

Table des matières

INTRODUCTION.....	2
RAPPELS SUR LE COMPLEXE PULPO-DENTINAIRE.....	4
I. Notions histologiques	4
II. Lésions du complexe pulpo-dentinaire	5
III. Régénération du complexe pulpo-dentinaire	6
LE COIFFAGE PULPAIRE DIRECT	8
I. Indications	8
1. Lésions carieuses	8
2. Expositions pulpaire iatrogènes	11
3. Expositions pulpaire traumatiques	12
4. Contre-indications	13
II. Les biomatériaux disponibles	14
1. L'hydroxyde de calcium	14
2. Les silicates de calcium	17
III. Protocole et suivi clinique	26
1. Protocole clinique	26
2. Suivi clinique	32
IV. Pronostic.....	33
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	39
BIBLIOGRAPHIE	42

INTRODUCTION

Tout au long de sa formation et de sa présence sur l'arcade, l'organe dentaire est sujet à de nombreuses agressions physiques, chimiques et thermiques. D'autre part, celui-ci peut être sujet à des phénomènes pathologiques tels que les traumatismes et le développement de lésions carieuses. Alors que la fréquence des traumatismes est relativement importante (Levin et al. 2020) (25% des enfants scolarisés écoliers et 33% des jeunes adultes) notamment dans les secteurs antérieurs, la carie fait partie, d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) des pathologies les plus répandues dans le monde, et touche des milliards d'enfants et d'adultes de tout âge (GBD 2017 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators 2018).

Au fil du temps, la dentisterie a évolué vers une approche de plus en plus conservatrice, aussi bien vers un maintien maximum des structures tissulaires présentes, qu'au niveau biologique avec le développement de thérapeutiques de conservation de la vitalité de l'organe pulpo-dentinaire dites de « Vital Pulp Therapy » (VPT).

En effet, le développement des travaux de recherches, la meilleure compréhension de la physio-pathologie pulpo-dentinaire mais aussi le développement et l'amélioration des biomatériaux à la disposition du chirurgien-dentiste, permettent aujourd'hui l'étendue et la prédictibilité de ces thérapeutiques.

Parmi les thérapeutiques de conservation de la vitalité pulpaire, la technique de coiffage pulpaire est probablement la technique la plus ancienne. Celui-ci peut être qualifié de coiffage direct ou indirect en fonction de la situation clinique et des tissus concernés. Le coiffage pulpaire direct est défini par le Collège National des Enseignants en Odontologie Conservatrice (CNEOC), comme une procédure qui consiste à « recouvrir les tissus dentino-pulpaire par un biomatériau placé au contact d'une plaie pulpaire afin d'obtenir la cicatrisation dentino-pulpaire et/ou l'oblitération de la pulpe exposée par un pont dentinaire néoformé » (Collège national des enseignants en odontologie conservatrice et endodontie (France), Lasfargues, et Machtou 2010)

La préservation de la vitalité pulpaire doit aujourd'hui plus que jamais être une préoccupation essentielle pour le chirurgien-dentiste. Si par le passé, le recours au traitement endodontique était souvent inévitable, il est désormais acquis que dans de nombreuses situations, l'organe pulpaire possède des capacités importantes de défense et de régénération, permettant de mettre en place les techniques précédemment présentées. Au-delà même de ces notions, il est aujourd'hui admis de limiter au maximum l'exposition du tissu pulpaire notamment par le développement des approches de curetage sélectif des tissus carieux (F. Schwendicke et al. 2016), ce qui peut limiter le recours à des manœuvres de coiffage pulpaire direct. Cependant, les expositions du tissu pulpaire lors de curetage sélectif restent possibles et le curetage total est encore largement étendu. Enfin, les expositions iatrogènes peuvent recourir à une prise en charge de coiffage pulpaire, tout comme la place des techniques de conservation de la vitalité pulpaire, dans la gestion des situations d'origine traumatiques.

Les objectifs de ce travail sont de faire le point sur les thérapeutiques actuelles du coiffage pulpaire direct et les données actuelles de la littérature. Des rappels importants sur l'organe dentaire, les processus physiologiques et pathologiques pouvant l'atteindre et les modes de régénération possibles seront dans un premier temps présenté. Cette première partie permettra de présenter ensuite les indications concernant la thérapeutique de coiffage pulpaire direct. Par la suite, le protocole clinique sera présenté, par la description des biomatériaux disponibles, les étapes opératoires, le suivi et le pronostic du coiffage pulpaire direct par l'intermédiaire de la littérature disponible. Enfin, la dernière partie conclura sur le travail en donnant les perspectives possibles à l'heure actuelles quant à l'extension permanente des thérapeutiques de conservation de la vitalité pulpaire.

RAPPELS SUR LE COMPLEXE PULPO-DENTINAIRE

I. Notions histologiques

Au niveau histologique, l'organe dentaire est constitué de trois principaux tissus, l'émail, la dentine et la pulpe dentaire. Au niveau radiculaire, le cément se substitue à l'émail.

Ces trois tissus sont de natures différentes et vont jouer des rôles distincts au niveau fonctionnel et dans la protection de la dent.

L'émail, hautement minéralisé et acellulaire, principalement constitué d'hydroxyapatite, n'est synthétisé que lors de l'éruption de la dent par les améloblastes, et permet la protection des tissus sous-jacents. Bien que l'émail ne puisse pas être reformé, sa reminéralisation est possible.

La dentine est un tissu de type organo-minéral. La phase minérale est également constituée de phosphates de calcium et représente environ 70% de la composition de la dentine. La phase organique est constituée de protéines collagéniques et non-collagéniques. Le collagène de type I est majoritaire, et les principales protéines non-collagéniques sont représentées par des phosphoprotéines, protéoglycanes et facteurs de croissances nécessaires à la formation et à la régénération de la dentine. En effet, à l'inverse de l'émail, la dentine est sécrétée tout au long de la vie et sa néoformation en cas d'agression est possible et constitue un moyen de défense majeur.

Enfin la pulpe dentaire est un tissu conjonctif, responsable de la vitalité de la dent, souvent décrite comme vitalité pulpaire. Elle est le siège de nombreuses cellules immunitaires (macrophages, mastocytes, cellules dendritiques et lymphocytes) et non-immunitaires (odontoblastes, fibroblastes, cellules souches) impliquées dans l'ensemble des fonctions pulpaires. De plus, la pulpe dentaire est richement innervée et vascularisée et présente une particularité importante à l'inverse de l'ensemble des autres tissus de notre organisme, à savoir d'être localisée au sein des parois rigides inextensibles de dentine. Cette particularité qui peut sembler anodine, va avoir un impact, en cas de phénomène pathologique, sur l'initiation et l'extension d'une inflammation et ses conséquences tissulaires, ainsi que sur les douleurs ressenties par le patient.

Leur proximité, mais aussi les relations intimes au niveau métabolique et cellulaire de la pulpe et de la dentine font que ces tissus peuvent être regroupés sous le terme de complexe pulpo-dentinaire. L'atteinte de ce complexe, d'origine carieuse ou traumatique sera qualifiée de lésion pulpo-dentinaire.

II. Lésions du complexe pulpo-dentinaire

Le complexe pulpo-dentinaire est protégé du milieu extérieur, au niveau coronaire par la couche d'émail. La rupture de l'intégrité de cette couche protectrice peut être consécutive à deux phénomènes : la progression d'une lésion carieuse ou l'apparition d'une lésion traumatique de type fracture ou fêlure. Dans les deux cas, l'invasion de pathogènes ou de leurs toxines est possible et va initier une réaction inflammatoire.

Le milieu buccal est riche en bactéries. Elles s'organisent à la surface des tissus dentaires sous forme de plaque dentaire, à partir de la pellicule exogène acquise, d'origine salivaire (Chawhuaveang et al. 2021). L'apparition d'une lésion carieuse est initiée par une rupture de l'équilibre au sein de cette organisation, liée à l'hôte, à son alimentation et à la structure dentaire elle-même, sous l'action de bactéries dites « cariogènes » principalement Gram positif, de type streptocoques et lactobacilles. La progression de cette lésion est due à l'activité métabolique des bactéries cariogènes qui vont, à partir d'un substrat, par fermentation glucidique, former des acides organiques entraînant la dissolution des structures minérales constituant l'organe dentaire. Lorsqu'elle n'est pas compensée par de la reminéralisation, la dissolution évolue vers un stade pathologique et un phénomène de cavitation au sein de la dentine (Featherstone 2004).

Le complexe pulpo-dentinaire est riche en cellules, qui jouent un rôle de défense. Situés en périphérie du tissu pulpaire, et possédant leurs prolongements au sein des tubuli dentinaires, les odontoblastes constituent la première ligne de défense du complexe pulpo-dentinaire. Ils vont, en plus de jouer un rôle majeur dans la perception des stimuli extérieurs par l'intermédiaire des Transient Receptors Potential (TRP), présenter des récepteurs de type Toll-like Receptors (TLR) capables de détecter les pathogènes progressant en direction pulpaire. Cette reconnaissance permet aux odontoblastes de sécréter aussi bien des molécules biocides de défenses que des signaux pro-inflammatoires, initiant une inflammation pulpaire dans le but de limiter la progression de pathogènes, par l'intermédiaire notamment des cellules immunitaires résidentes ou recrutées par la circulation sanguine.

Dans le cas de lésions plus proches du tissu pulpaire, le diamètre des tubuli dentinaires augmentant, la progression de la lésion va avoir davantage de conséquences sur le complexe pulpo-dentinaire et notamment la destruction de la couche odontoblastique. D'une part, l'invasion des pathogènes va atteindre le tissu pulpaire et les autres populations cellulaires, immunitaires et non-immunitaires, qui vont sécréter des signaux pro-inflammatoires afin de permettre une élimination des pathogènes.

D'autre part, la conservation de la vitalité pulpaire, par la protection du complexe pulpo-dentinaire du milieu extérieur, ne sera possible que par le recrutement et la différenciation de cellules dites *odontoblast-like*, remplaçant les odontoblastes détruits, à partir de cellules souches pulpaire.

L'inflammation générée est nécessaire à la mise en place des étapes de régénération, cependant son intensité peut présenter des effets délétères sur le tissu pulpaire. En effet, localisé au sein des parois rigides de dentine, les phénomènes de vasodilatation, afflux cellulaire et augmentation de la pression intra-pulpaire peuvent aboutir à la nécrose pulpaire. La résolution de cet état inflammatoire est indispensable à l'initiation des étapes de régénération permettant la conservation de la vitalité pulpaire (Cooper, Holder, et Smith 2014).

III. Régénération du complexe pulpo-dentinaire

Dans le cadre de lésions n'entraînant pas la destruction de la couche odontoblastique, ces derniers vont être capables de sécréter une dentinaire tertiaire dite réactionnelle, permettant la protection du tissu pulpaire sous-jacent.

Une situation entraînant la destruction des odontoblastes va nécessiter la mise en place de nombreuses étapes pour permettre la formation de cellules *odontoblast-like*, qui sécrèteront une dentine tertiaire réparatrice, au détriment du volume pulpaire, à savoir la libération de signaux de régénération et le recrutement de cellules souches pulpaire (Imad About 2013).

Ces signaux de régénération, majoritairement des facteurs de croissance, pro-angiogéniques, ou stimulant la croissance nerveuse peuvent être issues de deux sources : libérés de la dentine consécutivement à sa dissolution ou à des manœuvres de soin ; et sécrétés par les cellules pulpaire, notamment les fibroblastes pulpaire majoritaires au sein du tissu pulpaire (I. About 2011; Tran-Hung et al. 2008).

Les cellules souches pulpaire ont été mises en évidence au niveau péri-vasculaire (Shi et Gronthos 2003) et ont été décrites comme présentant l'ensemble des facteurs caractéristiques des cellules souches mésenchymateuses. De plus, il a été démontré que ces cellules souches pulpaire sont capables de se différencier en différent types cellulaires (chondrocytes, adipocytes, cellules musculaires et nerveuses), il a été démontré leur capacité de se différencier en cellules odontoblastiques, capables de sécréter des structures minéralisées proche de la dentine (I. About et al. 2000).

Ainsi sous l'action de signaux de régénération, ayant pour origine la dissolution de la dentine, les cellules pulpairees stimulées par les pathogènes et leurs toxines et notamment les cellules souches pulpairees, sont recrutées sur le site lésionnel, afin de permettre la formation de cellules sécrétrices de dentine tertiaire réparatrice, permettant la protection du complexe pulpo-dentinaire.

Enfin, de très nombreux travaux ont également mis en évidence l'importance du système du complément dans l'inflammation et la régénération du complexe pulpo-dentinaire. Cascade enzymatique de l'immunité innée initialement décrit comme étant activé par la présence de pathogènes, ce système a été également démontré comme pouvant être activé par des biomatériaux. L'activation du système du complément, aboutit à la formation de protéines du complément telles que des anaphylatoxines C3a et C5a (Charles A Janeway et al. 2001).

Ces protéines ont été décrites comme jouant un rôle important, par l'intermédiaire notamment des fibroblastes pulpairees, sur les mécanismes de défense et de régénération, à savoir la prolifération des fibroblastes pulpairees, des cellules souches et leur recrutement (Chmielewsky et al. 2015; Rufas et al. 2016).

La mise en place de ces étapes de régénération nécessite cependant dans la grande majorité des cas un prérequis essentiel, à savoir une thérapeutique clinique. En effet, la suppression de l'étiologie, que ce soit l'exposition pulpaire en elle-même ou la présence des pathogènes au sein du tissu dentinaire est nécessaire pour espérer la conservation de la vitalité pulpaire. Ces processus régénératifs moléculaires et cellulaires pouvant même être stimulés par les biomatériaux utilisés.

LE COIFFAGE PULPAIRE DIRECT

I. Indications

La réalisation d'une thérapeutique de coiffage pulpaire direct va tout d'abord dépendre de l'état pulpaire de la dent concernée. Avant d'envisager une procédure de coiffage pulpaire, il faut s'assurer d'être dans le cas d'une dent vitale, asymptomatique ou présentant des symptômes de pulpite réversible.

Ainsi, pour mettre en œuvre une thérapeutique ayant pour but de conserver une pulpe vivante, un diagnostic pulpaire doit être établi tout en tenant compte d'un certain nombre d'exigences techniques comme la pose d'un champ opératoire et la possibilité future de réaliser une reconstitution étanche et pérenne de la dent.

La démarche diagnostique repose donc sur l'anamnèse médicale et dentaire, complétée par un examen clinique précis et les examens complémentaires radiographiques. Le diagnostic du statut pulpaire va s'effectuer à l'aide de tests physiques, notamment par des tests thermiques et/ou électriques permettant de statuer de manière la plus précise possible sur l'état pulpaire de la dent (Duncan et al. 2019).

Enfin, au-delà des considérations du statut pulpaire de la dent, par définition, le coiffage pulpaire direct va pouvoir être envisagé lorsque la pulpe dentaire est exposée et ce en raison de différentes situations cliniques : une lésion carieuse, une lésion traumatique ou une exposition de type iatrogène.

Quel que soit l'étiologie, le patient doit être informé de l'évolution possible du statut pulpaire et d'un possible recours à un traitement endodontique de la dent.

1. Lésions carieuses

Selon l'OMS, une lésion carieuse est « un processus pathologique localisé, d'origine externe, apparaissant après l'éruption, qui s'accompagne d'un ramollissement des tissus durs et évoluant vers la formation d'une cavité ». Initialement subclinique, une lésion carieuse peut entraîner la destruction de l'organe dentaire sans intervention adaptée.

Afin de guider le praticien dans sa démarche diagnostique et thérapeutique de nombreuses classifications visuelles et/ou radiologiques ont été successivement développées. De nos jours la classification ICADS (International Caries Detection and Assessment System) est reconnue au niveau international (Figure 1). Cette classification permet une détection précoce des lésions carieuses en se basant sur une inspection visuelle des surfaces dentaires préalablement nettoyées. Cette classification visuelle, et son pendant radiologique, ont été repris dans les nouveaux concepts de prise en charge de la maladie carieuse tel que le système ICCMS (International Caries Classification and Management System) et plus récemment le système CariesCare4D.

Code	Système de détection
0	Saine
1	Premier changement visuel de l'émail (visible uniquement après séchage prolongé ou confiné aux puits et fissures)
2	Changement visuel net de l'émail
3	Rupture localisée de l'émail (sans signe visuel d'atteinte dentinaire)
4	Zone sombre dans la dentine sous-jacente visible à travers l'émail
5	Cavité distincte avec dentine exposée
6	Cavité de grande étendue avec dentine exposée

Figure 1: Classification ICDAS, d'après (Ismail et al. 2007)

Bien qu'indispensable dans la détection et la gestion des lésions carieuses, l'ICDAS ne permet pas et n'a pas vocation à poser l'indication d'un coiffage pulpaire.

Le risque d'exposition pulpaire étant corrélé au degré d'atteinte carieuse, l'ICDAS permet tout de même d'anticiper le risque accru d'effraction pulpaire en cas de lésion profonde, notamment pour les stades radiologique RC5 et RC6 de l'ICDAS (Figure 2). Pour de telles lésions, le praticien devra alors se mettre dans de bonnes conditions (champ opératoire) et adopter les bons gestes (éviction sélective) afin de minimiser le risque d'exposition pulpaire et de maximiser la réussite d'un possible coiffage pulpaire.

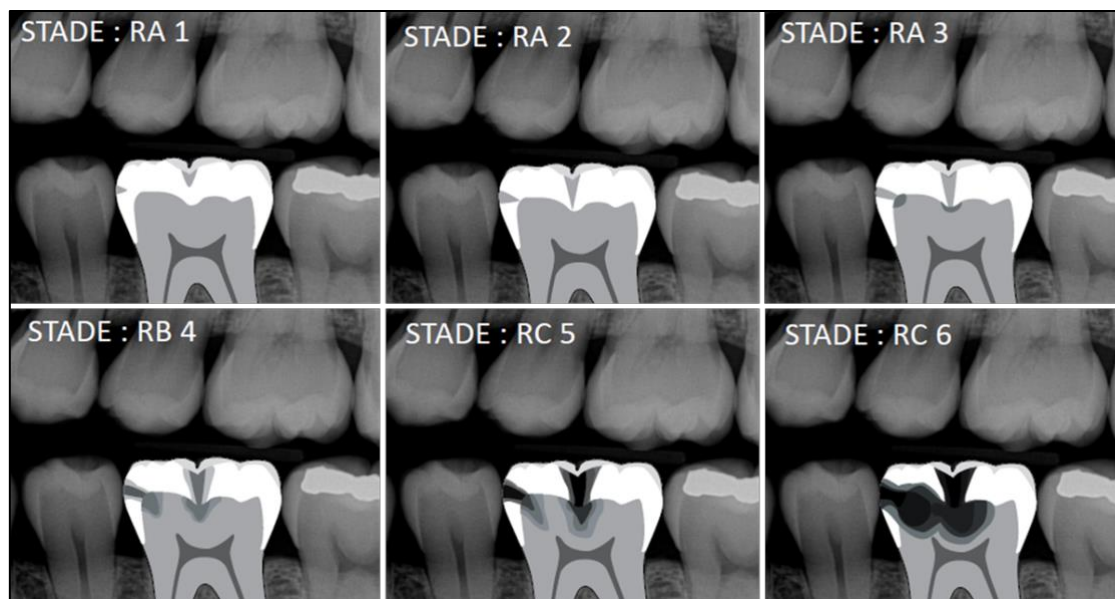


Figure 2: Représentation schématique du système d'évaluation radiographique ICDAS (Dr Benoit Ballester)

L'indication d'un coiffage pulpaire dans le cas d'un traitement de lésion carieuse fait donc intervenir trois éléments :

- Analyse préopératoire de la physiopathologie pulpaire : caractère vital, asymptomatique ou inflammation de type « réversible » de la pulpe dentaire.
- Analyse préopératoire de la sévérité de la lésion carieuse et du risque d'effraction pulpaire : champ opératoire, éviction carieuse sélective centripète.
- Analyse per-opératoire de la physiopathologie pulpaire (obtention rapide de l'hémostase).

Concernant les dents temporaires, quelle que soit l'atteinte pulpaire, le coiffage pulpaire n'est pas recommandé pour les expositions pulpaires consécutives à un curetage de lésions carieuses, comme présenté dans les dernières recommandations de l'American Academy of Dentistry Pediatric (American Academy of Pediatric Dentistry 2019).

Dans le cadre des dents permanentes immatures, il est recommandé de réaliser un coiffage pulpaire direct, dans le cas de lésion carieuse de petite étendue sans pathologie pulpaire, alors que la pulpotomie partielle est recommandée dans le cas d'un syndrome pulpaire de type réversible (American Academy of Pediatric Dentistry 2019).

Les recommandations de l'European Society of Endodontology (ESE) (Duncan et al. 2019) indiquent que dans les cas d'effractions consécutives à un curetage de la lésion carieuse, concernant les dents permanentes immatures/matures, la réalisation d'un coiffage pulpaire direct en insistant sur un protocole strict dans le cas des lésions juxta-pulpaire et un contrôle de la poursuite de l'édification radiculaire.

D'autre part, et concernant également les dents permanentes, une exposition pulpaire peut être dans le cadre d'une prise en charge d'une lésion carieuse par curetage sélectif, ou après temporisation par « step-wise ». Dans ces deux cas, de par l'indication posée initialement, l'état pulpaire doit permettre la prise en charge par un coiffage pulpaire direct.

2. Expositions pulpaires iatrogènes

Une exposition pulpaire iatrogène est définie par la Haute Autorité de Santé (HAS) comme « une situation qui désigne les expositions pulpaires effectuées accidentellement au cours d'un soin, en l'absence de caries, au cours d'une instrumentation manuelle ou rotative » (Haute Autorité de santé 2019).

Dans le cas de situation de prise en charge de pulpe non pathologique, la pulpe dentaire exposée n'est pas inflammatoire. On observe une pulpe dentaire rosée/rouge qui présente un léger saignement et qui pourra être traitée avec un coiffage pulpaire direct. Ainsi peuvent être concernées les dents temporaires et les dents permanentes matures et immatures.

Dans le cas des dents temporaires, lors d'expositions iatrogènes de tailles limitées, le coiffage pulpaire peut être envisagé, tout comme dans le cas des dents permanentes immatures, où il est notamment recommandé d'effectuer un coiffage pulpaire direct (American Academy of Pediatric Dentistry 2019).

Selon les recommandations de l'ESE (Duncan et al. 2019) et de l'American Association of Endodontists (AAE) (American Association of Endodontists (AAE) 2016) les effractions iatrogènes sur des dents permanentes matures peuvent être traitées par coiffage pulpaire direct.

Lors de l'effraction en elle-même, si la pulpe est plus hémorragique (difficulté à stopper le saignement, à obtenir une hémostase), une inflammation pulpaire de type « irréversible » peut être suspectée et n'indique donc pas, dans la limite des recommandations actuelles, la

réalisation d'un coiffage pulpaire direct. De la même manière, une pulpe d'aspect blanchâtre ou grisâtre, peut faire suspecter une pulpe en stade de nécrose ou en voie de dégénérescence, et contre-indique le coiffage pulpaire (Lasfargues et Colon 2009).

3. Expositions pulpaires traumatiques

L'exposition pulpaire traumatique va être consécutive à un traumatisme dentaire pouvant concerner les dents temporaires et permanentes. En fonction du type de denture concernée, des types d'atteintes tissulaires (amélaire, dentinaire, pulpaire et parodontaux), la prise en charge va être influencée.

Plusieurs classifications sont actuellement disponibles, permettant d'établir la thérapeutique appropriée ; parmi celles-ci, la classification d'Andreasen est largement reconnue et utilisée par l'intermédiaire de l'association internationale de traumatologie dentaire (International Association of Dental Traumatology IADT) (Day et al. 2020; Bourguignon et al. 2020). Elle permet de définir, dans les situations pour lesquelles la pulpe est exposée, le ou les traitements pouvant être envisagés pour conserver la vitalité pulpaire. Les atteintes pulpaires traumatiques vont être retrouvées dans les situations suivantes :

- Fracture coronaire amélo-dentino-pulpaire, sur dents temporaires, permanentes immatures et matures.
- Fracture corono-radiculaire avec exposition pulpaire, sur dents temporaires, permanentes immatures et matures.

Concernant les dents temporaires, le coiffage pulpaire direct n'est pas recommandé quel que soit les atteintes tissulaires. En revanche, des thérapeutiques de conservation de la vitalité pulpaires peuvent être mise en œuvre, et notamment dans le cas de fractures coronaires amélo-dentino-pulpaires (pulpotomie partielle, cervicale) tout comme, mais dans une moindre mesure, dans le cas de fractures corono-radiculaires avec exposition pulpaire, après une analyse de la conservabilité de la dent et du stade de développement radiculaire (Day et al. 2020). Il est tout de même à noter que l'AAPD (American Academy of Pediatric Dentistry 2019) évoque le coiffage pulpaire dans le cas d'expositions traumatiques pulpaires de très faibles étendues.

Concernant les dents permanentes immatures, le coiffage pulpaire direct tout comme la pulpotomie partielle peuvent être envisagés en cas de fracture coronaire amélo-dentino-pulpaire

alors que la pulpotomie partielle, est, si la conservation de la dent le permet, à préférer dans le cadre de fracture corono-radicaire avec exposition pulpaire. Ces thérapeutiques sont indiquées afin de permettre une poursuite de l'édification radicaire.

Enfin, dans le cadre des dents permanentes matures, des traitements de conservation de la vitalité pulpaire (coiffage pulpaire direct, pulpotomie partielle) sont envisageable en cas de fracture coronaire amélo-dentino-pulpaire, tout en étant tout de même dépendant de la restauration définitive envisagée de la dent. Dans le cas de fracture corono-radicaire, les recommandations tendent à préconiser en général le traitement endodontique (American Association of Endodontists (AAE) 2016).

4. Contre-indications

Comme tout acte clinique, le coiffage pulpaire direct peut être contre-indiqué par des paramètres liés à la dent concernée (contre-indications locales) ou liés au patient (contre-indications générales).

Contre-indications locales :

- Inflammation pulpaire de type « irréversible », nécrose pulpaire ou dent requérant un traitement par pulpectomie pour d'autres considérations.
- Délabrement dentaire conséquent qui entraîne l'impossibilité de conserver la dent.
- Impossibilité de mettre en place le champ opératoire (digue dentaire).
- Temps d'exposition pulpaire avec l'environnement buccal supérieur à 24 heures.
- Absence d'hémostase, saignement pulpaire abondant et continu mis en évidence lors de l'acte, signifiant d'une inflammation pulpaire trop importante.

Contre-indications générales :

- Sujets à risque infectieux : les patients à haut risque d'endocardite infectieuse puisque cette thérapeutique peut être à l'origine d'une bactériémie (Lesclous 2011). Concernant les patients immunodéprimés, l'acte de coiffage pulpaire à ce jour n'est plus contre-indiqué mais les recommandations de la littérature sont encore vagues sur cette prise en charge. La mise en place de précaution suivant le type de pathologie et d'un suivi régulier est primordial.

- Hygiène bucco-dentaire insuffisante.
- Absence de motivation du patient, impossibilité de mettre en place un suivi clinique et radiologique.

II. Les biomatériaux disponibles

Lors d'une manœuvre de coiffage pulpaire direct, la procédure clinique va consister au placement d'un biomatériau au contact du tissu pulpaire exposé. Ce dernier, qualifié de biomatériau de coiffage pulpaire, va jouer un double rôle, il va d'une part permettre d'isoler le tissu pulpaire du milieu extérieur hostile et ainsi le protéger des agressions futures, et d'autre part de permettre la mise en place des processus de régénération par le complexe pulpo-dentinaire (Youssef et al. 2019). Un matériau de restauration sus-jacent est par la suite nécessaire, permettant de protéger l'ensemble et de redonner esthétique et fonction à l'organe dentaire traité.

Il est important de distinguer les biomatériaux de coiffage pulpaire direct et indirect. En effet, alors que de nombreux biomatériaux de classes chimiques différentes sont utilisables en thérapeutique indirecte, le contact entre le biomatériau et le tissu pulpaire exposé, dans le cas d'un coiffage pulpaire direct, contre-indique l'utilisation des résines composites et des ciments verre ionomères (Hilton 2009). Alors que l'hydroxyde de calcium a longtemps été le biomatériau de choix et est toujours utilisé à l'heure actuelle, avec l'avènement des biomatériaux à base de silicates de calcium, initialement lié au développement du Mineral Trioxide Aggregate (ProRoot® MTA, Dentsply), le praticien dispose aujourd'hui de nombreuses formulations plus ou moins modifiées et présentant des propriétés physico-chimiques, mécaniques et biologiques améliorées en comparaison à l'hydroxyde de calcium. Ces différents biomatériaux pouvant être utilisés en tant que biomatériaux de coiffage pulpaire direct sont ainsi présentés.

1. L'hydroxyde de calcium

La première utilisation lors d'un coiffage pulpaire direct remonte à 1937 (Hess et al. 1990). L'hydroxyde de calcium, également appelé « chaux hydratée » ou « chaux éteinte », se présente, pour sa forme extemporanée, sous la forme d'une fine poudre blanche inodore présentant la formule chimique $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

L'hydroxyde de calcium est obtenu par mélange de chaux vive (CaO) et d'eau (H₂O), c'est pourquoi en présence d'un environnement aqueux, il se dissocie en ions calcium Ca²⁺ et hydroxydes OH⁻, selon la formule suivante : $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{OH}^-$. (Farhad et Mohammadi 2005). Ces ions libérés, sont responsables des propriétés biologiques du biomatériau.

Ainsi, depuis plusieurs décennies, l'hydroxyde de calcium a été considéré comme un biomatériau incontournable dans l'arsenal thérapeutique des chirurgiens-dentistes et comme le «gold-standard» dans le cas d'un coiffage direct de la pulpe (Morotomi, Washio, et Kitamura 2019).

Dans notre pratique, l'hydroxyde de calcium peut se présenter sous deux formes : soit sous la forme d'une préparation magistrale, soit sous la forme d'une préparation commerciale (de type ciment par exemple). Différents types de véhicules peuvent être utilisés pour préparer l'hydroxyde de calcium, à savoir de type aqueux, visqueux ou huileux. Ces différents véhicules vont influencer la solubilité et la dissociation ionique de l'hydroxyde de calcium. Ainsi, d'une manière générale, les situations cliniques nécessitant une libération ionique rapide au début du traitement nécessitent une pâte d'hydroxyde de calcium contenant un véhicule aqueux, tandis que celles qui nécessitent une libération ionique progressive et uniforme la libération nécessite une pâte contenant un véhicule visqueux. Les pâtes contenant des véhicules huileux ont une utilisation limitée et ne sont utilisées que lorsqu'une très faible dissociation ionique est nécessaire (Farhad et Mohammadi 2005).

Au niveau physico-chimique, l'hydroxyde de calcium est un matériau peu soluble dans l'eau mais permet néanmoins de libérer les ions hydroxydes OH⁻ et calcium Ca²⁺ qui sont à l'origine des propriétés des biomatériaux à base d'hydroxyde de calcium.

Bien que variables selon les formulations, les biomatériaux à base d'hydroxyde de calcium vont présenter des temps de travail relativement courts de l'ordre de 3 à 5 minutes suivant l'humidité et la composition (Commission des dispositifs médicaux de l'Association Dentaire Française 2003). Concernant le temps de prise, correspondant à la transformation en phase solide, pour les pâtes durcissantes, il est compris entre 2,5 et 5,5 minutes (Commission des dispositifs médicaux de l'Association Dentaire Française 2003). Enfin, la radio-opacité est variable en fonction des formulations, mais est généralement, pour les formulations magistrales notamment, d'une radio-opacité voisine de la dentine, ce qui peut le rendre difficilement distinguable radiologiquement.

Au niveau mécanique, les biomatériaux à base d'hydroxyde de calcium ne présentent pas réellement d'intérêt puisque ces derniers présentent par exemple des faibles valeurs de résistance en compression de l'ordre de 10,5 MPa au bout de 24 heures. En comparaison, celle

de l'émail est de 400 MPa et celle de la dentine de 297 MPa. De plus, ils présentent également une mauvaise capacité d'adhésion à la dentine, ce qui ne permet pas à l'hydroxyde de calcium d'assurer une étanchéité à long terme (Cohenca, Paranjpe, et Berg 2013). De part ces faibles propriétés, la mise en place de ce type de biomatériau va se limiter à la plaie pulpaire sur une faible surface et il sera donc nécessaire de mettre en place une restauration coronaire étanche après la mise en place de l'hydroxyde de calcium.

Au niveau biologique, l'hydroxyde de calcium peut entraîner des effets cytotoxiques au contact direct des tissus mous vivants. En effet, il peut engendrer une nécrose de coagulation qui reste cependant superficielle en raison de sa faible solubilité, c'est pourquoi l'hydroxyde de calcium est considéré comme un matériau biocompatible. De plus, l'élévation du pH par la libération d'ion OH^- lui confère des propriétés antibactériennes. (Alex 2018). Ce pH élevé entraîne alors une élimination rapide de plusieurs espèces de micro-organisme mais l'activité antimicrobienne de l'hydroxyde de calcium décroît au fur et à mesure que la concentration en ions hydroxydes et que le pH diminue. Ce pH lui permet également de s'opposer à l'acidose inflammatoire et posséder ainsi une activité anti-inflammatoire (Claisse-Crinquette et Claisse 2002). L'hydroxyde de calcium présente également une activité hémostatique, qui est due à la présence de calcium, qui est un des facteurs de la coagulation sanguine. Ils vont donc induire une vasoconstriction des capillaires sanguins en réduisant leurs perméabilités et en limitant l'apparition d'un caillot sanguin (Farhad et Mohammadi 2005).

Enfin, au contact des tissus pulpaire, l'hydroxyde de calcium présente la capacité de stimuler les odontoblastes, pour entraîner la formation de dentine réparatrice, notamment par l'intermédiaire des ions calcium. D'autre part, son pH élevé dû à la libération des ions hydroxydes provoque une nécrose de coagulation superficielle de la pulpe dentaire et fournit ainsi un degré d'hémostase qui stimule la formation d'un pont de tissu minéralisé et de dentine (Alex 2018).

Bien que longtemps utilisé comme matériau « gold standard » pour la thérapeutique de coiffage pulpaire direct, l'hydroxyde de calcium n'est à l'heure actuelle plus le matériau de choix pour une utilisation en contact direct avec le tissu pulpaire. En effet, bien que présentant de nombreuses propriétés biologiques intéressantes, l'hydroxyde de calcium présente une étanchéité et une adhésion réduite à la dentine. De plus, des travaux histologiques ont mis en évidence la formation d'une dentine tertiaire présentant des défauts et porosité, ce qui peut entraîner la recolonisation des bactéries, ainsi qu'une inflammation pulpaire prolongée en comparaison des matériaux plus récents à base de silicates de calcium (Nair et al. 2008 ; Tran

et al. 2012). Cependant il est important de garder à l'esprit que ce biomatériau, dans ses différentes formulations, demeure en général assez simple d'utilisation, peu cher et facilement disponible.

2. Les silicates de calcium

Au début des années 1990, le Mineral Trioxyde Aggregate (MTA) a été développé par Torabinejad à l'Université de Loma Linda aux États-Unis. Ce biomatériau, dérivé de la formulation du ciment de Portland de type I, a été initialement développé et autorisé en tant que biomatériau d'obturation rétrograde, et de soins de perforations sous la formulation commerciale ProRoot MTA® (Camilleri, 2008). Par la suite, au vu de ses excellentes propriétés présentées ci-après, et ayant fait l'objet de nombreuses études ses indications cliniques ont été étendues, Ainsi, le MTA a été proposé en tant que biomatériau de coiffage pulpaire direct et a été autorisé en 1998 par la Food and Drug Administration (FDA) dans cette indication, il fut ensuite disponible au niveau européen. Les principaux composants de la formulation initiale sont présentés dans la figure suivante (Fig.3).

Composant		Formulation chimique	Taux
Ciment de Portland	Silicate tricalcique	3CaO-SiO_2	75 %
	Silicate dicalcique	2CaO-SiO_2	
	Aluminate tricalcique	$3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$	
	Aluminoferri- tétracalcique	$4\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$	
	Oxyde de bismuth	Bi_2O_3	20 %
	Gypse (sulfate de calcium déshydraté)	$\text{CaSO}_4\text{-2H}_2\text{O}$	5 %

Figure 3: Principaux composant du Mineral Trioxyde Aggregate, d'après (Camilleri 2008).

Dans cette formulation, les silicates de calcium sont majoritaires, et ces derniers sont également responsables des principales propriétés physico-chimiques et biologiques du MTA et des formulations qui en ont été par la suite dérivées peuvent être groupées sous le terme de biomatériaux de coiffage pulpaire à base de silicates de calcium. En comparaison au ciment de Portland, l'ajout d'oxyde de bismuth assure la radio-opacité du biomatériau. Celle-ci est caractérisée comme importante, supérieure à la radio-opacité de la dentine, permettant au praticien la mise en place aisée du biomatériau et de vérifier son adaptation.

Au niveau physico-chimique et biologique, ce sont les potentiels bioactifs et la capacité d'étanchéité qui ont permis l'utilisation du biomatériau dans ses différentes indications cliniques. En effet il a été démontré des effets sur l'activité cellulaire, au niveau osseux, cémentaire et pulpaire, entraînant des phénomènes de néoformation/minéralisation tissulaires (Ford et al. 1996; Koh et al. 1997; Pitt Ford et al. 1995). L'étanchéité du biomatériau a été évaluée et suffisante pour ses indications initiales, et notamment consécutive à une faible expansion en milieu humide lors de sa prise (Mahmoud Torabinejad et al. 1995) et aux appositions minérales constatées à la surface du matériau (Bozeman, Lemon, et Eleazer 2006). Ces appositions minérales sont la conséquence d'interactions en présence de phosphates environnants, et la formation de structures phosphocalciques à la surface du biomatériau permet une infiltration des tissus dentinaires « en tag minéraux » (Kunert et Lukomska-Szymanska 2020).

Le MTA est un biomatériau hydrophile, dont la réaction de prise consiste, après mélange de particules de poudre et d'eau distillée, en une hydratation principalement due aux silicates de calcium, aboutissant à la formation d'hydroxyde de calcium. Sa dissociation ionique permet ainsi d'expliquer les propriétés remarquées lors de son développement, proches de celles présentées précédemment de l'hydroxyde de calcium en tant que biomatériau. Comme décrit précédemment, la libération d'ions hydroxydes entraîne une alcalinisation du milieu environnant consécutivement à la mise en place du MTA, avec un pH situé entre 10 et 11 après avoir réalisé le mélange initial et augmentant dans le temps pour présenter des valeurs voisines de celle de l'hydroxyde de calcium, qui est de l'ordre de 12,5 (Santos et al. 2005).

Au niveau mécanique, bien qu'augmentant avec le temps, de faibles propriétés mécaniques ont été mises en évidence. En effet la résistance à la compression se situe initialement à 40 MPa pour atteindre, au bout de 21 jours, des valeurs moyennes de 67 MPa. Ces faibles propriétés mécaniques nécessitent la protection du biomatériau par la réalisation d'une restauration définitive, et permettant à la dent traitée de retrouver sa fonction (Schönenberger Göhring, Lehnert, et Zehnder, s. d.). Enfin, le MTA présente une faible solubilité et devient insoluble dans l'eau après sa prise complète, on observe tout de même un maintien de son intégrité physique dans le temps après sa mise en place (Alex 2018).

Au niveau biologique, les études initialement menées lors du développement du MTA n'ont pas mis en évidence de caractère de mutagénicité ou de cytotoxicité. Le biomatériau a été comparé aux autres biomatériaux disponibles pour ses indications initiales, à savoir notamment le Super-EBA[®], IRM[®] ou l'amalgame (Kettering et Torabinejad 1995; M. Torabinejad et al. 1995), concluant en la biocompatibilité du biomatériau. Au niveau pulpaire, de très nombreuses

études ont mis en évidence des réponses cellulaires favorables consécutivement au contact avec le MTA (Moghaddame-Jafari et al. 2005; Takita et al. 2006). De plus des essais d'implantation osseuse (M. Torabinejad et al. 1998) et sous cutanée (Holland et al. 1999) ont permis de confirmer sa biocompatibilité. D'autre part, bien que présentant des résultats variables en fonction des études et des protocoles et germes étudiés, le MTA a été décrit comme présentant des propriétés antibactériennes et antifongiques, principalement dues à l'alcalinisation du milieu consécutive à la mise en place du biomatériau (Parirokh et Torabinejad 2010).

De plus, le MTA peut être qualifié de biomatériau « bioactif » puisque induisant des réponses tissulaires/cellulaires spécifiques, attestées largement au niveau scientifique. Il a notamment été démontré lors de coiffages pulpaire réalisés chez l'animal, la formation d'un pont dentinaire et peu de signes d'inflammation consécutivement à l'utilisation de MTA (Faraco Junior et Holland 2004; 2004; Ford et al. 1996). Plus récemment, des études par technique d'imagerie micro-CT montrent la formation d'une couche de dentine réparatrice homogène régulière à l'interface de la dentine et du matériau (Kunert et Lukomska-Szymanska 2020). Ces résultats sont retrouvés au niveau cellulaire ; une étude a par exemple démontré, consécutivement à la mise en place de MTA sur des tissus pulpaire animaux exposés, une augmentation de la prolifération de cellules pulpaire, de l'expression de marqueurs de différenciation Nestin et la mise en évidence d'une morphologie cellulaire de type *odontoblast-like*, suggérant le recrutement de cellules souches pulpaire et leur différenciation (Kuratate et al. 2008).

Des travaux ont également mis en évidence un potentiel anti-inflammatoire, avec la diminution de l'expression de certaines cytokines pro-inflammatoires au sein d'un tissu pulpaire de souris (Barbosa Silva, Vieira, et Sobrinho 2008). De plus, des études récentes ont mis en évidence une influence du placement de MTA au contact du tissu pulpaire, sur le phénotype de macrophages, de type anti-inflammatoires « M2 », indispensables à la régénération du complexe pulpo-dentinaire (Ito et al. 2014; Yoshida et al. 2020).

Ce biomatériau a largement été étudié au niveau biologique, mettant en évidence un caractère bioactif certain. Cependant, cliniquement, sa manipulation s'avère délicate, avec l'obtention d'un matériau de consistance « sableuse ». Le temps de prise des formulations classiques était en moyenne important, de l'ordre de 175 minutes, c'est pourquoi lors d'un coiffage pulpaire une réintervention est nécessaire afin de déposer la restauration provisoire et de permettre la réalisation d'une restauration coronaire définitive (Kaur et al. 2017). D'autre part, des phénomènes de dyschromies coronaires ont été reportés consécutivement à son utilisation.

Depuis le développement initial du MTA, de nombreuses formulations ont été mise sur le marché, notamment pour pallier les doléances des formulations initiales. Ainsi, par exemple, dans les années 2000, le ProRoot® MTA a été décliné dans sa formulation White (Fig. 4). Celle-ci a été développée pour notamment réduire les phénomènes de dyschromie consécutives à l'utilisation du biomatériau, ces derniers ayant été initialement reportés comme étant consécutifs à la présence de la phase ferrique dans la composition du biomatériau.

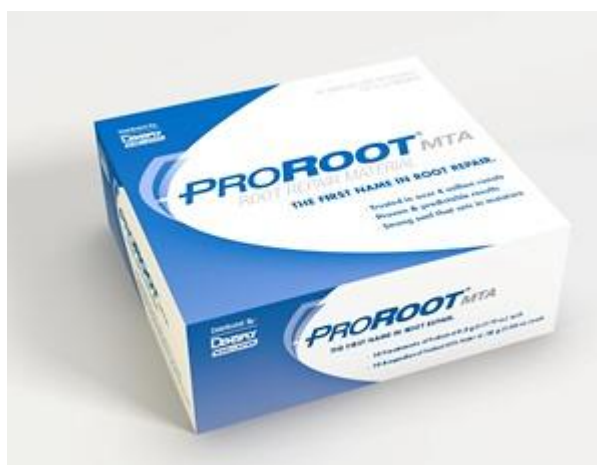


Figure 4: ProRoot® MTA White, d'après www.dentsplystore.com

En effet la phase alumino-ferrite tétracalcique est absente dans la formulation « White » (Camilleri et al. 2005). Cependant, des études ont mis en évidence d'autres cause de ces colorations inesthétiques, avec notamment l'influence du radio-opacifiant, l'oxyde de bismuth et les interactions possibles de ce dernier, aussi bien avec les tissus dentaires, le sang ou encore des solutions antiseptiques comme l'hypochlorite de sodium (Camilleri 2014; Guimarães et al. 2015; Marciano, Duarte, et Camilleri 2015).

D'autre part, de nombreux autres fabricants ont développé leur formulation de MTA dont certaines sont particulièrement notables. C'est le cas d'Angelus avec les formulations « Grey » ou « White » du MTA Angelus® (Fig. 5), se caractérisant par une réduction importante du temps de prise nécessaire au biomatériau. En effet, celui-ci a été réduit à un temps d'environ 15 minutes. Cette importante réduction est consécutive à une modification de la formulation initiale de base du MTA, à savoir l'absence de sulfate de calcium (Oliveira et al. 2007).



Figure 5: MTA Angelus® « white », d'après www.angelusdental.com

Globalement, au niveau physico-chimique et biologique, ces formulations présentent des propriétés comparables (Parirokh et Torabinejad 2010). Cependant, cliniquement, leur mise en œuvre consiste également en des présentations poudre/liquide, souvent délicate et, d'autre part, des propriétés mécaniques comparables aux formulations initiales, avec des résistances en compression relativement faibles (Butt et al. 2014).

Ainsi, au-delà de la mise sur le marché des formulations présentées ci-dessus, et possédant des spécificités visant à améliorer les propriétés de la formulation initiale du MTA, d'autres évolutions notables sont à noter. En premier lieu, le développement du biomatériau Biodentine™ (Septodont). Il a été commercialisé relativement récemment, en 2009, comme étant un biomatériau « bioactif ». Ce dernier a été formulé directement à base de silicates de calcium, avec des additifs spécifiques visant à améliorer ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et d'utilisation.

Ce biomatériau se présente sous la forme d'un conditionnement poudre/liquide (Fig. 6). La poudre se situe dans une capsule et le liquide dans un flacon. Le mélange de la poudre et du liquide peut se faire à l'aide d'un amalgameur pendant 30 secondes.



Figure 6: Conditionnement du Biodentine™, d'après <https://www.septodont.fr>.

Au niveau de sa composition, la poudre est composée majoritairement de silicate de calcium de type tricalciques purifiés, ainsi que de carbonate de calcium (charges) et d'oxyde de zirconium (radio-opacifiant). Le liquide est une solution aqueuse contenant du chlorure de calcium (accélérateur) et d'un polymère hydrosoluble (agent réducteur d'eau).

La réaction de prise du Biodentine™ va se réaliser par l'hydratation des silicates tricalciques présent dans la poudre et résulter en différentes réactions chimiques de dissolution et de précipitation, lorsque le silicate tricalcique rentre en contact avec la solution aqueuse. En effet, tout comme les formulations dérivées du ciment de Portland, cette réaction va aboutir en une phase peu soluble, de type silicate de calcium hydraté C-S-H. Les évolutions notables sont représentées par l'agent réducteur d'eau et la granulométrie de la poudre qui va entraîner une porosité diminuée. De plus, la présence d'un accélérateur de prise, mais aussi la granulométrie très faible des particules de silicates de calcium, permettent au biomatériau de présenter des valeurs de temps de travail de l'ordre de 6 minutes et un temps de prise de 12 minutes, ce qui est relativement court pour ce type de biomatériau.

D'autre part, c'est au niveau des propriétés mécaniques que ce biomatériau se distingue. En effet, la résistance à la compression s'avère rapidement suffisante pour supporter soit la mise en place d'une obturation définitive, soit sa mise en place en tant qu'obturation provisoire (en l'absence d'une surcharge occlusale anormale). Dès la fin de la prise, la valeur de la résistance à la compression augmente très rapidement pour atteindre une valeur moyenne de 130 MPa au

bout d'une heure et de 240 MPa au bout de 24 heures. Au bout de 7 jours, la résistance à la compression est suffisante, tout comme la résistance en flexion et la micro-dureté, pour permettre tous les traitements préparatoires avant la mise en place d'une obturation définitive directe ou indirecte (Koubi et al. 2011). Cette résistance s'améliore ensuite continuellement jusqu'à atteindre au bout de quelques jours une valeur de 300 MPa, valeur comparable à la résistance à la compression de la dentine qui est d'environ 297 MPa (Kaur et al. 2017). De plus, lors de la mise en place de Biodentine™ sur le tissu dentinaire, il a été démontré qu'une précipitation de cristaux de silicate de calcium se met en place dans les canalicules dentinaires. Cette caractéristique et la stabilité dimensionnelle du matériau lors de sa prise contribuent à l'excellente capacité d'étanchéité du matériau observé au niveau de la dentine. Cette capacité d'étanchéité a été évaluée en comparaison de nombreux autres biomatériaux de restauration (Raskin et al. 2012). Ces propriétés importantes permettent au biomatériau Biodentine™ d'être utilisé temporairement comme matériau de restauration jusqu'à 6 mois. Enfin, le radio-opacifiant utilisé (oxyde de zirconium), et l'absence des autres phases de la formulation du ciment de Portland, contribuent à la limitation d'apparition de dyschromies, possiblement retrouvées en fonction des formulations dérivées du MTA. Il est cependant à noter qu'en comparaison aux autres formulations, cette radio-opacité est cliniquement plus faible.

Au niveau biologique, de très nombreuses études ont été réalisées, démontrant d'une part une absence de mutagénicité et de toxicité cellulaire sur des nombreuses populations cibles (Giraud et al. 2018; Laurent et al. 2008) tout en présentant une activité antibactérienne liée à l'alcalinisation du milieu, avec des valeurs de pH importantes (Kunert et Lukomska-Szymanska 2020). D'autre part, il a été prouvé la bioactivité de ce biomatériau au contact des cellules/tissus pulpaire. En effet, incubés en présence d'extraits de Biodentine™, les fibroblastes pulpaire secrètent une matrice qui va se minéraliser progressivement sous forme de nodules exprimant le collagène I, la dentinsialoprotéine et la nestine, marqueurs de différenciation de la dentine et des odontoblastes, sans incidence sur l'expression phénotypique des fibroblastes pulpaire (Laurent et al. 2008). Des études sur l'évaluation d'autres étapes importantes de régénération *in vitro* au niveau cellulaire, telles que la prolifération des fibroblastes, la migration de cellules souches pulpaire, ou encore sur la séquence de recrutement des cellules inflammatoires ont permis de démontrer le potentiel important de ce biomatériau (Giraud et al. 2017; 2018). De plus, le traitement d'exposition pulpaire sur dents extraites cultivées *ex vivo* a confirmé ces propriétés bioactives, avec notamment au niveau histologique, un tissu pulpaire d'aspect

physiologique et des nodules de minéralisation au contact du biomatériau Biodentine™ (Jeanneau et al. 2017).

Ainsi, en matière de coiffage pulpaire direct, le Biodentine™ présente de nombreux avantages et représente un biomatériau très intéressant dans cette indication au contact de la pulpe exposée, dont les propriétés bioactives sont similaires aux formulations initiales du MTA (Kaur et al. 2017). D'autre part, en plus de la possibilité de la réalisation d'un coiffage pulpaire direct en une seule séance, ce biomatériau permet la réalisation d'une restauration transitoire efficace.

Une autre évolution notable a été le développement de matériaux à base de silicates de calcium, injectable et photopolymérisable pour faciliter leur utilisation clinique. Pour exemple, au début des années 2000, les chimistes Dr Byoung Suh, Dr Rui Yin et David Martin, ainsi que le dentiste et chercheur Dr Mark Cannon, ont débuté le développement d'un biomatériau contenant des silicates de calcium (sous forme de ciment de Portland), modifié par ajout d'une phase organique photopolymérisable. Ainsi, en 2010, le biomatériau TheraCal LC® (BISICO) a été introduit sur le marché et commercialisé en tant que « silicate de calcium modifié par résine photopolymérisable ». La feuille de brevet d'origine datée de 2011 indique que le TheraCal LC® présente la composition chimique suivante (Fig. 7).

Composant	Taux
Ciment de Portland (type III)	20-60 %
Bis-GMA	5-20 %
Diméthacrylate de polyéthylène glycol (PEGDMA)	10-50%
Zirconate de baryum	1-10 %
Silice fumée	

Figure 7: Composition du TheraCal LC® d'après (Arandi et Rabi 2018)

Le biomatériau TheraCal LC® se présente sous la forme d'une seringue contenant une pâte de couleur blanchâtre (Fig. 8), conçu pour être placé en couche mince, par incrément de 1 mm et photopolymérisé pendant 20 secondes.



Figure 8: Conditionnement du TheraCal LC[®], d'après <https://www.bisico.fr/>

Le TheraCal LC[®] est considéré comme un ciment hydrophile, sa réaction de prise est dépendante de la polymérisation du composant résine et d'une réaction de type hydratation pour la prise du silicate de calcium (ciment de portland). C'est pourquoi les indications du fabricant sont de placer le matériau sur une dentine humide. Il a été démontré que le TheraCal LC[®] libère des ions calciums mais n'entraîne que peu la formation d'hydroxyde de calcium contrairement aux biomatériaux cités précédemment (Alex 2018). De même pour l'alcalinisation du milieu qui est, bien que présente, est en général plus faible, avec par exemple des valeurs de pH supérieures à 10 au bout de 3 heures et légèrement inférieure au bout de 24 heures (Arandi et Rabi 2018). Par ailleurs, le zirconate de baryum présent dans la composition du TheraCal LC[®] permet au matériau une radio-opacité équivalente à une épaisseur de 3mm d'aluminium (Gandolfi, Siboni, et Prati 2012). Au niveau de l'étanchéité, le TheraCal LC[®] a montré une capacité supérieure aux formulations de MTA et Biodentine[™] (Kunert et Lukomska-Szymanska 2020).

Au niveau biologique, le matériau présente des propriétés anti-bactériennes liées à l'augmentation de pH. Cependant des résultats contradictoires sont retrouvés en ce qui concerne les conséquences de l'utilisation du matériau en contact direct avec les tissus pulpaire. Alors qu'une étude initiale *in vivo* chez l'animal a démontré des réponses pulpaires favorables consécutivement à l'utilisation en tant que biomatériau de coiffage pulpaire (Cannon et al. 2014), d'autres travaux ont mis en évidence des résultats différents. En effet, il a été montré lors de coiffage pulpaire chez l'animal des réponses pulpaires moins favorables, avec notamment des minéralisations pulpaires de moindre qualité ainsi que la présence d'inflammation tissulaire en comparaison à des formulations de MTA (Lee et al. 2015). Ces résultats sont confirmés *in vitro* par des études au niveau cellulaires et lors de manœuvre de coiffage pulpaire sur dents cultivées *ex vivo*, démontrant que le matériau affecte certaines étapes importantes de régénération tissulaire, et met en évidence histologiquement des réponses tissulaires plus défavorables pour des dents traitées avec le TheraCal LC[®], en comparaison du

Biodentine™ (Giraud et al. 2018; Jeanneau et al. 2017). Ces résultats moins favorables, notamment en comparaison à des formulations à base de silicates de calcium plus conventionnelles décrites précédemment peuvent être dues à une réaction d'hydratation incomplète du TheraCal LC®, de la fraction minérale du matériau (Camilleri, Laurent, et About 2014). Par ailleurs il est à noter que des études sur le matériau ont rapportés qu'il ne présente pas de Bis-GMA dans sa fraction organique, bien que ce dernier soit répertorié dans la fiche de sécurité (Nilsen et al. 2017). Ainsi, d'une manière générale, des études supplémentaires sont nécessaires pour permettre une utilisation dans le cadre d'un coiffage pulpaire direct (Morotomi, Washio, et Kitamura 2019), cependant une utilisation aisée et rapide n'est pas contre-indiquée dans le cadre de coiffages pulpaires indirects (Jeanneau et al. 2017).

III. Protocole et suivi clinique

La possibilité de la mise en place d'une thérapeutique de coiffage pulpaire direct doit être établie en fonction des indications présentées précédemment.

Le protocole clinique et le suivi à mettre en place présenté ci-dessous a été rédigé en fonction des recommandations des principales sociétés savantes concernées (Bourguignon et al. 2020) (Duncan et al. 2019)(Levin et al. 2020)(American Association of Endodontists (AAE) 2016)(American Academy of Pediatric Dentistry 2019)

1. Protocole clinique

Anamnèse, interrogatoire et historique dentaire

Comme pour toute thérapeutique, ces éléments sont indispensables afin d'une part d'établir un pré-diagnostic à l'aide des signes subjectifs décrits par le patient et d'autre part pour le recueil des informations médicales du patient afin de permettre de poser l'indication possible de l'acte.

Examen clinique et tests physiques

L'examen clinique va confirmer ou infirmer le pré-diagnostic à l'aide de signes objectifs mis en évidence par le praticien. Dans le cadre du coiffage pulpaire direct, le principal objectif est d'établir le statut pulpaire de la dent. Ainsi les tests de sensibilité sont à privilégier à savoir les tests thermiques (froid, chaud) et électrique. L'examen clinique permet également d'évaluer

la conservabilité de la dent, les moyens de restauration possibles de la dent concernée et d'écarter des signes contre-indiquant le coiffage pulpaire, tel que la présence de signes péri-apicaux. L'ensemble de ces éléments doit confirmer l'indication thérapeutique d'un coiffage pulpaire direct.

Examens complémentaires

Radiographie type « bitewing » et rétro-alvéolaire avec un angulateur de Rinn pour limiter les déformations. Ces examens sont indispensables et permettent notamment en cas de lésion carieuse d'évaluer l'étendue de celle-ci, le volume de la chambre pulpaire et de contrôler l'absence de lésions péri-apicales.

Ils permettent également dans le cas de dents immatures, notamment dans le cadre de lésions traumatiques, d'évaluer l'édification radiculaire de la dent concernée. Enfin ces examens auront une importance dans le suivi clinique également au niveau médico-légal dans le cadre d'un traumatisme.

Anesthésie

Le coiffage pulpaire direct étant un acte s'effectuant sur dent vitale, il est donc nécessaire d'anesthésier le patient pour son confort. En fonction de la dent concernée et de l'état de santé du patient, une anesthésie loco-régionale et/ou para-apicale sera réalisée.

Mise en place du champ opératoire

La pose du champ opératoire doit être considérée comme une étape à part entière du traitement, il va nous permettre d'éviter toute contamination bactérienne, le recours à de la digue liquide peut être indiqué pour parfaire l'isolation (Fig. 9).

Dans le cadre de la gestion d'une lésion carieuse, son absence lors d'une effraction peut contre-indiquer l'acte de coiffage pulpaire.



Figure 9: Exemple de mise en place de digue dentaire et digue photo-polymérisable dans le cadre de la gestion d'une effraction pulpaire (flèche) consécutif à une éviction de tissu carieux (Pr Hervé Tassery).

Mise en forme de la cavité, curetage des tissus carieux

Dans le cas de la gestion de lésions carieuses, le curetage sélectif est aujourd'hui à privilégier en comparaison au curetage total.

L'élimination des éventuelles restaurations présente va précéder le curetage des tissus carieux. L'éviction des tissus atteints doit s'effectuer de manière centripète afin de limiter le risque d'effraction pulpaire et de réduire la quantité de tissus contaminés en cas d'exposition pulpaire consécutive à l'éviction. D'autre part, ce type de curetage permet l'obtention sur toutes les limites de la cavité de tissus amélaire et dentinaires sains, qui permettront par la réalisation d'une restauration définitive, d'assurer l'étanchéité de l'ensemble (Fig. 10). De plus, les tissus contaminés sont éliminés à l'aide d'instruments stériles de type excavateurs manuels et/ou à l'aide d'une fraise en carbure de tungstène stérile montée sur un contre angle à basse vitesse (bleu) et sous irrigation. En l'absence d'effraction, une thérapeutique de coiffage pulpaire indirect est à envisager si celui-ci est indiqué.



Figure 10 : Exemple de cavité après curetage sélectif d'une lésion carieuse , d'après (Falk Schwendicke 2018).

Contrôle de l'hémostase, désinfection cavitaire

L'obtention d'une hémostase est essentielle au succès de tout traitement de coiffage pulpaire, quel que soit le choix du matériau de coiffage. Cette étape per-opératoire peut influencer la poursuite du soin. En effet, si l'hémostase n'est pas contrôlée, après plusieurs minutes, le traitement par coiffage pulpaire ne pourra pas être envisagé, la poursuite d'un saignement important pouvant signifier une inflammation pulpaire trop importante. Dans ce cas, le traitement endodontique peut être à indiquer mais dans les recommandations récentes, la possibilité de réaliser des traitements de conservation de la vitalité pulpaire avec une exérèse étendue de la pulpe camérale est possible (pulpotomie partielle, pulpotomie thérapeutique).

Cliniquement, l'application avec une légère pression d'une boulette de coton stérile sèche, imbibée d'eau stérile ou légèrement imbibée d'un matériau hémostatique au contact de l'exposition pulpaire. L'application d'hypochlorite de sodium (0,5 à 5%) ou de chlorhexidine (0,2 à 2%) est à privilégier dans le cas d'une exposition consécutive à une lésion carieuse étendue. Consécutivement à cette étape de désinfection, un rinçage au sérum physiologique est réalisé, puis la cavité est séchée à l'aide d'une boulette de coton stérile.



Figure 11 : Exemple de cavité après hémostase et désinfection, d'une effraction pulpaire consécutive à une carie seconde sous une restauration mésio-occluso-distale (Pr Hervé Tassery).

Choix, préparation et application du matériau de coiffage pulpaire

Comme décrit précédemment, actuellement l'utilisation d'un biomatériau de type silicate de calcium est à privilégier en comparaison de l'hydroxyde de calcium lors d'une exposition pulpaire. Pour autant, l'hydroxyde de calcium, tout comme les silicates de calcium, est également préconisé dans les recommandations de l'IADT et de l'AADP.

Une fois le biomatériau de coiffage pulpaire direct choisi, celui-ci est préparé selon les recommandations du fabricant, puis est placé directement au contact du tissu pulpaire et sur la dentine environnante en préservant des tissus amélo-dentinaires sains (Fig. 12). En fonction du matériau, celui-ci peut être protégé temporairement avant la réalisation d'une restauration définitive.

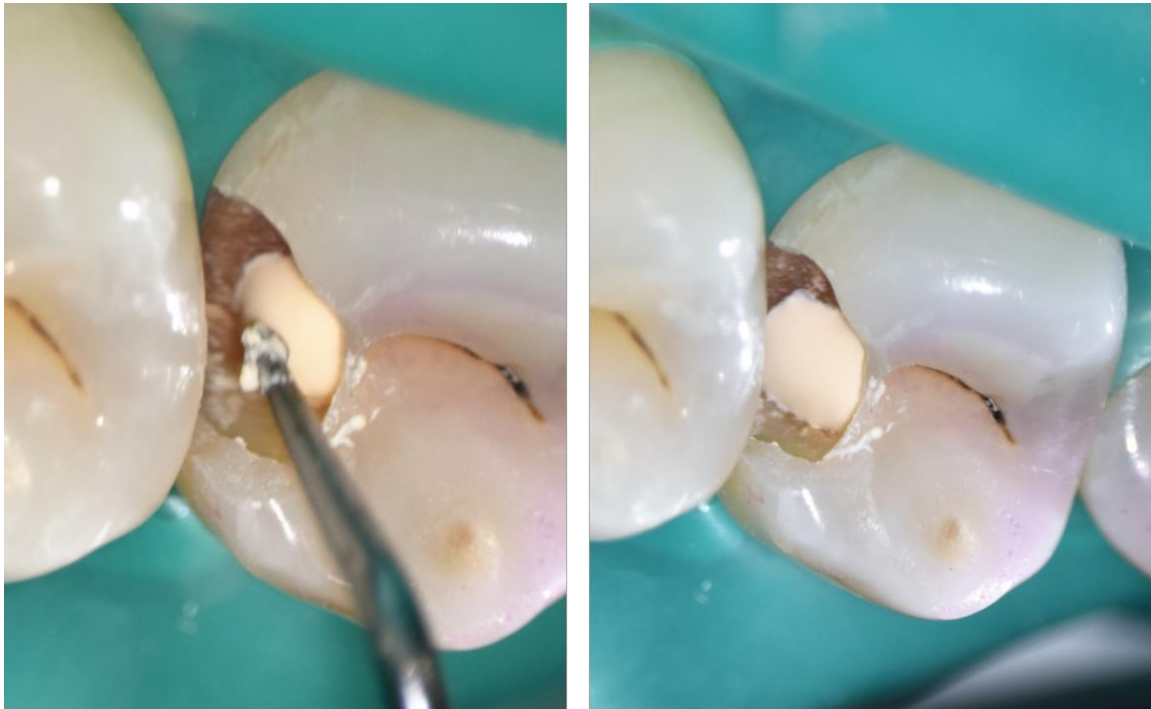


Figure 12 : Exemple de mise en place d'un biomatériau de coiffage pulpaire Biodentine™ en préservant des tissus environnants sains (Pr Hervé Tassery).

En effet, une restauration coronaire étanche sus-jacente adaptée doit être mise en place pour empêcher une infiltration bactérienne, et prévenir toute infection (Fig. 13).



Figure 13 : Exemple de la réalisation d'une restauration définitive sus-jacente à l'aide d'une résine composite (X-Tra Fil bulk, Voco) (Pr Hervé Tassery).

Le choix du biomatériau peut être également influencé par la situation clinique et notamment le risque de dyschromies dentaires en fonction des formulations disponibles. L'utilisation d'un biomatériau Biodentine™ peut permettre de réaliser en un temps une restauration coronaire étanche pendant plusieurs semaines (Fig. 14).



Figure 14 : Exemple de mise en place d'un biomatériau de coiffage pulpaire Biodentine™ permettant une utilisation en tant que restauration temporaire (Pr Hervé Tassery).

2. Suivi clinique

Les critères de succès du coiffage pulpaire direct sont déterminés lors des contrôles post-opératoires. Ainsi, la mise en place d'un suivi clinique régulier par l'intermédiaire de l'examen clinique et d'examens complémentaires radiographiques, est primordiale. Les patients sont en général revus à 6-8 semaines, 6 mois puis 1 an pour évaluer les paramètres suivants ;

Au niveau clinique :

- Absence de signes cliniques,
- Réponses aux tests de sensibilité positives,
- Absence de douleurs à la percussion, à la palpation.

Au niveau radiologique (à 6 mois et 1 an) :

- Absence de lésions péri-apicale, d'épaississement ligamentaire, de signes de résorption ou tout autre processus pathologique.
- Élaboration d'un pont dentinaire,

- Poursuite de l'élaboration radiculaire (pour les dents immatures),
- Intégrité et étanchéité de la restauration coronaire.

Dans certaines situations, comme dans le cadre d'un coiffage pulpaire consécutif à une lésion traumatique par exemple, certains éléments cliniques (luxations ou suspicion de luxations associées) peuvent nécessiter un suivi prolongé, ceci reste également à la discrétion du praticien.

IV. Pronostic

Des études cliniques réalisées permettent d'évaluer le pronostic du traitement par coiffage pulpaire direct. Celles-ci sont souvent réalisées dans le but d'évaluer l'influence des facteurs liés au protocole clinique en lui-même (biomatériaux utilisés par exemple) ou liés à la situation clinique (âge des patients par exemple), mais permettent également d'évaluer le pronostic de l'acte thérapeutique. Des études cliniques prospectives ont été réalisées, dont certaines associent à l'acte de soin une analyse histologique. Des études cliniques rétrospectives ont également été menées permettant une analyse sur un suivi en général plus long.

Une première étude clinique réalisée par Nowicka et al, a été menée sur 28 troisièmes molaires maxillaires et mandibulaires humaines saines dont l'extraction pour raison orthodontiques été indiquée, chez des jeunes patients âgés de 19 à 28 ans. La vitalité pulpaire a été vérifiée par tests thermique et électrique. Les dents ont été réparties dans 3 groupes expérimentaux, avec un groupe Biodentine™ (n=11), un groupe du ProRoot® White MTA (n=11) et un groupe contrôle témoin (n=6) (Nowicka et al. 2013). Dans les deux groupes des biomatériaux, les pulpes dentaires ont été exposées à l'aide d'instruments rotatifs stériles et une thérapeutique de coiffage pulpaire direct a été réalisée, sous champ opératoire, et une mise en place des biomatériaux selon les recommandations des fabricants. Après 7 jours, un examen clinique et une restauration composite définitive ont été réalisés. Concernant le groupe témoin, des dents intactes ont été sélectionnées et n'ont reçu aucune exposition ni coiffage pulpaire. Après 6 semaines de traitement, des tests de sensibilité ont été effectués pour évaluer la santé de la pulpe, puis les dents ont été extraites de la manière la plus atraumatique possible afin de réaliser des analyses histologiques en aveugle.

Consécutivement à l'acte de soin, seulement 7 patients ont décrit des signes de douleurs mineures, et sur l'ensemble de la période de traitement, aucun patient n'a décrit de douleurs ou

d'autres signes cliniques. Cliniquement et radiologiquement, l'ensemble des dents traitées se sont avérées être vitales et ne montraient pas de signes péri-apicaux. Concernant les critères d'évaluation histologique, l'enquête a montré qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les réponses consécutives à l'utilisation du biomatériau Biodentine™ ou ProRoot® White MTA, en tant qu'agent de coiffage pulpaire ($P > 0,05$). Un pont dentinaire a été formé directement sous les matériaux de recouvrement sur le site de la lésion avec les deux biomatériaux. Le nombre de patient reste cependant assez faible et le temps de traitement assez court (6 semaines). D'autre part il est important de noter que ces dents ne présentaient pas initialement de pathologies traumatiques ou de lésions carieuses (Nowicka et al. 2013).

Dans une étude clinique randomisée, en simple aveugle, réalisée sur 40 prémolaires humaines saines dont l'extraction était indiquée pour des raisons orthodontiques, chez des patients âgés de 15 à 25 ans, Jalan et al ont évalué le biomatériau de coiffage pulpaire Biodentine™ en comparaison d'un hydroxyde de calcium (Jalan, Warhadpande, et Dakshindas 2017). Les dents à traiter ont été réparties au hasard en deux groupes de 20 avec un groupe pour lequel un hydroxyde de calcium (Dycal®) a été utilisé et un autre groupe avec Biodentine™, en tant que biomatériaux de coiffage pulpaire direct. Un examen clinique et radiologique a permis de vérifier le statut pulpaire de la dent, et l'absence de pathologies pulpaires et/ou péri-apicales. Les effractions pulpaires ont été réalisées sous champ opératoire, à l'aide d'instruments rotatifs stériles, et le soin a été réalisé après obtention de l'hémostase pulpaire. Consécutivement, un ciment verre-ionomère modifié par adjonction de résine a été placé, suivi d'une restauration finale avec une résine composite. Après 45 jours, des tests de sensibilité ont été effectués pour évaluer la santé pulpaire, et les dents ont été extraites de la manière la plus atraumatique possible et une analyse histologique a été ensuite réalisée (Jalan, Warhadpande, et Dakshindas 2017).

Une inflammation pulpaire légère à sévère a été mise en évidence dans le cas de plusieurs échantillons du groupe hydroxyde de calcium alors qu'il n'y avait aucun signe d'inflammation, d'abcès ou de nécrose sous le pont dentinaire dans les échantillons du groupe Biodentine™. Une formation complète de pont dentinaire a été observée dans 16 (80%) échantillons de Biodentine™ et 4 (20%) échantillons d'hydroxyde de calcium, et les épaisseurs moyennes du pont dentinaire dans les groupes Biodentine™ et hydroxyde de calcium étaient respectivement de 0,58 et 0,17mm. Ainsi, les résultats de cette étude démontrent un pont dentinaire significativement plus épais et plus continu dans les échantillons Biodentine™ avec une absence de cellules inflammatoires dans la pulpe par rapport au matériau à base d'hydroxyde de calcium. Cependant, dans cette étude, le nombre de patient était très réduit,

puisque plusieurs soins ont été réalisés chez des même patients, et les temps de traitement étaient courts. D'autre part, les dents sélectionnées ne présentaient pas de lésions carieuses. Ce travail met tout de même en évidence que le biomatériau Biodentine™ est un agent de coiffage pulpaire intéressant présentant le potentiel d'apporter des contributions majeures au maintien de la vitalité pulpaire chez des patients judicieusement sélectionnés pour un coiffage pulpaire direct (Jalan, Warhadpande, et Dakshindas 2017).

Brizuela et al ont réalisé une étude clinique randomisée, en aveugle, incluant 169 patients (87 femmes et 82 hommes) âgés de 7 à 16 ans (moyenne 11,3 années) et présentant une lésion carieuse sur une molaire permanente avec une édification radiculaire complète ou incomplète, et une vitalité pulpaire compatible avec une pulpe saine ou inflammatoire de type pulpite réversible, déterminée à l'aide de test thermique (froid) et électrique (Brizuela et al. 2017). Les principaux critères d'exclusions sont d'ordre général (état de santé incompatible), locales cliniques et radiologiques (conservation impossible de la dent, signes de pathologies pulpaires, de résorptions) et per-opératoire (impossibilité de contrôle de l'hémostase). L'éviction carieuse a été réalisée par curetage total à l'aide d'instruments manuels et rotatifs stériles, sous champ opératoires, conduisant à des expositions pulpaires inférieures à 2mm, par 5 opérateurs indépendants. Après exposition, les patients ont été répartis aléatoirement dans l'un des 3 groupes expérimentaux en vue de réaliser un coiffage pulpaire direct à l'aide d'hydroxyde de calcium ou de silicates de calcium (Biodentine™ ou ProRoot® MTA). Des examens de suivi clinique ont été effectués à 1 semaine, 3 mois, 6 mois et 1 an, lors de ces deux derniers temps de suivi, un examen radiographique a été également réalisé. Le succès clinique est défini dans l'étude par l'intermédiaire de l'examen clinique et radiologique avec notamment une réponse normale aux tests de sensibilité et une absence de signes cliniques et radiologiques de pathologies pulpaires ou péri-apicales.

L'étude conclue en l'absence de différence statistiquement significative entre les groupes (biomatériaux) étudiés pour les procédures de coiffage pulpaire direct avec des taux de réussite très élevés au cours d'une période de suivi d'un an, avec notamment un taux de 100% pour le matériau Biodentine™. Cependant, cette étude présente un temps de suivi court (1an) et une perte de suivi importante est à noter pour chacun des trois groupes, aux alentours de 40% (Brizuela et al. 2017).

Katge et Patil ont réalisé une étude clinique randomisée en simple aveugle portant sur 20 patients âgés de 7 à 9 ans (14 garçons et 7 filles), qui présentaient une atteinte carieuse bilatérale au niveau des premières molaires permanentes maxillaires ou mandibulaires (Katge et Patil 2017). Les principaux critères d'exclusion portaient sur des signes cliniques évoquant des symptômes pulpaire irréversibles, et des signes radiographiques évoquant des pathologies de types péri-apicales ou de résorptions. La procédure de coiffage pulpaire direct a été attribuée au hasard à la moitié de la dentition de chaque patient, divisée par le plan sagittal médian, avec d'un côté l'utilisation de Biodentine™ et de l'autre le MTA Angelus. Celle-ci a été réalisée sous champ opératoire, exposition lors de curetage total à l'aide d'instruments stériles et contrôle de l'hémostase.

Des examens de suivi clinique et radiographique ont été effectués à 6 puis 12 mois et ont rapportés un taux de réussite de 100% avec le Biodentine™ et le MTA Angelus. Ce succès clinique a été établi par l'absence de signes cliniques et radiographiques, ainsi qu'un statut pulpaire sain. Concernant l'évaluation radiographique, l'enquête a montré qu'après une période de suivi de 12 mois, 95,24% des dents du groupe Biodentine™ (20 sur 21) et 85,71% des dents du groupe MTA (18 sur 21) ont montré la formation d'un pont dentinaire. Cette étude met en évidence un taux de succès très élevés pour les deux biomatériaux à base de silicates de calcium, aussi bien au niveau clinique que radiologique, chez des patients très jeunes, présentant des expositions consécutives à un curetage de lésions carieuses.

Le nombre de patient est cependant faible et il est à noter que le suivi n'a pu être effectué sur 8 patients sur 29 et reste faible (12 mois) (Katge et Patil 2017).

Dammaschke et al ont étudié rétrospectivement la thérapeutique de coiffage pulpaire direct, sur près de 2000 procédures, 186 patients correspondants à 248 cas cliniques (Dammaschke, Leidinger, et Schäfer 2010). Ces actes étaient consécutifs à des manœuvres iatrogènes ou à des évictions par curetage total de lésions carieuses, en excluant les syndromes irréversibles et les lésions traumatiques, et ont été réalisés par des praticiens ou des étudiants. Lors de l'analyse, les dents ont été catégorisées comme présentant une évolution favorable à condition de présenter une vitalité pulpaire, sans douleurs locales ou générales ni gonflement, à l'inverse, une évolution défavorable dans le cas de douleurs, signes péri-apicaux ou lorsque la dent avait été extraite ou traitée endodontiquement. Le suivi moyen était de 6,1 années.

Les résultats mettent en évidence des taux de succès globaux assez élevés aux alentours de 80%, diminuant peu pour les temps de suivi plus longs. Cependant il est à noter que le taux de rappel est faible, pouvant majorer les résultats et que l'ensemble des actes

analysés ont été réalisés à l'aide d'hydroxyde de calcium (Calxyl rot) (Dammaschke, Leidinger, et Schäfer 2010).

Une étude de Willershausen et al, rétrospective sur plus de 1000 patients, a permis d'évaluer le succès clinique d'une thérapeutique de coiffage pulpaire direct à l'aide d'hydroxyde de calcium, et ce jusqu'à 9 années de suivi (Willershausen et al. 2011). Les cas sélectionnés reposent sur des expositions pulpaires consécutives à un curetage carieux, une lésion traumatique ou lors de la réalisation d'un soin restaurateur. Les soins de coiffage étaient réalisés par des étudiants ou des dentistes, après une exposition pulpaire de taille limitée, sous champ opératoire et après obtention de l'hémostase. Consécutivement, différents matériaux de restaurations étaient utilisés pour réaliser l'obturation coronaire définitive. Les principaux critères d'exclusion étaient de l'ordre de données insuffisantes, d'une impossibilité de suivi du patient (déménagement, décès) ou de syndromes pulpaires incompatibles (états irréversibles). Le suivi a été réalisé à trois mois puis annuellement par l'intermédiaire d'un examen clinique et radiologique (Willershausen et al. 2011).

Cette étude met en évidence des taux de succès importants, mais diminuant avec le temps puisque passant de 80,1% à 1 an, à 58,7% au bout de 9 ans. Cependant bien que ce choix soit justifié par les auteurs, les soins ont été réalisés à l'aide d'hydroxyde de calcium. Par ailleurs tout comme l'étude précédente (Dammaschke, Leidinger, et Schäfer 2010), cette étude conclut sur l'importance du pronostic de nombreux autres facteurs tels que la bonne indication de cet acte clinique, l'étendue de la lésion ou encore le choix du matériau de restauration sus-jacent (Willershausen et al. 2011).

Ces nombreux facteurs, tout comme le choix du matériau de restauration sont sujets à de nombreux travaux, par exemple Mente et al ont évalué l'influence du matériau (MTA ou hydroxyde de calcium) sur des soins de coiffages pulpaires directs, ainsi que l'influence du temps de placement consécutif au soin, du matériau de restauration définitif (Mente et al. 2014). Cette étude, réalisée sur 229 dents, et avec un suivi moyen de 42 mois (jusqu'à 10 ans), met en évidence une supériorité du matériau MTA en comparaison de l'hydroxyde de calcium avec des succès cliniques globaux respectifs de 80,5% et 59% (Mente et al. 2014). Les auteurs concluent également sur l'importance de réaliser une restauration définitive rapide.

Une étude rétrospective de Cho et al a été menée sur 175 patients, présentant des statuts pulpaire de type inflammatoire réversible, sans sensibilité à la percussion ni d'antécédent de douleurs spontanées. Les dents devaient être possibles à isoler à l'aide d'un champ opératoire, et lors de l'effraction, l'hémostase devait être obtenue. Les effractions pulpaire ont été traitées à l'aide de ProRoot® White MTA ou d'hydroxyde de calcium (Dycal®) et des restaurations provisoires puis définitives ont été réalisées (Cho et al. 2013).

Le suivi des patients a été effectué à 1, 3, et 6 mois puis tous les 6 mois. En plus d'un examen clinique, un examen radiographique a été réalisé à 3 et 6 mois puis tous les 6 mois. Les critères retenus d'échec lors de l'analyse étaient la réalisation d'un traitement endodontique, une pulpe nécrosée ou vitale mais présentant pour le patient des douleurs spontanées. Le suivi moyen est de 13,7 mois avec des suivis étendus à 4 ans au maximum.

Les résultats montrent un succès clinique à 1 an pour le MTA de 89.9% et de 67.4% à 3 ans contre 73.9% et 52.5% respectivement pour le matériau à base d'hydroxyde de calcium (Cho et al. 2013).

Ces études précédemment détaillées permettent de mettre en évidence des résultats qui, bien que souvent relativement élevés pour des temps courts de suivi, restent assez variables et semblent diminuer de manière importante avec le temps. Il est évident que bien que toutes ces études présentent des méthodologies plus ou moins fortes, comme évoqués dans l'ensemble des études, de nombreux facteurs entrent en jeu dans le pronostic du traitement par coiffage pulpaire direct. Très récemment une revue systématique réalisée par Cushley et al a évalué l'influence du biomatériau de coiffage pulpaire sur le pronostic d'effraction sur dents matures consécutivement au curetage de lésions carieuses. Cette étude conclue, tout en insistant sur le faible niveau de preuve de plusieurs études, que les biomatériaux à base de silicates de calcium MTA/Biodentine™ présentent à 1 an et 2-3 ans, des taux de succès supérieurs à l'hydroxyde de calcium (S. Cushley et al. 2020).

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La mise en place d'une thérapeutique de type coiffage pulpaire direct implique la mise en place d'un matériau dentaire directement sur une pulpe vitale exposée de manière physique principalement consécutivement à une lésion traumatique ou carieuse, reposant sur un diagnostic pulpaire qualifiable de sain ou d'inflammatoire de type « réversible ». Un tel diagnostic repose cependant sur des outils diagnostiques bruts qui ne représentent pas avec précision le véritable état physio-pathologique de la pulpe, sans qu'il existe non plus de réelle frontière entre les différents stades possible d'inflammation pulpaires décrits.

Les principales études disponibles ont évalué le coiffage pulpaire direct majoritairement dans le cadre de lésion carieuse et très souvent lors de curetage total, ce qui n'est plus la recommandation actuelle, minimisant aujourd'hui l'incidence des coiffages pulpaires directs, du moins dans un contexte carieux. Bien que variables, les résultats présentés restent globalement élevés mais souvent sur des temps de suivi courts, et demeurent plus faibles lorsque le temps de suivi augmente. De plus, les facteurs pouvant influencer le pronostic sont nombreux, et concernant le choix du biomatériau, il apparaît aujourd'hui que les silicates de calcium devraient être préférés à l'hydroxyde de calcium. Malgré tout, il est important de garder à l'esprit que lorsque l'effraction survient, l'acte de coiffage direct peut s'inscrire dans un gradient thérapeutique d'autant plus avec l'avènement des techniques conservatrices à minima et des restaurations adhésives sans compliquer la prise en charge future en cas d'échec du patient, sous réserve que ce dernier en soit informé.

Par ailleurs, il a été établi que lorsque les signes subjectifs et objectifs recueillis permettent au chirurgien-dentiste de poser un diagnostic de pulpite « irréversible », l'éviction de l'ensemble du tissu pulpaire et le traitement endodontique de la dent était à indiquer. En effet, la terminologie diagnostique recommandée par la conférence de consensus de l'American Association of Endodontists (AAE) stipule notamment que les dents permanentes matures diagnostiquées cliniquement comme présentant un stade inflammatoire de pulpite irréversible, nécessitent une prise en charge par pulpectomie et obturation du canal radiculaire considérant que la pulpe vitale inflammatoire n'est plus capable de régénération et de revenir à son état normal. (American Association of Endodontists (AAE) 2016).

Néanmoins, de nombreuses études histologiques ont démontré que l'état inflammatoire tissulaire et la présence d'agents pathogènes dans les dents diagnostiquées comme présentant une inflammation pulpaire irréversible se limitent au tissu pulpaire coronaire/caméral et qu'un tissu pulpaire radiculaire sain peut être retrouvé (Lin et al. 2020).

Suite à ces considérations, ces dernières années, des études ont été menées pour évaluer la mise en place de thérapeutiques de type pulpotomie à but thérapeutique sur des dents présentant des symptômes et signes cliniques de pulpites « irréversibles ». La pulpotomie partielle ou coronaire est définie comme une procédure qui implique une élimination douce/limitée des copeaux de dentine infectés/du tissu pulpaire endommagé afin de préserver la vitalité des tissus pulpaire coronaires et/ou radiculaires restants.(Ricucci et al. 2019).

Une revue menée par Cushley et al. retient huit de ces travaux, répondant à leurs critères d'inclusion, à savoir 5 articles originaux et 3 constituant un suivi à différents temps de contrôle (Cushley et al. 2019). Cette revue systématique est la première à se limiter aux dents présentant des signes et des symptômes indiquant une pulpite irréversible et incluaient des dents carieuses matures où un traitement par pulpotomie était réalisé. Bien que présentant des différences dans leurs protocoles, l'ensemble de ces traitements ont été réalisés à l'aide de matériaux à base de silicates de calcium (Cushley et al. 2019).

Les résultats de la revue à 12 et 36 mois de suivi ont montré un taux de réussite élevée pour ces traitements de type pulpotomie coronaire, de dents présentant des signes et des symptômes indiquant une pulpite irréversible, des résultats en termes de pronostic comparables à ceux de traitements de dents présentant des signes de pulpites réversibles.

Pour autant, bien que décrivant la pulpotomie comme moins invasive et potentiellement techniquement plus simple que la pulpectomie, les auteurs de cette revue systématique concluent en la nécessité de mener des études de haut niveau de preuve comparant la pulpotomie au traitement de canal radiculaire, notamment sur l'efficacité clinique, afin de pouvoir changer la pratique clinique dans ce domaine (Cushley et al. 2019).

Dans la même optique, et en allant même plus loin, Asgary et al, ont réalisé une étude randomisée, avec une taille d'échantillon de 302 patients dans la prise en charge de molaires permanentes matures vitales, présentant des lésions carieuses, avec ou sans symptomatologies pulpaire et/ou périapicales, et par l'intermédiaire de techniques de coiffage pulpaire direct/indirect ou de pulpotomie totale/partielle (Asgary et al. 2018).

Les groupes étaient homogènes en termes d'âge, de sexe, de situation matrimoniale, d'éducation et de praticiens ; les conditions pré et peropératoires étaient similaires dans tous les cas et n'ont pas affecté le succès à long terme. L'étude a révélé un taux de réussite à 3 et 12 mois supérieur à 91% sans différence significative dans les taux de réussite clinique/radiographique indépendamment de la technique opératoire employée, avec tout de même un taux important de perte de patient dans le suivi (Asgary et al. 2018).

Dans les limites de ces études, les taux de succès élevés rapportés, notamment dans la mise en œuvre de pulpotomies à visée thérapeutique dans le cas de pulpites irréversibles suggèrent que cette procédure offre de l'espoir comme alternative au traitement endodontique orthograde. Il est tout de même à prendre en compte la situation de soin souvent liée à cet état pulpaire, amenant les patients à consulter en urgence, sur l'organisation nécessaire à la bonne réalisation de ce type de thérapeutique notamment dans un contexte de pratique libérale. D'autre part, le contrôle clinique pour des actes tels que des pulpotomies thérapeutiques est souvent limité à l'absence de signes cliniques et radiologiques, ce qui implique une motivation importante du patient et ce qui peut également dans certains cas, s'avérer insuffisant, en fonction de son état de santé général.

BIBLIOGRAPHIE

1. Levin L, Day PF, Hicks L, O'Connell A, Fouad AF, Bourguignon C, et al. International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: General introduction. *Dent Traumatol.* août 2020;36(4):309-13.
2. GBD 2017 Disease and Injury Incidence and Prevalence Collaborators. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet.* 10 nov 2018;392(10159):1789-858.
3. Collège national des enseignants en odontologie conservatrice et endodontie (France), LASFARGUES J-J, Machtou P. Dictionnaire francophone des termes d'odontologie conservatrice. Paris : Espace ID. 2010. 112 p.
4. Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, et al. Managing Carious Lesions: Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res.* mai 2016;28(2):58-67.
5. Chawhuaveang DD, Yu OY, Yin IX, Lam WY-H, Mei ML, Chu C-H. Acquired salivary pellicle and oral diseases: A literature review. *J Dent Sci.* janv 2021;16(1):523-9.
6. Featherstone JDB. The continuum of dental caries--evidence for a dynamic disease process. *J Dent Res.* 2004;83 Spec No C:C39-42.
7. Cooper PR, Holder MJ, Smith AJ. Inflammation and regeneration in the dentin-pulp complex: a double-edged sword. *J Endod.* avr 2014;40(4 Suppl):S46-51.
8. About I. Dentin-pulp regeneration: the primordial role of the microenvironment and its modification by traumatic injuries and bioactive materials. *Endodontic Topics.* 2013;28(1).
9. About I. Dentin regeneration in vitro: the pivotal role of supportive cells. *Adv Dent Res.* juill 2011;23(3):320-4.
10. Tran-Hung L, Laurent P, Camps J, About I. Quantification of angiogenic growth factors released by human dental cells after injury. *Arch Oral Biol.* janv 2008;53(1):9-13.
11. Shi S, Gronthos S. Perivascular niche of postnatal mesenchymal stem cells in human bone marrow and dental pulp. *J Bone Miner Res.* avr 2003;18(4):696-704.
12. About I, Bottero MJ, de Denato P, Camps J, Franquin JC, Mitsiadis TA. Human dentin production in vitro. *Exp Cell Res.* 10 juill 2000;258(1):33-41.
13. Charles A Janeway J, Travers P, Walport M, Shlomchik MJ. The complement system and innate immunity. *Immunobiology: The Immune System in Health and Disease* 5th edition [Internet]. 2001 [cité 25 févr 2021]; Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK27100/>
14. Chmilewsky F, Jeanneau C, Laurent P, About I. LPS induces pulp progenitor cell recruitment via complement activation. *J Dent Res.* janv 2015;94(1):166-74.

15. Rufas P, Jeanneau C, Rombouts C, Laurent P, About I. Complement C3a Mobilizes Dental Pulp Stem Cells and Specifically Guides Pulp Fibroblast Recruitment. *J Endod.* sept 2016;42(9):1377-84.
16. Duncan HF, Galler KM, Tomson PL, Simon S, El-Karim I, Kundzina R, et al. European Society of Endodontology position statement: Management of deep caries and the exposed pulp. *Int Endod J.* juill 2019;52(7):923-34.
17. Ismail AI, Sohn W, Tellez M, Amaya A, Sen A, Hasson H, et al. The International Caries Detection and Assessment System (ICDAS): an integrated system for measuring dental caries. *Commun Dent Oral Epidemiol.* juin 2007;35(3):170-8.
18. American Academy of Pediatric Dentistry. The Reference Manual of Pediatric Dentistry: Definitions, Oral Health Policies, Recommendations, Endorsements, Resources. In: American Academy of Pediatric Dentistry. 2019. p. 353-36.
19. Haute Autorité de santé. Evaluation du parage de plaie de la pulpe par coiffage pulpaire direct. Haute Autorité de santé; 2019 p. 62.
20. American Association of Endodontists (AAE). Guide to Clinical Endodontics : Sixth Edition [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.aae.org/specialty/clinical-resources/guide-clinical-endodontics/>
21. Lasfargues, Colon. Exposition pulpaire iatrogène. In: *Odontologie Conservatrice et Restauratrice Tome 1 : une approche médicale globale.* CDP. 2009. p. 396-8. (JPIO).
22. Day PF, Flores MT, O'Connell AC, Abbott PV, Tsilingaridis G, Fouad AF, et al. International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: 3. Injuries in the primary dentition. *Dent Traumatol.* août 2020;36(4):343-59.
23. Bourguignon C, Cohenca N, Lauridsen E, Flores MT, O'Connell AC, Day PF, et al. International Association of Dental Traumatology guidelines for the management of traumatic dental injuries: 1. Fractures and luxations. *Dent Traumatol.* août 2020;36(4):314-30.
24. Lesclous P. Prescription des antibiotiques en pratique bucco-dentaire: Recommandations Afssaps 2011. *Med Buccale Chir Buccale.* nov 2011;17(4):334-46.
25. Youssef A-R, Emara R, Taher MM, Al-Allaf FA, Almalki M, Almasri MA, et al. Effects of mineral trioxide aggregate, calcium hydroxide, biodentine and Emdogain on osteogenesis, Odontogenesis, angiogenesis and cell viability of dental pulp stem cells. *BMC Oral Health.* 2 juill 2019;19(1):133.
26. Hilton TJ. Keys to clinical success with pulp capping: a review of the literature. *Oper Dent.* oct 2009;34(5):615-25.
27. Hess JC, Médioni E, Vené G. Thérapeutique endodontique. Ensemble pulpo- dentinaire. Conservation de la vitalité pulpaire: le coiffage. *Encyclopédie médico-chirurgicale.* 1990;51.

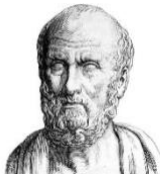
28. Farhad A, Mohammadi Z. Calcium hydroxide: a review. *Int Dent J.* oct 2005;55(5):293-301.
29. Morotomi T, Washio A, Kitamura C. Current and future options for dental pulp therapy. *Jpn Dent Sci Rev.* nov 2019;55(1):5-11.
30. Commission des dispositifs médicaux de l'Association Dentaire Française, éditeur. *Matériaux et techniques d'obturation endodontique.* Paris: Association dentaire Française; 2003. 74 p. (Dossiers ADF).
31. Cohenca N, Paranjpe A, Berg J. Vital Pulp Therapy. *Dental Clinics of North America.* janv 2013;57(1):59-73.
32. Alex G. Direct and Indirect Pulp Capping: A Brief History, Material Innovations, and Clinical Case Report. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (15488578).* mars 2018;39(3):182-9.
33. Claisse-Crinquette A, Claisse D. Hydroxyde de calcium ou MTA® en traumatologie. *L'Information Dentaire.* 28 mars 2002;Vol.13(1):53.
34. Nair PNR, Duncan HF, Pitt Ford TR, Luder HU. Histological, ultrastructural and quantitative investigations on the response of healthy human pulps to experimental capping with mineral trioxide aggregate: a randomized controlled trial. *Int Endod J.* févr 2008;41(2):128-50.
35. Tran XV, Gorin C, Willig C, Baroukh B, Pellat B, Decup F, et al. Effect of a calcium-silicate-based restorative cement on pulp repair. *J Dent Res.* déc 2012;91(12):1166-71.
36. Camilleri J. The chemical composition of mineral trioxide aggregate. *J Conserv Dent.* 2008;11(4):141-3.
37. Ford TR, Torabinejad M, Abedi HR, Bakland LK, Kariyawasam SP. Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping material. *J Am Dent Assoc.* oct 1996;127(10):1491-4.
38. Koh ET, Torabinejad M, Pitt Ford TR, Brady K, McDonald F. Mineral trioxide aggregate stimulates a biological response in human osteoblasts. *J Biomed Mater Res.* 5 déc 1997;37(3):432-9.
39. Pitt Ford TR, Torabinejad M, McKendry DJ, Hong C-U, Kariyawasam SP. Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology.* 1 juin 1995;79(6):756-63.
40. Torabinejad M, Smith PW, Kettering JD, Pitt Ford TR. Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. *Journal of Endodontics.* 1 juin 1995;21(6):295-9.
41. Bozeman TB, Lemon RR, Eleazer PD. Elemental analysis of crystal precipitate from gray and white MTA. *J Endod.* mai 2006;32(5):425-8.
42. Kunert M, Lukomska-Szymanska M. Bio-Inductive Materials in Direct and Indirect Pulp Capping-A Review Article. *Materials (Basel).* 7 mars 2020;13(5).

43. Santos AD, Moraes JCS, Araújo EB, Yukimitu K, Filho WV. Physico-chemical properties of MTA and a novel experimental cement. *International Endodontic Journal*. 2005;38(7):443-7.
44. Schönenberger Göhring K, Lehnert B, Zehnder M. Une revue des domaines d'indication du MTA - 1re partie : propriétés chimiques physiques et biologiques du MTA. :149-53.
45. Kettering JD, Torabinejad M. Investigation of mutagenicity of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials. *J Endod*. nov 1995;21(11):537-42.
46. Torabinejad M, Hong CU, Pitt Ford TR, Kettering JD. Cytotoxicity of four root end filling materials. *Journal of Endodontics*. 1 oct 1995;21(10):489-92.
47. 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*. mai 2005;31(5):387-91.
48. Takita T, Hayashi M, Takeichi O, Ogiso B, Suzuki N, Otsuka K, et al. Effect of mineral trioxide aggregate on proliferation of cultured human dental pulp cells. *Int Endod J*. mai 2006;39(5):415-22.
49. Torabinejad M, Ford TR, Abedi HR, Kariyawasam SP, Tang HM. Tissue reaction to implanted root-end filling materials in the tibia and mandible of guinea pigs. *J Endod*. juill 1998;24(7):468-71.
50. Holland R, de Souza V, Nery MJ, Otoboni Filho JA, Bernabé PF, Dezan Júnior E. Reaction of rat connective tissue to implanted dentin tubes filled with mineral trioxide aggregate or calcium hydroxide. *J Endod*. mars 1999;25(3):161-6.
51. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod*. janv 2010;36(1):16-27.
52. Faraco Junior IM, Holland R. Histomorphological response of dogs' dental pulp capped with white mineral trioxide aggregate. *Braz Dent J*. 2004;15(2):104-8.
53. Kuratate M, Yoshida K, Shigetani Y, Yoshida 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*. août 2008;34(8):970-4.
54. Barbosa Silva MJ, Vieira LQ, Sobrinho APR. The effects of mineral trioxide aggregates on cytokine production by mouse pulp tissue. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. mai 2008;105(5):e70-76.
55. Ito T, Kaneko T, Yamanaka Y, Shigetani Y, Yoshida K, Okiji T. M2 macrophages participate in the biological tissue healing reaction to mineral trioxide aggregate. *J Endod*. mars 2014;40(3):379-83.

56. Yoshiba N, Edanami N, Ohkura N, Maekawa T, Takahashi N, Tohma A, et al. M2 Phenotype Macrophages Colocalize with Schwann Cells in Human Dental Pulp. *J Dent Res.* mars 2020;99(3):329-38.
57. Kaur M, Singh H, Dhillon JS, Batra M, Saini M. MTA versus Biodentine: Review of Literature with a Comparative Analysis. *J Clin Diagn Res.* août 2017;11(8):ZG01-5.
58. Camilleri J, Montesin FE, Brady K, Sweeney R, Curtis RV, Ford TRP. The constitution of mineral trioxide aggregate. *Dent Mater.* avr 2005;21(4):297-303.
59. Camilleri J. Color stability of white mineral trioxide aggregate in contact with hypochlorite solution. *J Endod.* mars 2014;40(3):436-40.
60. Guimarães BM, Tartari T, Marciano MA, Vivan RR, Mondeli RFL, Camilleri J, et al. Color stability, radiopacity, and chemical characteristics of white mineral trioxide aggregate associated with 2 different vehicles in contact with blood. *J Endod.* juin 2015;41(6):947-52.
61. Marciano MA, Duarte MAH, Camilleri J. Dental discoloration caused by bismuth oxide in MTA in the presence of sodium hypochlorite. *Clin Oral Investig.* déc 2015;19(9):2201-9.
62. Oliveira MG de, Xavier CB, Demarco FF, Pinheiro ALB, Costa AT, Pozza DH. Comparative chemical study of MTA and Portland cements. *Braz Dent J.* 2007;18(1):3-7.
63. Butt N, Talwar S, Chaudhry S, Nawal RR, Yadav S, Bali A. Comparison of physical and mechanical properties of mineral trioxide aggregate and Biodentine. *Indian J Dent Res.* déc 2014;25(6):692-7.
64. Koubi G, Weisrock G, Bottéro M-J, Franquin J-C. Biodentine™ : un nouveau substitut dentinaire. *EditionsCdP.* 1 oct 2011;(9):497-505.
65. Raskin A, Eschrich G, Dejou J, About I. In vitro microleakage of Biodentine as a dentin substitute compared to Fuji II LC in cervical lining restorations. *J Adhes Dent.* déc 2012;14(6):535-42.
66. Giraud T, Jeanneau C, Bergmann M, Laurent P, About I. Tricalcium Silicate Capping Materials Modulate Pulp Healing and Inflammatory Activity In Vitro. *J Endod.* nov 2018;44(11):1686-91.
67. 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.* nov 2008;24(11):1486-94.
68. Giraud T, Rufas P, Chmilewsky F, Rombouts C, Dejou J, Jeanneau C, et al. Complement Activation by Pulp Capping Materials Plays a Significant Role in Both Inflammatory and Pulp Stem Cells' Recruitment. *J Endod.* juill 2017;43(7):1104-10.
69. Jeanneau C, Laurent P, Rombouts C, Giraud T, About I. Light-cured Tricalcium Silicate Toxicity to the Dental Pulp. *J Endod.* déc 2017;43(12):2074-80.

70. Arandi NZ, Rabi T. TheraCal LC: From Biochemical and Bioactive Properties to Clinical Applications. *Int J Dent*. 2018;2018:3484653.
71. Gandolfi MG, Siboni F, Prati C. Chemical–physical properties of TheraCal, a novel light-curable MTA-like material for pulp capping. *International Endodontic Journal*. 2012;45(6):571-9.
72. Cannon M, Gerodias N, Viera A, Percinoto C, Jurado R. Primate pulpal healing after exposure and TheraCal application. *J Clin Pediatr Dent*. 2014;38(4):333-7.
73. Lee H, Shin Y, Kim S-O, Lee H-S, Choi H-J, Song JS. Comparative Study of Pulpal Responses to Pulpotomy with ProRoot MTA, RetroMTA, and TheraCal in Dogs' Teeth. *J Endod*. août 2015;41(8):1317-24.
74. Camilleri J, Laurent P, About I. Hydration of Biodentine, Theracal LC, and a prototype tricalcium silicate-based dentin replacement material after pulp capping in entire tooth cultures. *J Endod*. nov 2014;40(11):1846-54.
75. Nilsen BW, Jensen E, Örtengren U, Michelsen VB. Analysis of organic components in resin-modified pulp capping materials: critical considerations. *Eur J Oral Sci*. 2017;125(3):183-94.
76. Schwendicke F. Removing Carious Tissue: Why and How? *Monogr Oral Sci*. 2018;27:56-67.
77. Nowicka A, Lipski M, Parafiniuk M, Sporniak-Tutak K, Lichota D, Kosierkiewicz A, et al. Response of human dental pulp capped with biodentine and mineral trioxide aggregate. *J Endod*. juin 2013;39(6):743-7.
78. Jalan AL, Warhadpande MM, Dakshindas DM. A comparison of human dental pulp response to calcium hydroxide and Biodentine as direct pulp-capping agents. *J Conserv Dent*. 2017;20(2):129-33.
79. Brizuela C, Ormeño A, Cabrera C, Cabezas R, Silva CI, Ramírez V, et al. Direct Pulp Capping with Calcium Hydroxide, Mineral Trioxide Aggregate, and Biodentine in Permanent Young Teeth with Caries: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Endodontics*. nov 2017;43(11):1776-80.
80. Katge FA, Patil DP. Comparative Analysis of 2 Calcium Silicate–based Cements (Biodentine and Mineral Trioxide Aggregate) as Direct Pulp-capping Agent in Young Permanent Molars: A Split Mouth Study. *Journal of Endodontics*. 1 avr 2017;43(4):507-13.
81. Dammaschke T, Leidinger J, Schäfer E. Long-term evaluation of direct pulp capping--treatment outcomes over an average period of 6.1 years. *Clin Oral Investig*. oct 2010;14(5):559-67.
82. Willershausen B, Willershausen I, Ross A, Velikonja S, Kasaj A, Blettner M. Retrospective study on direct pulp capping with calcium hydroxide. *Quintessence Int*. févr 2011;42(2):165-71.

83. 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.* nov 2014;40(11):1746-51.
84. Cho S-Y, Seo D-G, Lee S-J, Lee J, Lee S-J, Jung I-Y. Prognostic factors for clinical outcomes according to time after direct pulp capping. *J Endod.* mars 2013;39(3):327-31.
85. Cushley S, Duncan HF, Lappin MJ, Chua P, Elamin AD, Clarke M, et al. Efficacy of direct pulp capping for management of cariously exposed pulps in permanent teeth: a systematic review and meta-analysis. *Int Endod J.* 22 nov 2020;
86. Lin LM, Ricucci D, Saoud TM, Sigurdsson A, Kahler B. Vital pulp therapy of mature permanent teeth with irreversible pulpitis from the perspective of pulp biology. *Aust Endod J.* avr 2020;46(1):154-66.
87. Ricucci D, Siqueira JF, Li Y, Tay FR. Vital pulp therapy: histopathology and histobacteriology-based guidelines to treat teeth with deep caries and pulp exposure. *Journal of Dentistry.* juill 2019;86:41-52.
88. Cushley S, Duncan HF, Lappin MJ, Tomson PL, Lundy FT, Cooper P, et al. Pulpotomy for mature carious teeth with symptoms of irreversible pulpitis: A systematic review. *Journal of Dentistry.* 1 sept 2019;88:103158.
89. Asgary S, Hassanizadeh R, Torabzadeh H, Eghbal MJ. Treatment Outcomes of 4 Vital Pulp Therapies in Mature Molars. *Journal of Endodontics.* 1 avr 2018;44(4):529-35.



SERMENT MEDICAL

En présence des Maîtres de cette Faculté, de mes chers condisciples, devant l'effigie d'HIPPOCRATE.

Je promets et je jure, d'être fidèle aux lois de l'honneur et de la probité dans l'exercice de la Médecine Dentaire.

Je donnerai mes soins à l'indigent et n'exigerai jamais un salaire au-dessus de mon travail, je ne participerai à aucun partage clandestin d'honoraires.

Je ne me laisserai pas influencer par la soif du gain ou la recherche de la gloire.

Admis dans l'intérieur des maisons, mes yeux ne verront pas ce qui s'y passe, ma langue taira les secrets qui me seront confiés et mon état ne servira pas à corrompre les mœurs ni à favoriser le crime.

Je ne permettrai pas que des considérations de religion, de nation, de race, de parti ou de classe sociale viennent s'interposer entre mon devoir et mon patient.

Même sous la menace, je n'admettrai pas de faire usage de mes connaissances médicales contre les lois de l'humanité.

J'informerai mes patients des décisions envisagées, de leurs raisons et de leurs conséquences. Je ne tromperai jamais leur confiance et n'exploiterai pas le pouvoir hérité des connaissances pour forcer les consciences.

Je préserverai l'indépendance nécessaire à l'accomplissement de ma mission. Je n'entreprendrai rien qui dépasse mes compétences. Je les entretiendrai et les perfectionnerai pour assurer au mieux les services qui me seront demandés.

Respectueux et reconnaissant envers mes Maîtres, je rendrai à leurs enfants l'instruction que j'ai reçue de leur père.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois déshonoré et méprisé de mes confrères si j'y manque.

ROSSI Thomas – Coiffage pulpaire direct : indications, protocole et perspectives
Th. : Chir. dent. : Marseille : Aix –Marseille Université : 2021

Rubrique de classement : Odontologie Conservatrice

Résumé :

De nos jours, lors de sa pratique, le chirurgien-dentiste a pour préoccupation essentielle la conservation de la vitalité pulpaire. Une des procédures de cette conservation est le coiffage pulpaire direct : c'est un traitement qui consiste, en cas d'exposition pulpaire et par l'intermédiaire d'un biomatériau, à maintenir la vitalité pulpaire d'une dent.

L'hydroxyde de calcium est le premier matériau à être utilisé et considéré comme le "gold standard" en matière de coiffage pulpaire.

Cependant, depuis quelques années, des matériaux à base de silicate de calcium ont fait leur apparition et sont d'excellentes alternatives à l'hydroxyde de calcium : on parle du Mineral Trioxyde Aggregate (MTA), de Biodentine™ et de Theracal.

Ce travail présente, dans une première partie, les différentes indications et contre-indications locales et générales à la technique du coiffage pulpaire direct.

La deuxième partie présente les différents biomatériaux utilisables, ainsi que leurs propriétés physico-chimiques et biologiques. Les étapes opératoires cliniques ainsi que le suivi et les pronostics y sont ensuite traités. La troisième et dernière partie propose une discussion autour de cette procédure clinique et ses perspectives.

Mots clés : Coiffage pulpaire direct, Biodentine, Hydroxyde de Calcium, Mineral trioxyde Aggregate, Theracal.

ROSSI Thomas – Direct pulp capping: indications, protocol and perspectives

Abstract:

Nowadays, during his practice, the dentist has for essential preoccupation the conservation of the pulp vitality. One of the procedures of this conservation is the direct pulp capping: this is a treatment which consists, in case of pulp exposure and through a biomaterial, to maintain the pulp vitality of a tooth.

Calcium hydroxide is the first material to be used and is considered to be the "gold standard" for pulp capping.

However, in recent years, materials based on calcium silicate have appeared and are excellent alternatives to calcium hydroxide: we speak of Mineral Trioxide Aggregate (MTA), Biodentine™ and Theracal.

This work presents, in a first part, the different indications and the local and general contraindications to the technique of direct pulp capping.

The second part presents the different biomaterials available, and their physicochemical and biological properties. The clinical operating steps as well as the follow-up and prognosis are then treated. The third and last part proposes a discussion around this clinical procedure and its perspectives.

Key words : Direct pulp capping, Biodentine, Calcium Hydroxide, Mineral Trioxide Aggregate, Theracal.