaire [9, 84, 85].

La préparation canalaire se conçoit comme une préparation chimio-mécanique où, les limites des manœuvres instrumentales sont palliées par l'utilisation de solutions d'irrigation appropriées. Selon Laurichesse [59], la mise en forme canalaire est aujourd'hui le domaine exclusif d'une technologie mécanique et physico-chimique qui s'applique à redéfinir les parois canalaire pour aboutir à une cavité endodontique finale autorisant la mise en place d'une unité biocompatible de substitution, masse d'obturation dense, hermétique et durable respectant les structures anatomiques.

L'obturation canalaire, étape ultime du traitement endodontique, est un acte opératoire biologique principalement mécanique et secondairement médicamenteux. Elle consiste à combler l'espace vide laissé par l'élimination de la pulpe, par un matériau d'obturation [109]. Le matériau d'obturation canalaire le plus connu est le cône de gutta percha combiné avec l'eugénate. Par contre les ciments endodontiques restent le point faible de l'obturation canalaire car la plupart présente des variations dimensionnelles et plus précisément une rétraction de prise entraînant des hiatus ; futures voies de contamination bactérienne pouvant compromettre le succès du traitement à plus ou moins long terme d'où l'intérêt de l'étude des biocéramiques en endodontie.

L'avènement des ciments biocéramiques avec ses nombreux avantages relatifs à leur stabilité dimensionnelle, permettrait de pallier les limites des ciments d'obturation classiques en plus de leur biocompatibilité et de leur facilité d'utilisation [75].

Ainsi la présente étude se propose comme objectif de faire une synthèse de la littérature sur l'actualité et les perspectives des ciments d'obturation canalaire.

Le travail sera divisé en deux grandes parties :

- Une première partie sera consacrée à une revue de la littérature sur les ciments endocanariaires et l'évaluation du traitement endodontique.
- Et la deuxième partie concernera une synthèse de la littérature sur l'actualité et les perspectives des ciments d'obturation canalaire.

1^{ERE} PARTIE :
LES CIMENTS ENDOCANALAIRES:
REVUE DE LA LITTERATURE

I. LES CIMENTS D'OBTURATION CANALAIRE

Le ciment endodontique utilisé lors d'un traitement canalaire est le matériau destiné à établir un joint le plus étanche possible entre la gutta-percha et les parois canalaires. Il participe également à l'obturation du réseau canalaire (canaux latéraux, isthmes, canaux accessoires, delta apicaux...) et assure une action lubrifiante sur les cônes de gutta-percha. Aucun des ciments endodontiques existant actuellement n'assure une herméticité apicale, clé majeure de toute réussite endodontique. Dans cette mesure, aucun ciment n'est idéal, mais tous présentent des avantages et des inconvénients [103, 104, 105].

Le choix du ciment canalaire doit répondre à un cahier de charge essentiellement basé sur des propriétés physico-chimiques.

1.1. Cahier de charge

Le ciment de scellement doit :

- assurer la lubrification du canal et donc une meilleure mise en place des cônes de gutta-percha ;
- assurer un joint étanche entre la dentine et la gutta-percha pour supprimer toute porte d'entrée aux micro-organismes et aux fluides organiques ;
- jouer le rôle de matériau de comblement des espaces mécaniquement non préparés (les canaux latéraux et accessoires ainsi que les tubules dentinaires) nécessaire à l'herméticité de l'obturation ;
- créer un milieu défavorable au développement des micro-organismes.

Ainsi le ciment canalaire idéal devrait présenter les propriétés physico-chimiques suivantes :

- **un temps de travail suffisant, mais un temps de prise relativement court** car il est difficile de maintenir la siccité du canal préparé. Le temps de prise sera diminué *in vivo* (température de 37°C) ainsi que lors de l'emploi d'une technique d'obturation en gutta chaude. Le temps de travail

idéal semble se situer aux alentours de 15mn [58]. Tous les ciments présentent un temps de travail suffisant [64] même si le temps de prise annoncé par le fabricant est toujours inférieur à celui trouvé dans la littérature médicale .

- **une plasticité et une viscosité correctes** : la plasticité étant la propriété de ce qui peut être moulé, le matériau doit posséder cette qualité pour être modelé exactement sur les nombreuses irrégularités du canal. La tension superficielle et la fluabilité influencent la capacité du ciment à obturer les canaux fins, les canaux accessoires, les anfractuosités et les tubules. Lorsque la viscosité est trop faible, l'écoulement du matériau est difficile à contrôler. Au contraire, un ciment trop épais empêche la mise en place correcte des cônes de gutta-percha.
- **une mise en œuvre et une introduction faciles.** Il convient d'utiliser des matériaux et des techniques d'obturation reproductibles, en recherchant systématiquement la facilité de manipulation.
- **la formation d'un film très fin** lui permettant de fuser dans des irrégularités du système canalaire et les tubules dentinaires [110].
- **une stabilité dimensionnelle à la prise** pour prévenir la formation d'un hiatus entre le noyau obturateur et les parois dentinaires [76].
- **une insolubilité aux liquides organiques** pour éviter également la percolation et le développement de micro-organismes.
- **une adhésion aux parois dentinaires et à la préparation d'un logement canalaire.**
- **une radio-opacité** : elle est nécessaire à l'appréciation de la valeur de l'obturation en longueur et en volume et est soumise à une norme ISO.
- **une désobturation aisée en cas de retraitement.** Elle se fera à l'aide d'un ou de plusieurs solvants [19].
- **une biocompatibilité** car le matériau réalise un coiffage tissulaire à la jonction cémento-dentinaire. Il devra être accepté par l'organisme pour

permettre à cette zone une guérison spontanée ou favoriser une réaction cicatrisante du tissu conjonctif.

- **une résorbabilité en cas de dépassement de ciment.** Il est intéressant d'utiliser un ciment de scellement résorbable par l'organisme pour éviter un phénomène d'inflammation chronique.
- **Une action bactériostatique** pour prévenir le développement de micro-organismes résiduels.
- **Une "stérilité" de la matière obturatrice.** Le ciment endodontique doit être aseptique avant et pendant son insertion dans le canal et doit le demeurer après obturation.

Il existe actuellement deux grandes familles de pâtes/ciments de scellement :

- **les ciments organiques** (à base d'oxyde de zinc-eugénol ; à base de résine ; à base d'hydroxyde de calcium ; à base de verre ionomère ; à base de silicone) ;
- **les ciments minéraux** (les biocéramiques : MTA, biodentine etc).

1.2. Les familles de ciments d'obturation canalaire

1.2.1. Les ciments organiques

❖ Les ciments endodontiques à base de mélange oxyde de zinc eugénol

Les eugénates sont les ciments d'obturation canalaire les plus fréquemment retrouvés dans les cabinets, ils sont essentiellement composés par de l'oxyde de zinc (poudre), de l'eugénol (liquide) et de nombreux adjuvants [79].

Ils présentent une bonne biocompatibilité à moyen et long terme ainsi que des propriétés analgésique, anti-inflammatoire à faible dose, bactéricide et antifongique. Leur toxicité initiale due à l'eugénol diminue et disparaît avec le temps. Ils présentent de bonnes propriétés rhéologiques (déformation et écoulement de la matière sous l'effet d'une contrainte appliquée), une faible solubilité, une faible contraction de prise et une bonne étanchéité. De plus une liaison chimique s'établit entre l'oxyde de zinc contenu dans la gutta-percha et l'eugénol du ciment renforçant considérablement la stabilité du scellement.

Leur inconvénient majeur réside dans leur faible adhésion avec les parois dentinaires. Ils peuvent également entraîner une coloration grise de la dent due à l'argent présent dans leur composition [56].

❖ Les ciments endodontiques à base d'hydroxyde de calcium

Ces ciments d'obturation sont bien tolérés et favorisent la cicatrisation apicale par la formation d'un néo-cément. Ils pourraient cependant être à l'origine d'une inflammation apicale. Ils sont légèrement bactériostatiques.

Leur inconvénient reste leur résorption à long terme qui conduit à une perte d'étanchéité.

❖ Les ciments endodontiques à base de polymère résineux

Il s'agit de ciment de type bakélite ou époxy. Essentiellement composés de phénol et de formol, ils présentent une bonne biocompatibilité, une bonne

étanchéité, de bonnes propriétés mécaniques d'adhérence et une bonne résistance à la résorption. Ce sont toutefois les plus cytotoxiques parmi les différentes familles de ciment.

Leur inconvénient de taille est leur insolubilité en cas de nécessité de retraitement : ils sont alors très durs et impénétrables. Ils doivent donc être systématiquement utilisés en association avec une ou plusieurs pointes de gutta-percha et non en remplissage canalaire.

❖ **Les ciments endodontiques à base de verre ionomère**

Les ciments endodontiques à base de verre ionomère sont composés essentiellement par des aluminosilicates fluorés (poudre) et par des copolymères d'acide polyacrylique (liquide). Ils présentent une bonne biocompatibilité, de bonnes propriétés mécaniques d'adhérence et une bonne résistance même en faible épaisseur. Ils ont également un effet bactéricide par libération de fluorures (effet décroissant dans le temps).

Leurs inconvénients sont leur sensibilité aux conditions de prise (état d'humidité des canaux lors de l'obturation par exemple) et leur faible résorbabilité et solubilité entraînant de grandes difficultés à reprendre le traitement endodontique.

Les propriétés physiques du silicone (propriétés adhésives, insolubilité et stabilité chimique) ont conduit certains auteurs à utiliser un silicone additionné de sulfate de baryum pour obtenir la radio-opacité. Les études se poursuivent sur ce matériau récent. Il n'y a pas encore beaucoup de recul clinique mais les premiers résultats sont très encourageants. Ce serait la classe de ciment la moins cytotoxique [16].

❖ Ciments résineux

Ils sont à base de résine époxy ou de résine méthacrylate. Ces ciments ont, d'après **Orstavik** [77], été mis au point en Suisse il y a 50 ans par Schröder.

Les pâtes résineuses, sous la forme poudre-liquide, sont destinées à être utilisées en grande quantité dans le canal à l'aide d'un bourre-pâte.

La poudre contient de l'énoxolone et du sulfate de baryum. Le liquide est composé de 2 liquides différents à mélanger extemporanément : le liquide de traitement qui contient du paraformaldéhyde et des excipients, et le liquide durcissant qui est composé de résorcinol, d'acide chlorhydrique et d'excipients.

Les ciments de scellement à base de résine époxy possèdent de bonnes propriétés mécaniques et d'adhérence, une bonne étanchéité et une excellente résistance à la résorption. Ils libèrent peu de monomères mais peuvent montrer une toxicité initiale [15, 46]. Leur étanchéité est parmi les meilleures dans la plupart des études [82] mais semble diminuer avec le temps et n'est pas influencée par l'épaisseur du matériau [56].

❖ Ciments oxyde de zinc-eugénol renforcés à la résine (OZnR)

Ces ciments ont été initialement indiqués comme matériau de restauration provisoire. Leur composition est issue des ciments à base d'oxyde de zinc-eugénol mais ils ont été modifiés afin d'en raccourcir le temps de prise, trop long, et d'en diminuer la solubilité [78]. Les modifications ont porté sur le remplacement d'une partie de l'eugénol par l'acide orthoéoxybenzoïque (EBA, ethoxy benzoic acid) et/ou en incorporant de la résine en plus grande quantité dans la poudre.

A part l'obturation coronaire transitoire, l'indication la plus connue en endodontie concerne l'obturation des cavités rétrogrades. En effet, ces matériaux se sont imposés comme les solutions de remplacement de choix à l'amalgame pour les obturations à rétro en endodontie chirurgicale. Ils sont plus biocompatibles, de manipulation plus facile et, surtout, non corrodables.

Dans ces situations, la surface de contact entre le matériau et les tissus est plus importante et les effets tissulaires sont exacerbés.

Par rapport à des ciments à base d'oxyde de zinc-eugénol classiques, les modifications dans la composition permettraient de limiter l'hydrolyse du ciment et la libération de l'eugénol et du zinc qui sont les composés toxiques [62]. Le Super-EBA® est particulièrement recommandé pour ses propriétés mécaniques et sa faible solubilité [21]. La présence de fibre de collagène observée à la surface du Super-EBA® a été décrite en 1978 [78] et interprétée comme un signe de biocompatibilité.

Les ciments oxyde de zinc-eugénol renforcés à la résine ont une activité antibactérienne marquée et les oxydes de zinc en général ont une activité antifongique [30, 105].

Les valeurs d'étanchéité de ces ciments, bien que convenables par rapport à d'autres matériaux, sont inférieures à celles du MTA [35]. Leur biocompatibilité semble inférieure au MTA [35]. La résistance à la compression est similaire à celle du MTA (104). Leur étanchéité semble plus affectée par la contamination sanguine que le MTA [103].

Leur manipulation est décrite comme aisée, ils bénéficient de 50 ans d'antériorité, ce qui a contribué à l'élaboration de techniques de mise en œuvre codifiées.

1.2.2. Ciments minéraux

❖ **Mineral trioxide aggregate** (ProRoot MTA®, Dentsply Maillefer) et MTA Angelus®

Ce matériau, initialement conçu pour une utilisation en chirurgie endodontique est connu sous le nom de MTA (mineral trioxide aggregate).

Il est composé de 50 à 75 % d'oxyde de calcium et 15 à 25 % de dioxyde de silicium. De l'oxyde de bismuth est rajouté pour la radio-opacité. Trois parts de

poudre de ce ciment doivent être mélangées à une part d'eau stérile pour obtenir un gel colloïdal qui effectue sa prise en 2 h 45 min [125]. Le MTA est disponible sous deux formes : le MTA gris (MTAG), commercialisé en premier, et le MTA blanc (MTAB). Ce dernier ne posséderait pas d'aluminate ferrique [17]. Un autre ciment minéral de composition très semblable a été plus récemment commercialisé : le MTA Angelus® (MTAA) avec un temps de prise plus court, situé entre 14 et 15 minutes [107].

Malgré des similitudes de composition, le ciment de Portland contient des métaux lourds et la taille variable et grossière de ses particules ne permet pas de le substituer au MTA où elles sont d'une finesse et d'une régularité constantes [22]. La solubilité du MTA est décrite comme nulle ou faible [92] mais elle augmente avec le temps (43). Il montre d'excellentes aptitudes de scellement et d'étanchéité, et ce à 3, 6 ou 12 mois [112].

Le MTA voit ses propriétés physiques augmentées lorsqu'il est maintenu en milieu humide après sa mise en place [80], mais la contamination sanguine affaiblirait sa résistance à la compression [72]. Toutefois, le rapport poudre/liquide influencerait la solubilité du ciment : plus la quantité d'eau est importante, plus la solubilité et la porosité augmentent [36].

Il a été montré que l'hydratation du MTA produit de l'hydroxyde de calcium qui expliquerait la réponse tissulaire favorable [44]. Il libère des ions OH⁻ qui maintiennent un pH alcalin à 12,5 au bout de 3 heures et des ions Ca⁺⁺ qui, en présence des phosphates tissulaires, favorisent la production d'hydroxyapatite [29, 89].

Ainsi, le MTA possède une activité antibactérienne envers les souches aérobies anaérobies facultatives (AAF) comme *Streptococcus faecalis* et autres streptocoques et lactobacilles ainsi qu'*Escherichia coli* mais il n'a pas d'activité sur les souches anaérobies strictes (AS) [105].

En général, le MTA favorise la production cellulaire de cytokine et améliore l'attachement et la croissance cellulaire à son contact [45, 51]. La synthèse

d'ostéocalcine, de phosphatase alcaline et d'interleukines 6 et 8 est aussi augmentée en présence de MTA [101] ainsi que l'activité de la phosphatase alcaline au niveau des fibroblastes parodontaux [13].

Le MTA n'est pas mutagène ni génotoxique [107]. Les études histologiques en coiffage pulpaire direct, aussi bien chez l'animal que chez l'humain montrent que le MTA génère moins d'inflammation pulpaire et induit la formation d'un pont dentinaire plus épais et de manière plus reproductible que les autres matériaux utilisés (Simon et al. 2008).

Deux études récentes confirment la cémento-conduction et cémento-induction du MTA ainsi que l'ostéo-induction [28, 40]. L'apposition de néocément et une régénération du parodonte apical ont été aussi observées lors de l'utilisation du MTA en bouchon apical dans le cas de dents immatures à apex ouverts [42, 91].

La radio-opacité du MTA permet de contrôler son placement et son évolution.

❖ **BiodentineTM**

Un nouveau ciment minéral de fabrication française a été mis au point, sous l'appellation BiodentineTM, par le laboratoire Septodont. Sa récente mise sur le marché ne permet pas de présenter des études similaires aux précédents et les renseignements ci-dessous émanent du fabricant.

Les modifications portent sur le temps de prise nettement inférieur à celui du MTA, de 9 à 12 minutes, et de meilleures propriétés physiques avec une résistance à la compression de 200 MPa à 24 heures.

Initialement, ce matériau, qui prétend offrir une biocompatibilité similaire à celle du MTA, a été conçu pour les restaurations coronaires sur dents pulpées. La radio-opacité est ici obtenue avec de l'oxyde de zirconium, la poudre est voisine des précédents ciments : silicate tricalcique, silicate di calcique, carbonate et oxyde de calcium, oxyde ferrique. Cette poudre ne contient pas

d'aluminosilicate et l'eau nécessaire à la prise contient 15 % de chlorure de calcium, destiné à accélérer celle-ci, et des polymères résineux. Comme les autres ciments, il libère de l'hydroxyde de calcium et induit la formation d'hydroxyapatite à partir des phosphates de calcium dentinaires et tissulaires.

Ces propriétés originales et améliorées reposent sur l'absence d'aluminosilicate, qui constituerait une impureté, sur la variation de taille des particules, qui optimiseraient la densité, sur l'ajout de carbonate de calcium, qui représenterait une charge supplémentaire et participerait à la biocompatibilité.

La biocompatibilité du Biodentine™ a été étudiée sur des lymphocytes et des fibroblastes pulpaires humains ainsi que sur *Salmonella typhimurium*. Les résultats sont similaires à ceux du MTA [57].

D'après le fabricant, le matériau est non cytotoxique, non génotoxique, non mutagène et les tests cutanés et sous-cutanés sont exempts d'inflammation. Le Biodentine™ en coiffage pulinaire stimule l'angiogenèse et induit la formation de dentine réparatrice.

L'ensemble de ses propriétés cliniques (mise en place et prise en une séance), physiques et biologiques lui ouvrent les portes de l'endodontie pour les indications similaires à celles des précédents ciments mais les études *in vitro*, *in vivo* et cliniques axées sur ces indications font pour l'instant défaut par rapport au MTA qui est actuellement le ciment de référence.

II. EVALUATION DU TRAITEMENT ENDODONTIQUE

2.1. La qualité technique du traitement endodontique

L'analyse de la littérature [100], permet d'identifier plusieurs facteurs pouvant influencer la réussite ou l'échec d'un traitement endodontique. Cependant beaucoup d'études [8, 10, 14], soulignent l'importance de la qualité technique de l'obturation endodontique dans le pronostic à long terme des dents traitées. L'objectif de l'obturation canalaire est de prévenir toute contamination possible en scellant l'espace canalaire dans sa totalité : foramen, canalicule dentinaire et canaux accessoires de façon étanche. Un traitement endodontique comprend trois phases importantes : la mise en forme (shapping), l'assainissement (cleaning) et l'obturation canalaire. La qualité de l'obturation est directement liée à la qualité de la mise en forme canalaire.

2.2. Quand et comment évaluer la qualité technique de l'obturation ?

Dans la pratique odontologique quotidienne, le chirurgien-dentiste évalue le résultat qualitatif de son traitement endodontique sur un cliché radiographique rétroalvéolaire postopératoire, argentique ou en image numérisée. L'image radiographique finale ne reflète pas la qualité réelle du traitement endodontique parce qu'elle ne permet pas d'apprécier si les différentes phases cliniques ont été respectées (mise en forme, irrigation, isolation de la dent avec pose de la digue, rinçage). Par contre, le cliché postopératoire visualise plus facilement les résultats de traitements inadéquats.

Selon la **Haute Autorité de la Santé** [43], un traitement endodontique requiert la prise d'au moins 3 clichés radiographiques : préopératoire, per et postopératoire ; le cliché postopératoire permet de contrôler la qualité de l'obturation et constitue une image de référence dans le suivi du patient.

Les recommandations de l'**ANDEM** (1996) [1] préconisent : «Tout traitement canalaire doit faire l'objet d'une évaluation clinique et radiographique immédiate, à un an, puis au-delà, périodiquement selon les situations ».

2.3. Critères d'évaluation

2.3.1. Critères cliniques

Plusieurs études ont utilisé les critères cliniques pour évaluer le traitement endodontique [26, 47, 86].

L'évaluation clinique doit inclure les critères suivants :

- La présence ou absence de sensibilité à la percussion ou à la palpation apicale
- La mobilité
- La fistulisation
- Les signes d'infection ou de tuméfaction
- La fonction dentaire (capacité fonctionnelle)
- La présence de maladie parodontale
- D'autres symptômes subjectifs (signes subjectifs d'inconfort).

Par ailleurs, l'évolution de certains signes, en particulier péri apicaux ne peut pas être évaluée avec un examen clinique ponctuel, et implique un monitoring postopératoire.

2.3.2. Critères radiologiques

Dans le cadre de cette étude, les critères d'évaluation qualitative de l'obturation endodontique ont été uniquement des critères radiographiques.

D'après les recommandations de l'**ANDEM (1996)** [1], des rapports de consensus de l'**European Society of Endodontist** [30] et de la **HAS** [43], deux critères majeurs sont à analyser :

- La situation de l'obturation par rapport à l'apex radiologique : l'obturation doit se situer à 0,5-2 mm en deçà de l'apex radiographique.
- La densité de l'obturation : l'obturation canalaire doit apparaître sans radio-clartés (vacuités) et avec un degré de radio-opacité important.

2.3.2.1. La position de la limite apicale d'obturation

La longueur d'obturation a fait l'objet de plusieurs études dont notamment une méta-analyse réalisée par l'**American Association of Endodontist** [3]. Elle a étudié le taux de succès et d'échec en fonction de trois longueurs d'obturations endodontiques différentes à partir de l'apex radiographique: (a) 0-1mm, (b) 1-3mm, (c) dépassement de l'apex.

Les résultats ont montré un taux de succès du traitement endodontique le plus élevé quand l'obturation est située entre 0,5-2mm de l'apex radiologique, le taux d'échec est le plus haut quand l'obturation dépasse l'apex. Lors d'une sous-obturation le taux d'échec est moins important qu'un dépassement mais plus important qu'une obturation à 0,5-2mm au-delà de l'apex radiologique.

2.3.2.2. La densité de l'obturation

Des études ont été faites sur l'impact de la densité de l'obturation canalaire sur le taux de succès d'un traitement endodontique [52]. Il en ressort que les cinq signes radiologiques les plus discriminants sont :

- Faible opacité de l'obturation
- Présence de radioclarté dans le traitement endodontique
- Absence de matériau d'obturation sur une hauteur supérieure à 2mm de l'apex radiographique
- Présence d'une extrusion excessive de matériau d'obturation dans le périapex
- Présence d'une lésion apicale

De toutes ces données, il en résulte que la qualité de l'obturation (longueur et densité) est un facteur essentiel dans le pronostic des dents traitées.

2^{EME} PARTIE :

**ACTUALITE ET PERSPECTIVES DES
CIMENTS D'OBTURATION CANALAIRE:
REVUE DE LA LITTERATURE**

I. JUSTIFICATION

Le matériau d'obturation le plus connu et le plus employé dans le monde est la gutta percha. Seule, elle n'est toutefois pas en mesure d'obturer hermétiquement et durablement le canal radiculaire.

En conséquence, une obturation canalaire doit être constituée essentiellement d'un matériau central d'une bonne stabilité dimensionnelle, sous la forme d'un (ou de plusieurs) cône(s) d'obturation et d'un ciment qui polymérise, ce dernier ayant pour fonction d'établir un joint le plus étanche possible entre la gutta-percha et les parois canalaires. Il participe également à l'obturation du réseau canalaire (canaux latéraux, isthmes, canaux accessoires, delta apicaux...) et assure une action lubrifiante sur les cônes de gutta-percha.

Une étude [24] a montré que la dissolution de ciment canalaire augmentait les fuites le long des parois canalaires après obturation. Pour optimiser les résultats, il faut donc un film de ciment canalaire le plus fin possible au profit d'une plus grande quantité de gutta-percha. En effet la stabilité dimensionnelle du ciment canalaire est indispensable pour le succès à long terme du traitement endodontique [39].

Les ciments endodontiques couramment utilisés (l'oxyde de zinc, l'hydroxyde de calcium et la résine) ont une longue tradition dans la recherche scientifique et la pratique clinique en endodontie. [90] Ils présentent ainsi de nombreuses limites surtout relatives aux variations dimensionnelles entraînant souvent des hiatus ; porte d'entrée bactérienne provoquant des échecs du traitement endodontique. Pour des cas spécifiques tels que les résorptions radiculaires, les perforations, les procédés d'apèxification et les obturations rétrogrades, de nouveaux matériaux biocompatibles tels que les biocéramiques ont été développés afin d'améliorer les résultats cliniques [53].

Parmi ces matériaux, nous pouvons citer : ProRooT MTA (Dentsply Company, Allemagne); Biociment (Septodont, France); EndoSequence BC (Brassler, SUA); BioAggregat (GRV, Canada); Generex A (spécialités dentaires Dentsply Tulsa, États-Unis).

L'introduction des ciments canalaires biocéramiques instaure de nouveaux standards dans le domaine de l'endodontie avec des indications de plus en plus ambitieuses allant de la conservation de la vitalité pulpaire à sa régénération. [65,106]

Même si les avantages de ces matériaux ont contribué à leur propagation rapide dans le domaine dentaire, de nos jours, ils ne sont pas largement utilisés. Malgré leur disponibilité dans le commerce, les biocéramiques restent peu connus des chirurgiens-dentistes.

Ainsi la présente étude se propose comme objectif de faire une revue de la littérature sur l'actualité et les perspectives des ciments endodontiques.

II. METHODOLOGIE

Une revue de la littérature a été réalisée. Dans cette perspective, une stratégie de recherche ad hoc, destinée à retrouver tous les écrits pertinents sur la question des ciments endodontiques a été mise en œuvre. Les études incluses sur la base de critères édictés ont été passées en revue et les données qu'elles renferment sur les ciments endodontiques ont été synthétisées pour en faire une mise au point.

2.1. Stratégie de recherche pour la localisation des écrits

La stratégie de localisation des écrits comportait 2 étapes :

- une recherche électronique dans les banques de données d'articles scientifiques ;
- et une recherche manuelle dans la liste des références des articles identifiés ainsi que sur les sites internet des journaux d'odontologie.

2.1.1. Recherche électronique

Pour retrouver les articles pertinents sur l'actualité des ciments canalaires et leurs perspectives en endodontie, en vue d'une inclusion dans la présente revue de la littérature, une stratégie de recherche ad hoc couvrant la période allant de 12 mars 2014 au 10 mars 2019 a été mise au point et appliquée à la base de donnée MEDLINE. Les détails concernant la recherche des écrits dans la base de données sont fournis ci-dessous.

❖ **MEDLINE** <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>

Une stratégie spécifique a été développée pour une recherche dans Medline avec l'interface Pubmed en utilisant une combinaison de MeSH (Medical Subject Heading) et de mots-clés (**tableau I**). Pour rappel, Medline (*Medical Literature Analysis and Retrieval System Online*) est une base de données bibliographique regroupant la littérature relative aux sciences biologiques et biomédicales. La base est gérée et mise à jour par la National Library of Medicine (NLM) ou Bibliothèque Nationale de Médecine des États-Unis d'Amérique. Elle était consultable à distance dès 1972 (dès 1988 par Minitel). Elle est la 1^{ère} base de données bibliographique du Monde avec plus de 21 millions de références d'articles de journaux des sciences de la vie avec une préférence pour les sciences biomédicales.

L'interface PubMed permet de consulter gratuitement la base de données à partir d'un navigateur World Wide Web.

L'indexation des articles se fait par le biais d'un vocabulaire spécifique à MEDLINE, le MeSH® qui appartient exclusivement à la NLM.

Tableau I: MeSH et mots clés utilisés pour la recherche des articles dans Medline par l'interface Pubmed.

MeSH	Opérateurs Booléens	Mots-clefs
		analysis
		OR
“Root Canal Filling Materials”		Pharmacology
	AND	OR
		classification
		OR
		Therapeutic use

The screenshot shows the PubMed search results for the query: ("Root Canal Filling Materials/analysis"[MeSH] OR "Root Canal Filling Materials/classification"[MeSH]). The results page displays 210 items. The search filters are set to 'Best match' and 'Most recent'. The results are categorized by year, with a 'Results by year' chart showing the distribution of publications. The 'Titles with your search terms' section lists three articles: 'Effect of ProRoot MTA® and Biobondne® on osteoclastic differentiation and activity of mouse bone marrow macrophages.', 'Endodontic medicine: interrelationships among apical periodontitis, systemic disorders, and tissue responses of dental materials.', and 'Experimental furcal perforation treated with mineral trioxide aggregate plus selenium: immune response.' The 'Find related data' section allows users to search by database.

2.1.2. Recherche manuelle

Une recherche manuelle a été entreprise dans la liste des références des articles retrouvés et dans le « journal of endodontics » qui est la référence de la discipline.

2.2. Sélection des études

❖ Eligibilité des études

La recherche concernait tout type d'étude relative aux ciments canalaire et aucune restriction de langue n'a été effectuée.

❖ Stratégie de sélection des études

Les articles fournis par la recherche électronique et par la recherche manuelle ont été passés en revue dans un premier temps en parcourant leur titre et résumés. Les articles qui, visiblement n'étaient pas pertinents pour une inclusion, ont été écartés dès ce stade.

Les copies intégrales des articles dont la lecture des titres et résumés, était suffisamment informative et en phase avec l'objectif de la présente étude, ont été recherchées puis synthétisées pour la présente mise au point.

III. RESULTATS

La stratégie de recherche décrite dans la section matériel et méthode, appliquée aux différentes bases de données ciblées a permis de retrouver 234 articles qui se répartissent comme suit (Figure 1) :

- MEDLINE par l'interface Pubmed : 218 écrits tous des articles scientifiques
- La recherche manuelle nous a permis de recueillir 16 articles

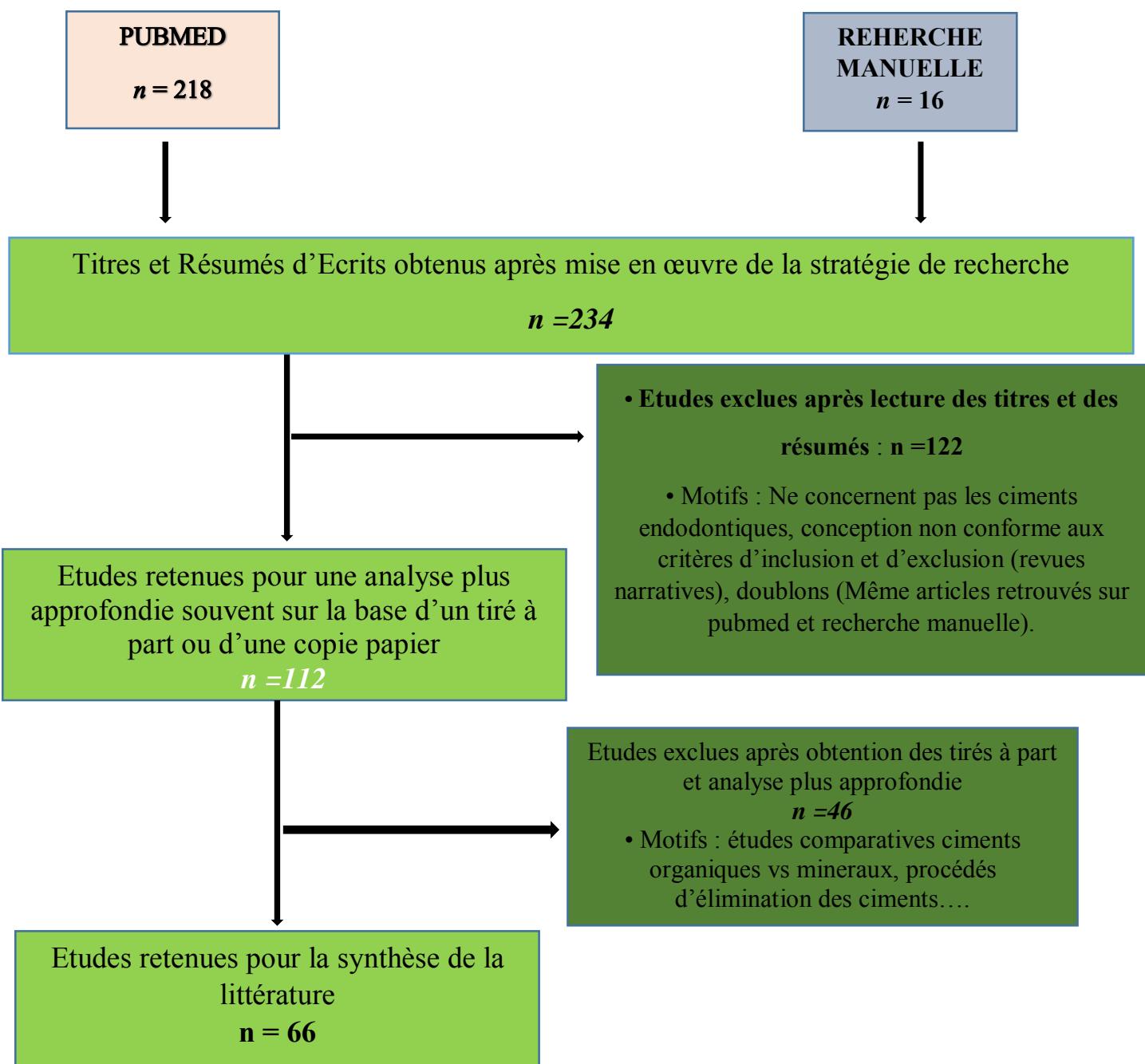


Figure 1: Diagramme de flux QUOROM pour la sélection des articles.

IV. SYNTHESE ET DISCUSSION

L'actualité des ciments d'obturation canalaire est essentiellement marquée ces dernières années par l'introduction des ciments endodontiques biocéramiques pour pallier aux inconvénients majeurs des ciments d'obturations canalaire classiques connus jusque-là relatifs à leur stabilité dimensionnelle dans le temps, leur toxicité sur les tissus vivants.

Les ciments biocéramiques (silicate de calcium), bioactifs, présentent de nombreuses propriétés physico-chimiques et biologiques permettant de répondre aux objectifs du traitement endodontique. [108]

Ils présentent une avancée majeure dans l'obturation des canaux radiculaires car son pH élevé pendant le durcissement, la biocompatibilité et la stabilité dimensionnelle sont des avantages essentiels par rapport aux ciments d'obturation traditionnels. [50,60,108].

4.1. Matériaux biocéramiques utilisés en endodontie

Les ciments endodontiques biocéramiques sont généralement utilisés pour des cas spécifiques, tels que les résorptions radiculaires, les perforations, l'apexification, et l'obturation rétrogrades. Ainsi de nouveaux matériaux biocompatibles ont été développés afin d'améliorer le résultat clinique: ProRoot MTA (société Dentsply, Allemagne); Biodentine (Septodont, France); EndoSequence BC Sealer (Brassler, SUA); BioAggregats (CIB, Canada); GenerexA (Dentsply Tulsa Dental Specialties, États-Unis).

4.1.1. MTA

Le premier matériau biocéramique utilisé avec succès en endodontie était le ciment MTA (Trioxyde Minéral Agrégat), développé à base de ciment de Portland, dans le Loma Linda University - Californie, au début des années 90. Il a été développé comme un matériau d'obturation rétrograde et aussi pour

obturer les perforations. Le ciment de Portland et le MTA montrent une composition comparable, ainsi que des propriétés physiques et chimiques similaires. Le ciment de Portland utilisé dans l'industrie de la construction, contient du silicate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicate dicalcique ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), l'aluminate tricalcique ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) et du sulfate de calcium ($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) [33]. En outre, le MTA contient de l'oxyde de bismuth, une substance insoluble ajoutée à celui-ci pour lui conférer une radio-opacité [37]. Ce matériau, initialement conçu pour une utilisation en chirurgie endodontique est connu sous le nom de MTA (Mineral Trioxide Aggregate).

Il est composé de 50 à 75 % d'oxyde de calcium et 15 à 25 % de dioxyde de silicium. De l'oxyde de bismuth est rajouté pour la radio-opacité. Trois parts de poudre de ce ciment doivent être mélangées à une part d'eau stérile pour obtenir un gel colloïdal qui effectue sa prise en 2 h 45 min.

Une étude dont le but était d'évaluer l'opacité radiologique du ciment de Portland (Votoran®, São Paulo, SP, Brésil) comparé à deux ciments MTA, ProRoot™ MTA (Dentsply / Tulsa Dentaire, Tulsa, OK, USA) et MTA - Angelus® (Indústria de Produtos Ltda odontologique Angelus Londrina, PR, Brésil) a montré que ProRoot MTA™ présentait un pourcentage plus élevé d'oxyde de bismuth (en moyenne 9,2%) que MTA - Angelus® [37].

Le ciment de Portland montre une bonne adhérence à la dentine et une bonne activité antimicrobienne [83]. Considérant leur composition semblable, l'utilisation de ciment de Portland peut être alternativement moins coûteuse que le MTA.

La réaction de fixation du MTA est, par hydratation, obtenue par du silicate de calcium hydraté et de l'hydroxyde de calcium qui est libéré au fil du temps. L'intégration biologique du MTA est due aux ions Calcium, qui forment l'hydroxyapatite en contact avec les ions phosphate présents dans le corps. Le rôle antibactérien du ciment MTA semble être dû à la libération d'hydroxyde de

calcium, ce qui explique l'action similaire avec les pâtes d'hydroxyde de calcium. En outre, il montre un fort pH alcalin avec l'effet antibactérien [33].

Un autre ciment minéral de composition très semblable a été plus récemment commercialisé : le MTA Angelus® (MTAA) avec un temps de prise plus court, situé entre 14 et 15 minutes [107].

Malgré des similitudes de composition, le ciment de Portland contient des métaux lourds et la taille variable et grossière de ses particules ne permet pas de le substituer au MTA où elles sont d'une finesse et d'une régularité constante. La solubilité du MTA est décrite comme nulle ou faible [92] mais elle augmente avec le temps. Il montre d'excellentes aptitudes de scellement et d'étanchéité et ce, à 3, 6 ou 12 mois [112].

Le MTA voit ses propriétés physiques augmentées lorsqu'il est maintenu en milieu humide après sa mise en place [80], mais la contamination sanguine affaiblirait sa résistance à la compression [72]. Toutefois, le rapport poudre/liquide influencerait la solubilité du ciment : plus la quantité d'eau n'est importante, plus la solubilité et la porosité augmentent [80].

Il a été montré que l'hydratation du MTA produit de l'hydroxyde de calcium qui expliquerait la réponse tissulaire favorable [80]. Il libère des ions OH⁻ qui maintiennent un pH alcalin à 12,5 au bout de 3 heures et des ions Ca⁺⁺ qui, en présence des phosphates tissulaires, favorisent la production d'hydroxyapatite [88].

Ainsi, le MTA possède une activité antibactérienne envers les souches aérobies anaérobies facultatives (AAF) comme *Streptococcus faecalis* et autres *streptocoques* et *lactobacilles* ainsi qu'*Escherichia coli* mais il n'a pas d'activité sur les souches anaérobies strictes (AS) [23].

En général, le MTA favorise la production cellulaire de cytokine et améliore l'attachement et la croissance cellulaire à son contact. La synthèse d'ostéocalcine, de phosphatase alcaline et d'interleukines 6 et 8 est aussi

augmentée en présence de MTA ainsi que l'activité de la phosphatase alcaline au niveau des fibroblastes parodontaux [101].

Le MTA n'est pas mutagène ni génotoxique [107]. Les études histologiques en coiffage pulpaire direct, aussi bien chez l'animal que chez l'humain montrent que le MTA génère moins d'inflammation pulpaire et induit la formation d'un pont dentinaire plus épais et de manière plus reproductible que les autres matériaux utilisés.

4.1.2. BiodentineTM

Ce matériau a été spécifiquement conçu pour le «remplacement de la dentine» par Septodont (France) 2009. La BiodentineTM contient du silicate tricalcique (Ca_3SiO_5), du carbonate de calcium, de l'oxyde de zirconium et du chlorure de calcium.

Les principales indications incluent le traitement des résorptions et perforations radiculaires, les procédures de coiffage pulpaire, les apexifications, les obturations rétrogrades et le remplacement de la dentine. [12,27,73].

Sa récente mise sur le marché ne permet pas de présenter des études similaires aux précédents et les renseignements ci-dessous émanent du fabricant.

Les modifications portent sur le temps de prise nettement inférieur à celui du MTA, de 9 à 12 minutes, et de meilleures propriétés physiques avec une résistance à la compression de 200 MPa à 24 heures.

Initialement, ce matériau, qui prétend offrir une biocompatibilité similaire à celle du MTA, a été conçu pour les restaurations coronaires sur dents pulpées. La radio-opacité est ici obtenue avec de l'oxyde de zirconium, la poudre est voisine des précédents ciments : silicate tricalcique, silicate dicalcique, carbonate et oxyde de calcium, oxyde ferrique. Cette poudre ne contient pas d'aluminosilicate et l'eau nécessaire à la prise contient 15 % de chlorure de calcium, destiné à accélérer celle-ci et des polymères résineux. Comme les

autres ciments, il libère de l'hydroxyde de calcium et induit la formation d'hydroxyapatite à partir des phosphates de calcium dentinaires et tissulaires.

Ces propriétés originales et améliorées reposent sur :

- l'absence d'aluminosilicate, qui constituerait une impureté ;
- la variation de taille des particules, qui optimiseraient la densité ;
- et l'ajout de carbonate de calcium, qui représenterait une charge supplémentaire et participerait à la biocompatibilité.

La biocompatibilité de la Biodentine™ a été étudiée sur des lymphocytes et des fibroblastes pulpaires humains ainsi que sur *Salmonella typhimurium*. Les résultats sont similaires à ceux du MTA [34].

D'après le fabricant, le matériau est non cytotoxique, non génotoxique, non mutagène et les tests cutanés et sous-cutanés sont exempts d'inflammation. La Biodentine™ en coiffage pulinaire stimule l'angiogenèse et induit la formation de dentine réparatrice.

L'ensemble de ses propriétés cliniques (mise en place et prise en une séance), physiques et biologiques lui ouvrent les portes de l'endodontie pour les indications similaires à celles des précédents ciments mais les études *in vitro*, *in vivo* et cliniques axées sur ces indications font pour l'instant défaut par rapport au MTA qui est actuellement le ciment de référence [54,99].

4.1.3. EndoSequence BC™ sealer et pâte d'obturation rétrograde

Le ciment EndoSequence BC (Brasseler USA) est un autre matériau de silicate de calcium hautement radio-opaque, hydrophile formant l'hydroxyapatite. La réaction de prise est également une réaction d'hydratation. Il contient du phosphate monocalcique qui est responsable de la formation d'hydroxyapatite *in situ*. L'EndoSequence contient l'oxyde de zirconium et l'oxyde de tantale comme charges radio-opaques.

Selon Zhang H et al [113], le ciment de scellement biocéramique est alcalin (pH supérieur à 12), ce qui lui confère un fort pouvoir antibactérien. Une étude récente a montré que le scellant pouvait tuer l'*Enterococcus faecalis* par simple contact en deux minutes, ce qui montre l'intérêt de son utilisation dans les traitements endodontique en une séance.

La qualité supérieure du ciment a été étudiée également par **Nagas E [69]** : en effet, l'hydroxyapatite hydrophile de la biocéramique possède une excellente fluidité qui lui permet de se lier instantanément à la fois à la dentine et aux matériaux obturateurs biocéramiques (BC PointsTM).

Une étude récente a démontré que la biocéramique a une force de liaison supérieure à celle des autres ciments d'obturation canalaire (Sealers) populaires. Cette étude a comparé l'influence du taux d'humidité sur la force de liaison. La biocéramique a surpassé tous les autres Sealers à tous les niveaux d'humidité.

D'après **Ghoneim AG, et al [39]** les particules de céramique du BC Sealer se lient aux particules de biocéramique pour former un vrai scellement exempt de vide. Une étude récente a montré que la biocéramique, lorsqu'elle est utilisée avec ses cônes imprégnés et recouverts, augmente la résistance à la fracture radiculaire pour atteindre un niveau comparable à celui d'une dent vivante.

L'excellente fluidité du produit a été également étudiée par **Zhang H et al [113]**. Grâce à ses particules extrêmement petites et à sa nature hydrophile, le BC Sealer se répand naturellement dans tous les espaces de l'anatomie canalaire. Une étude récente a prouvé que le BC Sealer a un angle de contact inférieur à celui des autres ciments testés. Cette caractéristique unique du BC Sealer améliore sa capacité à se lier à la dentine et aux matériaux obturateurs et augmente également sa capacité à tuer efficacement les microorganismes dans tous les recoins du système canalaire.

Les matériaux biocéramiques ont été introduits dans la dentisterie principalement pour leur haute biocompatibilité et leur forte activité antibactérienne [113,115].

La haute fluidité du matériau d'obturation canalaire est une propriété physique importante en endodontie car elle permet de remplir les espaces difficiles d'accès tels que les isthmes et les canaux accessoires.

Cependant, cette fluidité pourrait augmenter la chance d'extrusion du matériau à travers la région péri apicale surtout dans les traumatismes anciens, très représentatifs dans cette étude. Ces traumatismes caractérisés par l'arrêt de l'édition radiculaire et non la fermeture apicale facilitant ainsi le passage du matériau au-delà de l'apex.

Bien qu'il ait été démontré que le BC Sealer présente une toxicité minime des précautions doivent être prises pour éviter la propulsion du matériau au-delà de l'apex [61,115].

4.1.4. BioAggregate™

Le BioAggregate (Innovative BioCeramix Inc, Canada) est également un ciment de silicate de calcium contenant du silicate de calcium hydraté, de l'hydroxyde de calcium, de l'hydroxyapatite, de la silice et de l'oxyde de tantale. Le produit a des qualités similaires à celles du ciment MTA, en termes d'étanchéité marginale, d'adhérence supérieure et de migration des cellules de la pulpe [114].

4.1.5. Generex A™

Le Generex A (spécialités dentaires Dentsply Tulsa, OK, USA) est un matériau à base de silicate de calcium qui a quelques similitudes avec le MTA, mais est mélangé uniquement avec un gel au lieu de l'eau. Il contient du silicate de calcium, du gel spécial et de l'hydroxyapatite. Il est conçu pour les obturations rétrogrades et la réparation des perforations. Il est considéré comme ayant une résistance à la compression et une bonne radio-opacité [49].

4.2. Caractéristiques des biocéramiques utilisées en endodontie

4.2.1. Force de liaison

Des ciments endodontiques bioactifs ont été développés pour améliorer la qualité de l'obturation des canaux. L'EndoSequence BC (Ciment Biocéramique) fait partie des matériaux à base de silicate de calcium récemment développés pour l'obturation permanente des canaux.

Pour évaluer la pénétration dans les tubuli dentinaires, différents ciments endodontiques biocéramiques ont été étudiés.

L'étude de **E. McMichael et al.** [32] sur quatre-vingt (80) dents monoradiculées (prémolaires mandibulaires) obturées aléatoirement soit au monocône ajusté soit par compactage vertical à chaud, a montré que les ciments à base de silicate tricalcique ont pénétré dans les tubuli aussi profonds que 200 μ m. Le pourcentage de pénétration du ciment était beaucoup plus élevé à 5 mm de l'apex, avec de nombreux spécimens ayant une pénétration de 100% à la fois pour les techniques au monocône ajustée et au compactage vertical à chaud.

Le MTA Fillapex, un ciment à base de résine contenant moins de 20% de particules de MTA, présentait une pénétration tubulaire nettement supérieure avec une technique de compactage vertical à chaud par rapport à la technique de monocône ajusté au niveau de 1 mm.

Par ailleurs, l'étude de **Giovana Cunha GRITTI et al.** [38] sur 80 prémolaires mandibulaires humaines a montré que l'interaction entre la gutta-percha (Gp) et les solutions de remouillage n'était pas significative ($p = 0,53$). La solution de fluide corporel stimulé (SBF) fournit une augmentation de la force de liaison pour les deux solutions de gutta percha. L'association phosphate de niobium(GNb) et EndoSequence BC Sealer(BC) (3,42 MPa) augmente la force de liaison comparée à GP + BC (2,0 MPa). L'utilisation de SBF comme agent de remouillage de la dentine est une solution qui augmente la force de liaison dans

les groupes étudiés. L'association de GNb avec le ciment biocéramique a été bénéfique, ce qui augmente la force d'adhérence à la dentine par rapport à l'association avec GP.

En outre, pour évaluer l'effet de la sécheresse du canal sur la poussée de la force d'adhésion de deux ciments de résine (AHPlus et Adseal) et un ciment biocéramique (EndoSequence BC sealer) après irrigation du canal avec de l'hypochlorite de sodium (NaOCl) et du chlorhexidine (CHX), l'étude de **Hasan Razmi et al.** [41] sur 18 prémolaires humaines extraites réparties en deux groupes selon leur solution d'irrigation (NaOCl ou CHX) a révélé que la force de liaison de Adseal n'a pas été affecté par l'état du canal ou l'irrigation avec NaOCl ou CHX. Bien que la force de liaison d'AHPlus ne fût pas affectée par le type d'irrigant, il a la plus haute force de liaison observée dans les canaux secs. Pour le sealer EndoSequence BC, les conditions du canal n'ont pas affecté la force de liaison; toutefois le CHX la réduit.

Quant à l'effet du calcium intra-canalaire, des résidus d'hydroxyde (CH) après l'irrigation par ultrasons et le retrait de la lime sur la force d'adhérence par poussée du sealer biocéramique AH-26 et EndoSequence (BC Sealer) a été étudié par **Sholeh et al.** [93]. Le résultat de leur étude a montré que la force de liaison des deux ciments était plus faible chez les spécimens recevant du CH. Ces valeurs sont significativement plus élevées quand CH a été éliminé au moyen des ultrasons ($P < 0,05$). Le mode de défaillance dominant dans tous les sous-groupes était de type mixte sauf pour les spécimens BC Sealer subissant une élimination de CH avec un fichier manuel qui présentait principalement un mode de défaillance adhésif.

4.2.2. Microfuite

Les ciments endodontiques assurent une étanchéité parfaite avec la dentine afin d'éviter la micro-infiltration. Certaines conditions, y compris les canaux parfaitement secs, sont nécessaires pour obtenir une bonne adhérence. Dans certains cas, les canaux secs peuvent être difficiles à obtenir cliniquement. Des études comparant le MTA à d'autres sealers largement utilisés en endodontie ont donné de bons résultats pour le MTA, même si les canaux n'étaient pas parfaitement séchés. Comparant certains ciments classiques utilisés en endodontie, comme AH26, Excite DSC, MTA Fillapex et la pâte ZOE (Oxyde de Zinc-Eugénol) dans les canaux secs et humides, **Ehsan et al [31]** ont démontré que AH26 était meilleur dans les canaux secs et ZOE avait le plus faible joint en condition d'humidité. Le MTA a montré une bonne étanchéité même dans les canaux humides. Pour les cas de traitement endodontique complexe, réalisés en plusieurs séances, l'utilisation de médications intracanalaires tels que l'hydroxyde de calcium ou des antibiotiques peut être nécessaire. Ce médicament devrait être retiré du canal afin d'obtenir une bonne obturation endodontique. Le MTA adhérant à la dentine peut être influencé si la médication intracanalaire n'est pas complètement éliminée en raison de la morphologie dentaire, de la complexité de l'anatomie endodontique, des difficultés techniques ou du manque d'équipement. Lors de l'analyse de la force du déplacement du MTA dans les canaux avec de l'hydroxyde de calcium et des antibiotiques, **Topçuoğlu et al** ont trouvé une diminution globale de la résistance pour les deux situations [102].

Les travaux de **Srinidhi V. Ballullaya et al [98]** évaluant l'herméticité des différents ciments (ciment à base d'oxyde de zinc-eugénol, Sealapex, AH Plus, MTA Plus, EndoRez, EndoSequence BC) ont montré sous stéréomicroscope pour micro-fuite que la fuite la moins élevée a été observé dans le groupe EndoSequence BC.

4.2.3. Microbiologie

Le succès à long terme d'un traitement endodontique dépend de l'élimination complète des bactéries endodontiques et d'un remplissage parfait du système canalaire. En comparant l'activité antimicrobienne de deux ciments endodontiques (MTA Fillapex et AH 26), **Madani et al.** concluent que le MTA a une efficacité supérieure sur *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, *Streptococcus mutans* et *Candida albicans* [63]. De plus, des études similaires montrent que SealApex (Kerr Company, Germany) présente des propriétés antibactériennes alors que des ciments endodontiques conventionnels sont sans activité antibactérienne (par exemple Endorez). Le MTA et le ciment de Portland n'ont montré aucune activité antibactérienne sur *Escherichia coli* [97]. Même si l'activité antimicrobienne est une exigence importante d'un ciment endodontique, la plupart n'ont pas la capacité de fournir une protection complète. Le MTA Dentsply, le MTA Angelus et le ciment de Portland inhibent la croissance de *P. aeruginosa* alors que l'hydroxyde de calcium était efficace contre elle et *B. fragillis*. En dessous des conditions anaérobies, l'efficacité de ces matériaux n'a pas été prouvée pour *E. faecalis* et *E. coli*.

4.2.4. Cytotoxicité sur les fibroblastes du ligament parodontal

Le Minéral Trioxyde Agrégaté (MTA), l'EndoSequence et la Biodentine, tous matériaux de réparation radiculaire, ont montré des résultats différents lorsque les cultures de cellules fibroblastiques ont été évaluées à 24 et 48 heures. Même si dans les premières 24 heures tous les matériaux ont montré une viabilité cellulaire accrue, à 48 heures, l'on note une légère diminution de celle-ci. Le MTA a montré statistiquement une augmentation significative de la viabilité cellulaire par rapport à l'EndoSequence et la Biodentine [87]. Nous pouvons conclure que le MTA montre une meilleure biocompatibilité et peut être indiqué pour sceller la communication entre espace endoparodontal. Pour analyser l'effet sur les cellules endothéliales humaines ECV 304 ligne de deux marques de

MTA (Angelus® - MTA, Pro-Root™ -MTA) et ciment de Portland, dans une étude comparative, **De Deus et al.** ont montré qu'après une forte activité cytotoxique initiale, ces matériaux augmentent en viabilité cellulaire [25].

Par ailleurs, l'étude de la cytotoxicité de deux ciments bioactifs différents, l'un basé sur le MTA et l'autre à base de biocéramique BC Sealer, en culture de fibroblastes L929 de souris de **Anja Baraba et al.** [7] a montré que dans le groupe de contrôle, il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans le nombre de cellules viables pendant quatre périodes d'incubation ($p \geq 0,05$). En comparaison avec le groupe contrôle, le MTA a montré des cellules moins viables pour toutes les périodes d'incubation ($p \leq 0,05$), tandis que BC Sealer présentait des cellules moins viables de 6 heures à 24 heures d'incubation ($p \leq 0,05$).

Le ciment MTA a montré des cellules moins viables que le BC Sealer après la 1^{ère} heure et 20 heures de période d'incubation ($p \leq 0,05$), alors que pour d'autres périodes d'incubation, il n'y avait pas de différence statistiquement significative ($p \geq 0,05$).

En outre, **Emmanuel João Nogueira Leal Silva et al.** [96] évaluant les effets cytotoxiques de cinq ciments endodontiques (AH Plus, Endomethasone N, EndoSequence BC, MTA Fillapex et Pulp Canal Sealer EWT) ont étudié un modèle de culture cellulaire tridimensionnel (3D) en utilisant un bidimensionnel classique (2D) comme technique de référence pour la comparaison. Le résultat de leur étude a révélé que les ciments ont montré une cytotoxicité plus élevée en 2D que dans le modèle de culture cellulaire 3D ($p < 0,05$). A la fois dans ces conditions, EndoSequence BC a montré la plus faible cytotoxicité ($p < 0,05$). MTA Fillapex était beaucoup plus cytotoxique que les autres ciments endodontiques testés ($p < 0,05$), à l'exception de AH Plus dans le modèle de culture cellulaire (2D) ($p > 0,05$). Endomethasone N et Pulp Canal Sealer EWT ont montré des effets cytotoxiques plus faibles que AH Plus dans le

modèle de culture cellulaire (2D) ($p <0,05$); Cependant, aucune différence statistique n'a été observée dans le modèle de culture cellulaire (3D).

Ces caractéristiques des biocéramiques montrent une bonne stabilité dimensionnelle, une activité antibactérienne, une biocompatibilité améliorée et un fort pouvoir organogénétique, qui leurs confèrent un large champ de gradient d'indications thérapeutiques, constituant la base de l'endodontie régénérative.

4.3. Applications cliniques

4.3.1. Recouvrement direct de la pulpe

L'élimination complète de la dentine infectée dans les profondeurs, les cavités sans pathologie endodontique peuvent parfois conduire à des ouvertures de la chambre pulpaire avec une exposition directe de la pulpe saine. Dans certaines conditions, la fermeture de la communication peut être réalisée en utilisant de l'hydroxyde de calcium indiqué pour le coiffage direct de la pulpe. Le succès de ce traitement est évalué par la persistance de la vitalité de la pulpe. Dix années de suivi des études indiquent un taux de réussite de 30% à 85% [4,11]. Le MTA est un matériau bioactif pouvant être utilisé pour le coiffage direct de la pulpe [18]. Il est non-résorbable, peut être placé dans des conditions humides et stimule la formation de tissus durs dentinaires [67].

Le taux de succès rapporté après le coiffage direct de la pulpe est plus élevé en utilisant le MTA comparé à l'hydroxyde de calcium. Dans une étude comparative, **Mente et al.** ont signalé un taux de réussite de 80,5% après coiffage direct avec le MTA et 59% lors de l'utilisation d'hydroxyde de calcium à 24-123 mois (moyenne de 42 mois) [66].

4.3.2. Cicatrisation apicale

Une récente revue systématique a confirmé que les ciments pré-mélangés à base de silicate de calcium respectaient la plupart des exigences de la norme ISO 6876: 2012 [95]; Cependant, le manque d'études évaluant leur efficacité clinique

et leurs résultats à long terme constituaient des lacunes majeures qui les empêchaient d'être recommandés comme matériau de choix pour le comblement du canal radiculaire.

Les travaux de Niang SO ont montré dans la prise en charge en une seule séance de dent atteint de parodontites apicales chroniques (PAC) et obturée avec un ciment biocéramique, entraîne une mise en place précoce à 3 mois en post opératoire de la dynamique de cicatrisation et un taux de succès respectivement à 6 et 12 mois post opératoire [74].

Une récente étude rétrospective dont le but était d'évaluer le résultat du traitement de canal radiculaire non chirurgical utilisant une technique de monocône ajusté avec les ciments biocéramiques (BC; Brasseler USA, Savannah, GA) et d'identifier les facteurs associés au succès ou à l'échec, a montré que sur une population d'étude de 307 dents incluses dans l'analyse, suivies sur une période moyenne de 30,1 mois que le taux de succès global était de 90,9%. La lésion inférieure à 5 mm de diamètre avait un taux de succès significativement plus élevé que les lésions supérieures à 5 mm de diamètre. Une extrusion du ciment biocéramique a été observée dans 47,4% des cas et n'a eu aucun effet significatif sur le résultat du traitement [20].

Ainsi les preuves relatives à l'utilisation des biocéramiques en tant que matériaux d'obturation des racines sont limitées. Peu d'études ont évalué les biocéramiques et ceux qui en ont rapporté un faible niveau de preuve. Par conséquent, des études plus approfondies devraient être menées pour évaluer les BEC en tant que matériaux d'obturation des racines et produits de scellement des canaux radiculaires.

4.3.3. Régénération (revitalisation) des espaces canalaire

Les ciments endodontiques bioactifs utilisés dans l'endodontie régénérative fournissent une barrière coronaire sur l'échafaudage et le séparent de la restauration coronaire.

Plusieurs études chez l'animal ont utilisé le MTA comme bouchon coronaire lors de procédures de revitalisation chez le chien et le mouton. Dans ces études, leurs avantages relatifs en termes d'augmentation du taux de réussite en termes d'augmentation de la longueur des racines et de la guérison des tissus périapicaux ont été rapportés [68,5]. Il existe un désaccord sur le fait de laisser le canal rempli de sang uniquement sous le bouchon coronaire ou de placer un échafaudage afin de faciliter la migration des cellules souches [55]. Les ciments endodontiques bioactifs ont le potentiel d'interagir avec les cellules souches en raison de leur capacité ostéoconductrice [55]. Des études de laboratoire ont démontré la bioactivité des ciments biocéramiques et la conductivité des tissus durs [81], qui est une condition préalable à la barrière coronaire. Cependant, étonnamment, peu d'études fondées sur des preuves ont été menées sur l'efficacité des barrières coronaires.

Concernant les études cliniques, les ciments bioactifs tels que le MTA Angelus, le ciment biocéramique EndoSequence, la biodentine et le ciment CEM ont été utilisés avec succès comme bouchons coronaires dans les procédures de revitalisation endodontique des dents avec pulpe nécrosée et apex ouverts ou fermés.

Le MTA est le matériau le plus populaire pour les bouchons coronaires dans les procédures de revitalisation en raison de sa biocompatibilité, de son pouvoir d'étanchéité et de son adaptation marginale; en fait, plus de 85% des études ont utilisé le MTA à cette fin [55]. Les autres matériaux utilisés comme barrières coronaires comprennent le ciment CEM, le verre – ionomère et l'hydroxyde de calcium [55].

Des études rétrospectives font état de taux de survie dentaires élevés pour les procédures de revitalisation [48], avec une augmentation significative de la longueur de la racine lorsque de l'hydroxyde de calcium ou une pâte à trois antibiotiques étaient utilisés comme médicament à l'intérieur du canal radiculaire. L'épaisseur de la paroi du canal radiculaire et la longueur de la racine étaient significativement améliorées dans les cas revitalisés par rapport aux dents apexifiées avec de l'hydroxyde de calcium ou du MTA [48].

Le taux de survie des dents à la suite d'une procédure de revitalisation ou d'un bouchon apical MTA était significativement supérieur à celui obtenu par apexification à l'hydroxyde de calcium. Cependant, lorsque le taux de succès a été évalué sur la base de résultats cliniques objectifs et subjectifs ainsi que d'une évaluation radiographique, il n'y avait pas de différence significative entre le protocole de revitalisation, les bouchons apicaux MTA et l'apexification de l'hydroxyde de calcium [48].

Un nombre limité d'essais cliniques de cohortes et randomisés ont comparé la mise en place de bouchons apicaux aux procédures de revitalisation [6,70,94] et ont enregistré des taux de réussite plus élevés pour les bouchons apicaux. Cependant, les résultats ne sont pas significativement différentes [6,70,94,106]. Les avantages de la revitalisation par rapport à la pose de bouchons apicaux MTA ont été décrits par Narang *et al.* [71] ont identifié une fermeture apicale améliorée, un allongement accru des racines et un épaississement de la paroi dentinaire à la suite d'une revitalisation utilisant des caillots sanguins, de la fibrine riche en plaquettes et du plasma riche en plaquettes. Il convient de noter l'incidence considérablement accrue d'effets indésirables tels que douleur peropératoire ou postopératoire, flambées soudaines, coloration ou nécessité de blanchiment interne, de réinfection et de fracture dans les protocoles de revitalisation par rapport aux dents ayant reçu des bouchons apicaux MTA [6].

Il n'y a pas d'études sur les résultats à long terme des procédures de revitalisation chez l'homme [106]. Cependant, il est admis que les procédures de revitalisation peuvent résoudre les problèmes de parodontite apicale, la plupart des investigations utilisant le MTA comme barrière coronaire. Ainsi, il reste le matériau de choix pour les barrières coronaires pendant les protocoles de revitalisation endodontique, car il repose sur une base de preuves plus étendue que celle d'autres ciments biocéramiques [55,111].

CONCLUSION

L'actualité des ciments d'obturation canalaire est essentiellement marquée ces dernières années par l'introduction des ciments endodontiques biocéramiques pour pallier aux inconvénients majeurs des ciments d'obturations canalaire classiques connus jusque-là relatifs à leur variations dimensionnelles dans le temps, leur toxicité sur les tissus vivants.

Les ciments endodontiques bioactifs (biocéramiques) sont des composés céramiques biocompatibles obtenus à la fois *in situ* et *in vivo*, par divers procédés chimiques. Ils présentent d'excellentes propriétés de biocompatibilité en raison de leur similitude avec l'hydroxyapatite biologique. Ils produisent, au cours du processus d'hydratation, différents composés, par exemple des hydroxyapatites, capables d'induire une réponse régénérative dans le corps humain. Les biocéramiques ont la qualité d'être biocompatibles et d'offrir des propriétés antibactériennes. Ces diverses propriétés élargissent leur champs d'indication en endodontie et leurs offrent des perspectives sur l'endodontie régénérative basée sur l'ingénierie tissulaire où certains produits comme le MTA commencent déjà à faire leurs preuves.

Les procédures de revitalisation endodontique sont techniquement difficiles et sont souvent associées à une dyscoloration des dents, à la nécessité d'être réalisées en plusieurs visites de traitement par rapport au placement du bouchon apical (apexification), et à davantage de douleur et d'inconfort après le traitement. Malgré le taux de réussite élevé lorsque le MTA est utilisé comme bouchon apical dans des dents à apex ouverts et à pulpes nécrosées, les procédures de régénération doivent être considérées comme une alternative car elles offrent plusieurs avantages biologiques en termes d'augmentation de la longueur de la racine et de l'épaisseur de la paroi de la racine. Les agrégats de trioxydes minéraux créent un contact intime avec la dentine de la chambre pulpaire et stimulent la production et / ou la libération de molécules de signalisation nécessaires à la formation de nouveaux tissus dans la pulpe.

Le potentiel de dyscoloration du MTA est un inconvénient potentiel; par conséquent, des investigations sont nécessaires pour identifier la (les) cause (s) de la dyscoloration de la dent, son traitement et l'utilisation d'autres ciments bioactifs comme alternative au MTA.

BIBLIOGRAPHIE

1. Agence nationale pour le développement de l'évaluation médicale.

Recommandations et référence dentaire. 1996 Apr.

2. Allan NA, Walton RC, Schaeffer MA.

Setting times for endodontic sealers under clinical usage and in vitro conditions.

J Endod. 2001 Jun; 27(6): 421-3.

3. American Association Of Endodontist.

Coronal leakage, clinical and biological implications in endodontics success. 2002:1-6.

4. Al-Hiyasat AS, Barrieshi-Nusair KM, Al-Omari MA.

The radiographic outcomes of direct pulp-capping procedures performed by dental students: a retrospective study.

J Am Dent Assoc 2006;137(12):1699-1705.

5. Altaii, M, Cathro, P, Broberg, M, Richards, L.

Endodontic regeneration and tooth revitalisation in immature infected sheep teeth.

International Endodontic Journal 2017; 50:480– 91.

6. Alabd, AS, Cortes, LM, Lo, J et al.

Radiographic and clinical outcomes of the treatment of immature permanent teeth by revascularization or apexification: a pilot retrospective cohort study.

J Endod 2014;40:1063– 70.

7. Anja Baraba, Sonja Pezelj-Ribarić, Marija Roguljić, Ivana

Cytotoxicity of Root Canal Sealers

Acta stomatol Croat 2016;50(1):8-13.

8. Balto H, Al Khalifah Sh, Al Mugairin S, Al Deeb M, Al Madi E.

Technical quality of root fillings performed by undergraduate students in Saudi Arabia.

Int Endod J 2010; 43:292-300.

9. Bane K, Charpentier E, Bronnec F et "al"

Randomized clinical trial of intraosseous methylprednisolone injection for acute pulpitis pain.

J Endod 2016; 42:2- 7.

10. Barrieshi-Nusair Km, Al-Omari Ma, Al-Hiyasat As.

Radiographic technical quality of root canal treatment performed by dental students at the Dental Teaching Center in Jordan.

J Dent 2004; 32:301-307.

11. Barthel CR, Rosenkranz B, Leuenberg A, Roulet JF.

Pulp capping of carious exposures: treatment outcome after 5 and 10 years: a retrospective study.

J Endod 2000;26(9):525-528.

12. Boddeda KR, Rani CR, V Vanga NR, Chandrabhatla SK.

Comparative evaluation of biobond, 2% chlorhexidine with RMGIC and calcium hydroxide as indirect pulp capping materials in primary molars: An in vivo study.

J Indian Soc Pedod Prev Dent 2019;37(1):60-66.

13. Bonson S, Jeansonne BG, Lallier TE.

Root-end filling materials alter fibroblast differentiation.

J Dent Res 2004; 83: 408-413.

14. Boucher Y, Matossian L, Rilliard F, Machtou P.

Radiographic evaluation of the prevalence and technical quality of root canal treatment in a French Subpopulation.

Int Endod J 2002; 35:229-238.

15. Bouillaguet S, Wataha JC, Tay FR, Brackett MG, Lockwood PE.

Initial in vitro biological response to contemporary endodontic sealers.

J Endod 2006; 32: 989-992.

16. Bouillaguet S, Wataha JC, Lockwood PE, Galgano C, Golay A, Krejci I.

Cytotoxicity and sealing properties of four classes of endodontic sealers evaluated by succinic dehydrogenase activity and confocal laser scanning microscopy.

Eur J Oral Sci. 2004 Apr; 112(2):182-7.

17. Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Ford TR.

The constitution of mineral trioxide aggregate.

Dent Mater 2005; 21: 297-303.

18. Camilleri J, Pitt Ford TR.

Mineral trioxide aggregate: a review of the constituents and biological properties of the material.

Int Endod J 2006;39(10):747-754.

19. Chutich MJ, Kaminski EJ, Miller DA, Lautenschlager EP.

Risk assessment of the toxicity of solvents of gutta-percha used in endodontic retreatment.

J Endod. 1998 Apr; 24(4): 213-6.

20. Chybowski EA, Glickman GN, Patel Y, Fleury A, Solomon E, He J.

Clinical Outcome of Non-Surgical Root Canal Treatment Using a Single-cone Technique with Endosequence Bioceramic Sealer: A Retrospective Analysis.

J Endod 2018;44(6):941-945.

21. Civjan S, Brauer GM.

Physical properties of cements, based on zinc oxide, hydrogenated rosin, o-ethoxybenzoic acid, and eugenol.

J Dent Res 1964; 43: 281-299.

22. Damas BA, Wheater 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.

23. Colombo M, Poggio C, Dagna A, Meravini MV, Riva P, Trovati F, Pietrocola G.

Biological and physico-chemical properties of new root canal sealers.

J Clin Exp Dent 2018;10(2):e120-e126.

24. De-Deus G, Coutinho-Filho T, Reis C, Murad C, et Paciornik S.

Polymicrobial leakage of four root canal sealers at two different thicknesses.

J Endod 2006; 32(10):998-1001.

25. De Deus G, Ximenes R, Gurgel-Filho ED, Plotkowski MC, Coutinho-Filho T.

Citotoxicity of MTA and Portland cement on human ECV 304 endothelial cells.

Int Endod J 2005;38:604-609.

26. De Quadros I, Gomes Bp, Zaia Aa, Ferraz Cc, Souza-Filho Fj.

Evaluation of endodontic treatments performed by students in a Brazilian Dental School.

J Dent Educ 2005; 69(10):1161-1170.

27. 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 AngelusTM) or BiodentineTM.

Clin Oral Investig. 2019

28. Diop M.

L'obturation endocanalaire : bilan de cinq techniques expérimentées au département d'odontologie de Dakar.

Thèse : doctorat en chirurgie dentaire, Dakar, 2008.

29. Duarte MA, Demarchi AC, Yamashita JC, Kuga MC, Fraga Sde C.

PH and calcium ion release of 2 root-end filling materials.

Endod 2003; 95: 345-347.

30. Eldeniz AU, Hadimli HH, Ataoglu H, Orstavik D.

Antibacterial effect of selected root-end filling materials.

J Endod 2006; 32: 345-349.

31. Ehsani M, Dehghani A, Abesi F, Khafri S, Ghadiri Dehkordi S.

Evaluation of Apical Micro-leakage of Different Endodontic Sealers in the Presence and Absence of Moisture.

J Dent Res Dent Clin Dent Prospects 2014;8(3):125-129.

32. E. McMichael, Carolyn M. Primus and Lynne A. Opperman.

Dentin Tubule Penetration of Tricalcium Silicate Sealers

J Endod 2016; 42(4):632–636.

33. Estrela C, Bammann LL, Estrela CR, Silva RS, Pécora JD.

Antimicrobial and chemical study of MTA, Portland cement, calcium hydroxide paste, Sealapex and Dycal.

Braz Dent J 2000;11:3-9.

34. Fathy SM, Abd El-Aziz AM, Labah DA.

Cellular interaction and antibacterial efficacy of two hydraulic calcium silicate-based cements: Cell-dependent model.

J Conserv Dent 2019;22(1):17-22.

35. Fernández-Yáñez Sánchez A, Leco-Berrocal MI, Martínez- González JM.

Metaanalysis of filler materials in periapical surgery.

Med Oral Patol Oral Cir Bucal 2008; 13: 180-185.

36. Fridland M, Rosado R.

MTA solubility: a long-term study.

J Endod 2005; 31: 376-379.

37. Funteas UR, Wallace JA, Fochtman EW.

A comparative analysis of Mineral Trioxide Aggregate and Portland cement.

Aust Endod J 2003;29:43-44.

38. Giovana Cunha GRITTI, Salma Ivanna Araújo CAVALCANTE, Etevaldo Matos MAIA-FILHO et al.

Effect of rewetting solutions on micropush-out dentin bond strength of new bioceramic endodontic material.

Braz. Oral Res 2017;31:e76

39. Ghoneim AG, Lutfy RA, Sabet NE, Fayyad DM.

Resistance to fracture of roots obturated with novel canal-filling systems.

J Endod 2011; 37(11):1590-2.

40. Hakki SS, Bozkurt SB, Hakki EE, Belli S.

Effects of mineral trioxide aggregate on cell survival, gene expression associated with mineralized tissues, and biomineratization of cementoblasts.

J Endod 2009; 35: 513-519.

41. Hasan Razmi A, Behnam Bolhari A, Negar Karamzadeh Dashti B, Mahta Fazlyab C.

Bond strength of bioceramic and resin sealers.

Iranian Endodontic Journal 2016;11(2):129-133.

42. Ham KA, Witherspoon DE, Gutmann JL, Ravindranath S, Gait TC, Opperman LA.

Preliminary evaluation of BMP-2 expression and histological characteristics during apexification with calcium hydroxide and mineral trioxide aggregate.

J Endod 2005; 31: 275-279.

43. Haute Autorite de Sante.

Service évaluation des actes professionnels : rapport d'évaluation technologique, Traitement endodontique. 2008 Sep.

44. Holland R, de Souza V, Nery MJ, Otoboni Filho JA, Bernabe PF, Dezan E.

Mineral trioxide aggregate repair of lateral root perforations.

J Endod 2001; 27: 281-284.

45. 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; 73: 123-128.

46. Huang TH, Yang JJ, Li H, Kao CT.

The biocompatibility evaluation of epoxy resin-based root canal sealers *in vitro*.

Biomaterials 2002; 23: 77-83.

47. Imura N, Pinheiro Et, Gomes Bp, Zaia Aa, Ferraz Cc, Souza-Filho Fj.

The outcome of endodontic treatment: a retrospective study of 2000 cases performed by a specialist.

J Endod 2007; (11):1278-1282.

48. 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;38:1330– 6.

49. Jitaru S, Hodisan I, Timis L, Lucian A, Bud M.

The use of bioceramics in endodontics - literature review.

Clujul Med. 2016;89(4):470-473.

50. Kapralos V, Koutroulis A, Ørstavik D, Sunde PT, Rukke HV.

Antibacterial Activity of Endodontic Sealers against Planktonic Bacteria and Bacteria in Biofilms.

J Endod 2018;44(1):149-154.

51. Keiser K, Johnson CC, Tipton DA.

Cytotoxicity of mineral trioxide aggregate using human periodontal ligament fibroblasts.

J Endod 2000; 26: 288-291.

52. Kerekess K, Tronstad L.

Long term results of endodontic treatment performed with a standardized technique.

J Endod 1979; 5:83-90.

53. Kim DH, Jang JH, Lee BN, Chang HS, Hwang IN, Oh WM, Kim SH, Min KS, Koh JT, Hwang YC.

Anti-inflammatory and Mineralization Effects of ProRoot MTA and Endocem MTA in Studies of Human and Rat Dental Pulps in Vitro and In Vivo.

J Endod 2018;44(10):1534-1541.

54. Kim JR, Nosrat A, Fouad AF.

Interfacial characteristics of Biodentine and MTA with dentine in simulated body fluid.

J Dent. 2015;43(2):241-7.

55. Kontakiotis, EG, Filippatos, CG, Tzanetakis, GN, Agrafioti, A.

Regenerative endodontic therapy: a data analysis of clinical protocols.

J Endod 2015;41:146– 54.

56. Kontakiotis EG, Wu MK, Wesselink PR.

Effect of sealer thickness on long-term sealing ability: a 2-year follow-up study.

Int Endod J 1997; 30: 307-312.

57. 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 2008; 24: 1486-1494.

58. Laurichesse JM, Breillat J.

Lésions périapicales et percolations coronaires.

Endontie clinique. Paris : CdP ; 1986.

59. Laurichesse JM, Maestroni F.

Le scellement du système canalaire ; le concept d'unité biocompatible de substitution.

Paris : Edition Cdp, 1986.

60. Luo T, Liu J, Sun Y, Shen Y, Zou L.

Cytocompatibility of Biodentine and iRoot FS with human periodontal ligament cells: an in vitro study.

Int Endod J 2018;51(7):779-788.

61. Loushine BA, Bryan TE, Looney SW, Gillen BM, Loushine RJ, Weller RN, Pashley DH, Tay FR.

Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer.

J Endod 2011;37(5):673-7.

62. Machtou P.

Etanchéité apicale versus étanchéité coronaire.

Réal clin2004; 15(1): 7-20.

63. Madani ZS, Sefidgar SA, Rashed Mohasel A, Zabihi E, Mesgarani A, Bijani A, et al.

Comparative evaluation of antimicrobial activity of two root canal sealers: MTA Fillapex and AH 26.

Minerva Stomatol 2014;63(7-8):267-272.

64. McMichen FR, Pearson G, Rahbaran S, Gulabivala K.

A comparative study of selected physical properties of five root-canal sealers.

Int Endod J. 2003 Sep; 36(9): 629-35.

65. 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; 40(11):1746–1751.

66. 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;40(11):1746–1751.

67. Moghaddame-Jafari S, Mantellini MG, Botero TM, McDonald NJ, Nör JE.

Effect of ProRoot MTA on pulp cell apoptosis and proliferation in vitro.

J Endod 2005;31(5):387-391.

68. Moradi, S, Talati, A, Forghani, M, Jafarian, AH, Naseri, M, Shojaeian, S.

Immunohistological evaluation of revascularized immature permanent necrotic teeth treated by platelet-rich plasma: an animal investigation.

Cell Journal 2016;18:389– 96.

69. Nagas E, Uyanik MO, Eymirli A, Cehreli ZC, Vallittu PK, Lassila LVJ, Durmaz V.

Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers.

J Endod 2012;38(2):240-4.

70. Nagy, MM, Tawfik, HE, Hashem, AA, Abu-Seida, AM.

Regenerative potential of immature permanent teeth with necrotic pulps after different regenerative protocols.

J Endod 2014;40:192– 8.

71. Narang, I, Mittal, N, Mishra, N.

A comparative evaluation of the blood clot, platelet-rich plasma, and platelet-rich fibrin in regeneration of necrotic immature permanent teeth: a clinical study.

Contemporary Clinical Dentistry 2015;6:63– 8.

72. Nekoofar MH, Stone DF, Dummer PM.

The effect of blood contamination on the compressive strength and surface micros- tructure of mineral trioxide aggregate.

Int Endod J 2010;43:782-791.

73. N Nasseh H, El Noueiri B, Pilipili C, Ayoub F.

Evaluation of Biodentine Pulpotomies in Deciduous Molars with Physiological Root Resorption (Stage 3).

Int J Clin Pediatr Dent 2018;11(5):393-394.

74. Niang SO, Ndiaye D, Aïdara AW, Seck A, Diouf A, Touré B.

Suivi à trois mois de traitements endodontiques en une séance de parodontites apicales chroniques obturées au bioceramic sealer.

Rev Col Odonto-Stomatol Afr Chir Maxillo-fac, 2016 Vol 23, n°2, pp. 32-38.

75. Noushin S, Atefeh H, Hedayat Gorjestani, Ahmad RS.

The Effect of Different Irrigation Protocols for Smear Layer Removal on Bond Strength of a New Bioceramic Sealer.

J Endod 2013; 8(1): 10-13.

76. Ørstavik D, Nordahl I, Tibballs JE.

Dimensional change following setting of root canal sealer materials.

Dent Mater. 2001 Nov; 17(6): 512-9.

77. Orstavik D.

Materials used for root canal obturation.

Endod Topics 12; 2005; 25-38.

78. Oynick J, Oynick T.

A study of a new material for retrograde fillings.

J Endod 1978; 4: 203-206.

79. Panighi M, Camps J, Fremault CD, Freymann M, Perez F, Pilipili C, Tubiana JH.

Matériaux et techniques d'obturation endodontique.

Cah. Assoc. Dent. France 2003; 1-72

80. Parirokh M, Torabinejad M.

Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review.

Part I: Chemical, physical, and antibacterial properties.

J Endod 2010;36:16-27.

81. Parirokh, M, Torabinejad, M (2014)

Calcium silicate-based cements.

In: M Torabinejad, ed. Mineral trioxide aggregate, properties and clinical applications, 1st edn. Oxford, UK: Wiley Blackwell, pp 284– 320.

82. Pommel L, About I, Pashley D, Camps J.

Apical leakage of four endodontic sealers.

J Endod 2003; 29: 208-210.

83. Porter ML, Bertó A, Primus CM, Watanabe I.

Physical and chemical properties of new-generation endodontic materials.

J Endod 2010;36(3):524-528.

84. Quadros I, Zaia AA, Ferraz CC, de Souza Filho FJ, Gomes BP.

Radiographic prevalence of root canal ramifications in a sample of root canal treatments in a Brazilian Dental School.

Braz Oral Res. 2007; 21(2): 112-7.

85. Robinson JJ, Giraud O, Dos Santos S, Turlotte S, Fieschi J.

Urgences dentaires dans la pratique quotidienne.

EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Odontologie, 23-750-A-10, 2001, Médecine buccale, 28-700-M-10, 2008.

86. Ricucci D, Russo J, Rutberg M, Burleson Ja, Spångberg Ls.

A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2011; 112(6):825-842.

87. 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 2014;17(5):467-470.

88. Sarkar N K, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I.

Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate.

J Endod 2005;31: 97-100.

89. Sarkar N K, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I.

Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate.

J Endod 2005; 31: 97-100.

90. Seung J, Weir MD, Melo MAS, Romberg E, Nosrat A, Xu HHK, Tordik PA.

A Modified Resin Sealer: Physical and Antibacterial Properties.

J Endod 2018;44(10):1553-1557.

91. Shabahang S, Torabinejad M.

Treatment of teeth with open apices using mineral trioxide aggregate.

Pract Perio Aesth Dent 2000; 12: 315-319.

92. Shie MY, Huang TH, Kao CT, Huang CH, Ding SJ.

The effect of a physiologic solution pH on properties of white mineral trioxide aggregate.

J Endod 2009;35:98-101.

93. Sholeh Ghabraei, Behnam Bolhari, Fatemeh Yaghoobnejad, Naghmeh Meraji.

Calcium hydroxide residue and endodontic sealers

Iranian Endodontic Journal 2017;12(2):168-172.

94. Silujjai, J, Linsuwanont, P.

Treatment outcomes of apexification or revascularization in nonvital immature permanent teeth: a retrospective study.

J Endod 2017;43:238– 45.

95. Silva Almeida, LH, Moraes, RR, Morgental, RD, Pappen, FG.

Are premixed calcium silicate-based endodontic sealers comparable to conventional materials? A systematic review of in vitro studies.

J Endod 2017;43:527– 35.

96. Silva EJ, Carvalho NK, Ronconi CT, De-Deus G, Zuolo ML, Zaia AA.
Cytotoxicity Profile of Endodontic Sealers Provided by 3D Cell Culture Experimental Model.
Braz Dent J 2016;27(6):652-656.

97. Sipert CR, Hussne RP, Nishiyama CK, Torres SA.
In vitro antimicrobial activity of Fill Canal, Sealapex, Mineral Trioxide Aggregate, Portland cement and EndoRez.
Int Endod J 2005;38(8):539–543.

98. Srinidhi V. Ballullaya, Vusurumarthi Vinay, Jayaprakash Thumu, Srihari Devalla, Indira Priyadarshini Bollu, Sagarika Balla.
Stereomicroscopic Dye Leakage Measurement of Six Different Root Canal Sealers.
Journal of Clinical and Diagnostic Research 2017;11(6):ZC65-ZC68.

99. Stringhini Junior E, Dos Santos MGC, Oliveira LB, Mercadé M.
MTA and biodentine for primary teeth pulpotomy: a systematic review and meta-analysis of clinical trials.
Clin Oral Investig. 2018 Sep 20.

100. Siqueira JF JR.
Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail.
Int Endod J 2001; 34(1):1-10.

101. Thomson TS, Berry JE, Somerman MJ, Kirkwood KL.
Cementoblasts maintain expression of osteocalcin in the presence of mineral trioxide aggregate.
J Endod 2003;29:407-412.

102. Topçuoğlu HS, Arslan H, Akçay M, Saygili G, Cakici F, Topçuoğlu G.

The effect of medicaments used in endodontic regeneration technique on the dislocation resistance of mineral trioxide aggregate to root canal dentin.

J Endod 2014;40(12):2041-2044.

103. Torabinejad M, Hilga RK, Mckendry DJ, Pitt Ford TR.

Dye leakage of four root end filling materials: effects of blood contamination.

J Endod 1994; 20: 159-163.

104. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR.

Physical and chemical properties of a new root-end filling material.

J Endod 1995a; 21: 349-353.

105. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD.

Antibacterial effects of some root end filling materials.

J Endod 1995c, 21: 403-6.

106. Torabinejad M, Nosrat A, Udochukwu O.

Regenerative endodontic treatment or mineral trioxide aggregate apical plug in teeth with necrotic pulps and open apices: a systematic review and meta-analysis.

J Endod 2017 <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.05.011>.

107. Torabinejad M, Parirokh M.

Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review. Part II: leakage and biocompatibility investigations.

J Endod 2010;36:190-202.

108. Vouzara T, Dimosiari G, Koulaouzidou EA, Economides N.

Cytotoxicity of a New Calcium Silicate Endodontic Sealer.

J Endod 2018;44(5):849-852.

109. Weine FS.

Thérapeutique endodontique.

Paris: Prélat 1977:203-6.

110. Weis MV, Parashos P, Messer HH.

Effect of obturation technique on sealer cement thickness and dentinal tubule penetration.

Int Endod J. 2004 Oct; 37(10): 653-63.

111. 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;39:319– 26.

112. Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR.

Long-term seal provided by some root-end filling materials.

J Endod 1998;24:557-560.

113. Zhang H, Shen Y, Ruse ND, Haapasalo M.

Antibacterial activity of endodontic sealers by modified direct contact test against Enterococcus faecalis.

J Endod 2009;35(7):1051-5.

114. Zhu L, Yang J, Zhang J, Peng B.

A comparative study of BioAggregate and ProRoot MTA on adhesion, migration, and attachment of human dental pulp cells.

J Endod 2014;40(8):1118-1123.

115. Zoufan K, Jiang J, Komabayashi T, Wang YH, Safavi KE, Zhu Q.

Cytotoxicity evaluation of Gutta Flow and Endo Sequence BC sealers.

Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2011;112(5):657-61.