



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ACADEMIE DE NANCY-METZ
**UNIVERSITE DE LORRAINE FACULTE
D'ODONTOLOGIE DE NANCY**

Année 2015

N°8099

THESE
Pour le
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN
CHIRURGIE DENTAIRE**

Par
SAINT-DENIS Paul
Né le 25 Décembre 1988 à NANCY (54)

<p>BIODENTINE™ : DE LA CONCEPTION A L'ANALYSE CLINIQUE</p>

Présentée et soutenue publiquement le 14/12/2015

Examineurs de la thèse:

Pr P. AMBROSINI

Dr M. ENGELS-DEUTSCH

Dr M. VINCENT

Dr R. BALTHAZARD

Professeur des Universités

Maître de Conférences

Assistant Hospitalier Universitaire

Maître de Conférences

Président

Directeur

Co-directeur

Juge

Président : Professeur Pierre MUTZENHARDT
Doyen : Professeur Jean-Marc MARTRETTE
Vice-Doyens : Pr Pascal AMBROSINI — Dr Céline CLEMENT
Membres Honoraires : Dr L. BABEL – Pr. S. DURIVAUX – Pr A. FONTAINE – Pr G. JACQUART – Pr D. ROZENCWEIG - Pr M. VIVIER – Pr ARTIS -
Doyen Honoraire : Pr J. VADOT, Pr J.P. LOUIS
Professeur Emérite : Pr J.P. LOUIS
Maître de conférences CUM MERITO : Dr C. ARCHIEN

Sous-section 56-01 Odontologie pédiatrique	Mme Mme M. Mlle Mlle M.	<u>DROZ Dominique (Desprez)</u> JAGER Stéphanie PREVOST Jacques HERNANDEZ Magali LAUVRAY Alice MERCIER Thomas	Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Assistante * Assistante Assistant *
Sous-section 56-02 Orthopédie Dento-Faciale	Mme M. Mlle Mlle	<u>FILLEUL Marie Pierryle</u> EGLOFF Benoît BLAISE Claire LACHAUX Marion	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Assistante Assistante
Sous-section 56-03 Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie légale	Mme M. Mme	<u>CLEMENT Céline</u> CAMELOT Frédéric LACZNY Emily	Maître de Conférences * Assistant * Assistante
Sous-section 57-01 Parodontologie	M. Mme M. M. Mlle Mlle	<u>AMBROSINI Pascal</u> BISSEON Catherine JOSEPH David PENAUD Jacques BÖLÖNI Eszter PAOLI Nathalie	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Assistante Assistante *
Sous-section 57-02 Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique Anesthésiologie et Réanimation	Mme M. Mlle Mlle M. Mlle M.	<u>GUILLET-THIBAUT Julie</u> BRAVETTI Pierre PHULPIN Bérengère BALZARINI Charlotte DELAITRE Bruno KICHENBRAND Charlene MASCHINO François	Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Assistante Assistant Assistante * Assistant
Sous-section 57-03 Sciences Biologiques (Biochimie, Immunologie, Histologie, Embryologie, génétique, Anatomie pathologique, Bactériologie, Pharmacologie)	M. M.	<u>YASUKAWA Kazutoyo</u> MARTRETTE Jean-Marc	Maître de Conférences * Professeur des Universités *
Sous-section 58-01 Odontologie Conservatrice, Endodontie	M. M. M. M. M. Mlle M.	<u>MORTIER Eric</u> AMORY Christophe BALHAZARD Rémy ENGELS-DEUTSCH Marc BON Gautier MUNARO Perrine VINCENT Marin	Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Maître de Conférences * Assistante Assistante Assistant *
Sous-section 58-02 Prothèses (Prothèse conjointe, Prothèse adjointe partielle, Prothèse complète, Prothèse maxillo-faciale)	M. M. Mme Mme M. M. M. Mlle	<u>DE MARCH Pascal</u> SCHOUVER Jacques VAILLANT Anne-Sophie CORNE Pascale HIRTZ Pierre LACZNY Sébastien MAGNIN Gilles SIMON Doriane	Maître de Conférences Maître de Conférences Maître de Conférences * Assistante * Assistant * Assistant Assistant Assistante
Sous-section 58-03 Sciences Anatomiques et Physiologiques Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysique, Radiologie	Mme Mme M. M.	<u>STRAZIELLE Catherine</u> MOBY Vanessa (Stutzmann) SALOMON Jean-Pierre HARLE Guillaume	Professeur des Universités * Maître de Conférences * Maître de Conférences Assistant Associé

Souligné : responsable de la sous-section

* temps plein

Mis à jour le 01.09.2015

*Par délibération en date du 11 décembre 1972,
la Faculté de Chirurgie Dentaire a arrêté que
les opinions émises dans les dissertations
qui lui seront présentées
doivent être considérées comme propres à
leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner
aucune approbation ni improbation.*

A notre président,

Monsieur le Professeur Pascal AMBROSINI

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-1

Vice-Doyen au budget et aux affaires hospitalières

Habilité à diriger des Recherches

Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Responsable de la Sous-section : Parodontologie

Vous nous faites l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse. Nous vous remercions pour votre enseignement, votre gentillesse et votre disponibilité tout au long de nos études. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de notre profond respect.

A notre juge et directeur de thèse,

Monsieur le Docteur Marc ENGELS-DEUTSCH

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section : Odontologie Conservatrice – Endodontie

Nous vous sommes reconnaissants d'avoir accepté de diriger cette thèse. Nous vous remercions pour votre disponibilité, votre soutien et vos conseils tout au long de sa rédaction. Nous vous remercions également pour la pédagogie et la précision de vos enseignements durant nos études. Que cette thèse soit l'occasion de vous témoigner notre respect et notre gratitude.

A notre juge et co-directeur de thèse,

Monsieur le Docteur Marin VINCENT

Docteur en Chirurgie Dentaire

Assistant Hospitalier Universitaire

Sous-section : Odontologie Conservatrice – Endodontie

Nous vous sommes très reconnaissants d'avoir accepté la co-direction de cette thèse. Soyez assuré de notre gratitude quant à votre implication, votre disponibilité, votre aide et votre patience lors de la rédaction. Veuillez trouver dans ce travail le témoignage de notre respect et notre gratitude.

A notre juge,

Monsieur le Docteur Rémy BALTHAZARD

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Sous-section : Odontologie Conservatrice - Endodontie

*Nous vous remercions de siéger au jury de cette thèse.
Nous sommes sensibles à l'attention que vous avez bien
voulu porter à notre travail. Soyez assurés de notre
gratitude et de notre respect à votre égard.*

Au papy Jeannot,

parti il y a déjà longtemps, juste avant ma réussite au concours de médecine. Je te dédie cette thèse, peut-être que ça t'enverra un genre de signe qui te permettra de savoir ce que je suis devenu, qui sait !

A mes parents et mes frères,

merci de votre soutien sans faille, et merci de me permettre de vivre avec une famille aussi soudée. Loulou c'est à toi d'écrire une thèse maintenant !

A Mamie,

ton dévouement, ta patience, ta bonne humeur et j'en passe... sont et seront toujours exemplaires. Je te défie de trouver une seule faute d'orthographe dans cette thèse !

A Mamili et Papili,

merci pour toute l'affection que vous m'apportez, vous êtes des grands-parents adorables.

A Diane,

merci pour ta patience à toute épreuve quand je passais mon temps à te dire que j'aurais dû m'y prendre plus tôt... Tu as su me faire oublier toutes ces mauvaises pensées à chaque fois que j'étais avec toi. Je t'aime et je vous souhaite le meilleur le plus longtemps possible.

Aux cousins, cousines, oncles, tantes, et particulièrement à la brave Véro,

je vous embrasse, merci de faire rimer repas de famille avec rigolade !

A toutes les équipes du Dr JEANDEL, du Dr LAPLACE, de la SELARL Navarin, du cabinet Esthetim, et du laboratoire de Pascal GRANGE,

merci d'avoir participé à ma formation et de m'avoir permis de travailler à vos côtés.

A tous les copains et les copines du théâtre d'impro,

merci de m'avoir accompagné pendant toutes ces années d'études. Faire des ateliers, des spectacles et des soirées avec vous sera toujours un exutoire incomparable.

Table des matières :

Introduction et historique :	12
1. Rappels histo-physiologiques : le complexe pulpo-dentinaire :	14
1.1. La dentine :	14
1.1.1. Description générale :	14
1.1.2. Les types de dentine :	15
1.2. La pulpe :	16
1.3. Réponse du complexe pulpo-dentinaire à l'agression :	18
1.4. Une application des propriétés régénératrices du complexe pulpo-dentinaire : le coiffage pulpaire direct :	18
2. Présentation du produit :	20
3. Biomatérial :	21
3.1. Structure, composition et réaction de prise :	21
3.2. Temps de prise :	22
3.3. Propriétés physiques :	24
3.3.1. Densité :	24
3.3.2. Résistance à la compression :	25
3.3.3. Résistance à la flexion :	27
3.3.4. Micro-dureté Vickers :	27
3.3.5. Radio-opacité :	28
3.3.6. Résistance à l'exposition immédiate aux fluides :	28
3.3.7. Couleur :	29
3.4. Propriétés chimiques :	31
3.4.1. Résistance à un milieu acide :	31
3.4.2. Résistance à la micro-infiltration :	33
3.5. Biocompatibilité :	36
3.5.1. Cytotoxicité (ISO 7405, ISO 10993-5) :	36
3.5.2. Tests de sensibilisation (ISO 7405, ISO 10993-10) :	37
3.5.3. Tests de génotoxicité (ISO 7405, ISO 10993-3, OCDE 471) :	37
3.5.4. Tests d'irritation cutanée, oculaire et orale (ISO 7405, ISO 10993-10, ISO 10993-11, OCDE 405, OCDE 423) :	38

3.5.5.	Relargage de métaux :	39
3.5.6.	Relargage d'ions silicium et calcium :	40
3.6.	Propriétés biologiques :	41
3.6.1.	Liaison à la dentine :	41
3.6.2.	Stimulation de la dentinogenèse :	43
3.6.3.	Altération de la matrice collagénique de la dentine :	48
3.7.	Comparatif des propriétés de la dentine, du Biodentine™ et du MTA :	51
4.	Indications cliniques :	52
4.1.	Substitut dentinaire :	52
4.1.1.	Etude de Koubi <i>et al.</i> (2013)	52
4.1.2.	Etude de cas de Koubi <i>et al.</i> (2011)	56
4.1.3.	Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire indirect avec du Biodentine™ ..	57
4.2.	Coiffage pulpaire direct :	58
4.2.1.	Suite à un traumatisme :	58
4.2.2.	Suite à une lésion carieuse ou iatrogène :	60
4.2.3.	Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire direct avec du Biodentine™	61
4.3.	Pulpotomie :	62
4.3.1.	Etude de Shayegan <i>et al.</i> (2009)	62
4.3.2.	Etude de cas de Cauwels et Martens (2013)	63
4.3.3.	Etude de cas de Cauwels et Martens (2014)	63
4.3.4.	Synthèse des cas publiés de pulpotomie avec du Biodentine™	64
4.4.	Apexogenèse, apexification et mise en place d'un bouchon apical :	64
4.4.1.	Etude de cas de Cauwels et Martens (2014)	66
4.4.2.	Etude de cas de Sinha <i>et al.</i> (2014)	67
4.4.3.	Synthèse des cas publiés d'apexogenèse avec du Biodentine™	68
4.4.4.	Synthèse des cas publiés de mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™	69
4.5.	Obturation canalaire a retro :	70
4.5.1.	Etude de cas de Caron <i>et al.</i> (2014)	70
4.5.2.	Etude de cas de Bronnec (2012)	72
4.5.3.	Synthèse des cas publiés d'obturations <i>a retro</i> avec du Biodentine™	73
4.6.	Résorptions et perforations radiculaires :	73

4.6.1. Etude de cas de Bronnec (2012)	74
4.6.2. Etude de cas de Bachoo <i>et al.</i> (2013)	75
4.6.3. Synthèse des cas publiés de réparations de perforations iatrogènes avec du Biodentine™	76
4.6.4. Synthèse des cas publiés de réparations de résorptions perforantes avec du Biodentine™	77
4.7. Obturation de sillon radiculaire :	77
4.7.1. Etude de cas de Naik <i>et al.</i> (2014)	77
4.7.2. Synthèse des cas publiés d'obturations de sillons palato-radiculaires avec du Biodentine™	79
Conclusion :	80
Bibliographie :	82
Liste des figures :	94
Liste des tableaux :	98

Introduction et historique :

Suite à une pathologie, le but du chirurgien-dentiste dans une thérapeutique d'odontologie conservatrice est de restaurer les fonctions perdues ou altérées de l'organe dentaire par des techniques aussi conservatrices que possible. La conservation de la vitalité pulpaire contribue grandement à garantir la pérennité de l'organe dentaire. Si la vitalité ne peut être maintenue, le nettoyage du réseau canalaire, sa désinfection et son obturation tridimensionnelle et étanche doivent être réalisés. Enfin, les tissus durs lésés de la dent sont remplacés grâce à des techniques de restauration directe ou indirecte.

Une des difficultés du déroulement des soins réside dans le maintien et/ou la restauration de l'isolement entre le milieu buccal, pulpaire et parodontal. Cet isolement est nécessaire pour empêcher la diffusion d'agents pathogènes. Des pathologies telles que les résorptions externes ou internes, ainsi que des actes iatrogènes, peuvent provoquer une communication entre ces milieux. Le défaut de maturation de la dent, se traduisant par un apex ouvert, empêche une obturation canalaire optimale en cas de nécrose pulpaire et complique également la restauration de l'isolement endo-parodontal.

L'évolution des matériaux d'obturation utilisés en odontologie conservatrice doit donc prendre en compte plusieurs critères. Les matériaux doivent assurer étanchéité et rigidité pour garantir l'isolement entre les différents milieux. Les matériaux doivent être biocompatibles pour permettre la bonne tolérance des tissus à son contact. Mieux encore, la stimulation des phénomènes physiologiques de régénération et de maturation de l'organe dentaire doit être assurée : par exemple la dentinogenèse réparatrice par le biais du coiffage pulpaire direct, ou l'apexogenèse qui va permettre la poursuite de la maturation de la racine et la fermeture apicale.

Depuis plusieurs années, les ciments à base de silicate de calcium se révèlent très utiles dans des situations cliniques nécessitant une approche endodontique (O'Brien, 2008). Leur biocompatibilité et leur capacité à régénérer les tissus dentaires sont avérées. Le Mineral Trioxide Aggregate (MTA) et ses dérivés sont les types de ciments au silicate de calcium les plus utilisés. Cependant, plusieurs inconvénients leur sont attribués : une réaction de prise lente (de l'ordre de plusieurs heures), des mauvaises propriétés mécaniques et une tendance à la décoloration à long terme (Biodentine™ : Scientific File).

Les ciments à base de silicate de calcium sont dérivés des ciments de Portland utilisés dans le bâtiment. Ceux-ci sont composés d'un mélange de silicate de calcium, d'aluminate de calcium, d'aluminoferriite de calcium et de sulfate de calcium. Ils contiennent aussi des impuretés métalliques dues aux roches dont sont extraits les composants. Les aluminates et sulfates vont altérer les propriétés mécaniques et la prise du ciment. Le MTA et ses différentes formes commerciales comportent tous ces impuretés à un pourcentage plus ou moins élevé (Torabinejad, 2014).

Le laboratoire Septodont™ a élaboré le Biodentine™ afin de créer un ciment de haute pureté, de façon à grandement améliorer les propriétés mécaniques et la vitesse de la réaction de prise. La plateforme technologique Active Biosilicate Technology™ a été créée dans ce but. Le procédé utilisé permet de maîtriser la composition et la granulométrie des composants de base. Ainsi, la pureté du ciment est optimale et la présence d'aluminates et de sulfates de calcium est évitée (Colon, 2010 ; Biodentine™ : Scientific File).

Le Biodentine™ a été développé par Septodont™ en collaboration avec des praticiens hospitalo-universitaires de Marseille, Paris V et Paris VII pendant une dizaine d'année. Le matériau a été déclaré le 18 janvier 2010 à L'Agence Nationale de Sécurité des Médicaments et produits de santé (ANSM) en tant que dispositif médical de classe III (ANSM, 2012 ; Colon, 2010 ; Biodentine™ : Scientific File).

1. Rappels histo-physiologiques : le complexe pulpo-dentinaire :

1.1. La dentine :

1.1.1. Description générale :

La dentine protège la pulpe qui, elle, assure la vitalité de la dent (Linde et Goldberg, 1993). La relation étroite entre ces deux tissus permet ainsi de les qualifier de « complexe pulpo-dentinaire. »

La dentine est un tissu minéralisé à 70 % par des cristaux d'hydroxyapatite, qui compose la majeure partie de l'organe dentaire. Elle contient également 20 % de matrice organique et 10 % d'eau. La matrice organique est principalement composée de collagène, de type I (le composant majeur), V et VI. D'autres protéines sont présentes : phosphoprotéines dentinaires, protéoglycanes, glycoprotéines... Parmi ces protéines, deux sont considérées comme les plus spécifiques de la dentine : la sialoprotéine dentinaire (DSP) et la phosphoprotéine dentinaire (DPP).

Une couche hypominéralisée, appelée prédentine, est située contre la pulpe, au contact des cellules sécrétrices de dentine et rangées en palissade, appelées odontoblastes.

Des structures tubulaires appelées *tubuli* ou canalicules dentinaires traversent la dentine depuis la pulpe jusqu'à la jonction amélo-dentinaire, ou cémento-dentinaire au niveau radiculaire. Ces *tubuli* contiennent du fluide dentinaire d'origine pulpaire et des prolongements odontoblastiques. Les *tubuli* mesurent de 1 à 3 μm de diamètre. En observant une section transversale, ils occupent de 1 à 3 % de la surface dentinaire en périphérie et de 20 à 25 % à proximité de la pulpe (Olgart et Bergenholtz, 2003). Cette organisation permet de décrire la dentine intercanaliculaire entre les canalicules et la dentine intra- ou périctubulaire, qui s'est déposée secondairement à l'intérieur du canalicule. La différence de composition entre ces deux tissus se trouve au niveau de la trame collagénique (Figure 1).

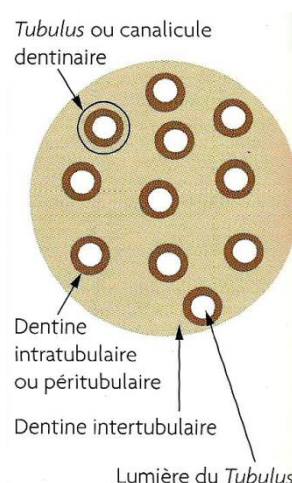


Figure 1 : Schéma en coupe transversale de la dentine (Simon *et al.*, 2012)

Lorsque la dentine est exposée par un traumatisme ou un processus carieux, les *tubuli* sont en contact avec le milieu buccal. Comme expliqué plus haut, le nombre de *tubuli* est plus élevé à proximité de la pulpe : ainsi, la perméabilité dentinaire est plus importante. Deux phénomènes permettent cette communication :

- La diffusion permet à une substance de passer du milieu le plus concentré au moins concentré jusqu'à un équilibre. Les toxines bactériennes buccales peuvent ainsi pénétrer dans le tissu pulpaire stérile.
- La pression intrapulpaire est plus élevée que celle du milieu buccal, ce qui permet temporairement de refouler le fluide dentinaire vers l'extérieur et donc les toxines présentes lors d'une exposition dentinaire (Vongsavan et Matthews, 1992 et 2000).

Enfin, dans la région apicale, la dentine est majoritairement fibreuse et donc différente de la dentine concentrée sur le reste de la racine (Mjör *et al.*, 2001).

1.1.2. Les types de dentine :

Plusieurs dénominations existent dans la littérature concernant les différents types de dentine synthétisés au cours de la vie de la dent. Goldberg et Smith (2004) ont proposé les définitions suivantes.

- La dentine primaire est la dentine sécrétée lors du développement embryologique de la dent. Elle est responsable de la morphologie générale de la dent.
- La dentine secondaire est sécrétée physiologiquement après l'éruption de la dent au moment de la mise en fonction ou après la formation de l'apex. Elle est responsable de la diminution du volume pulpaire tout au long de la vie de la dent. L'apposition de la dentine secondaire n'est pas uniforme : elle est plus importante au niveau du toit et des parois latérales de la chambre pulpaire.
- La dentine tertiaire est sécrétée en cas d'agression externe pour protéger la pulpe sous-jacente. Deux processus de synthèse de la dentine tertiaire peuvent survenir, selon la nature et l'intensité de l'agression externe. La dentinogenèse réactionnelle survient après une agression d'intensité et de durée plutôt faible, lorsque la palissade odontoblastique est préservée. La dentinogenèse réparatrice survient en cas d'agression plus forte, lorsque les odontoblastes sous-jacents sont détruits. Dans ce dernier cas, de nouvelles cellules doivent être recrutées pour assurer la synthèse de dentine tertiaire.

1.2. La pulpe :

La couche périphérique de la pulpe, contre la dentine, est composée d'odontoblastes. Ils synthétisent les protéines de la prédentine et provoquent sa minéralisation. Ils sont organisés en palissade unicellulaire et ont des prolongements cytoplasmiques dans les *tubuli* dentinaires. Les odontoblastes sont reliés entre eux par des jonctions cellulaires de type *gap junction* qui vont renforcer la communication entre cellules, notamment en cas d'agression (Magloire *et al.*, 2004). Ils présentent aussi des desmosomes, qui assurent une cohésion mécanique entre eux (Kagayama *et al.*, 1995). Les odontoblastes peuvent être quiescents et avoir ainsi une activité sécrétrice minimale, ou plus actifs, avec une morphologie allongée et un noyau basal. Cette phase active est prédominante lors de la synthèse des dentines primaire et tertiaire. Enfin, une membrane basale soutient la palissade odontoblastique.

La régulation de l'activité des odontoblastes est assurée par des facteurs de croissance. Certains sont séquestrés dans la dentine et libérés lors du processus carieux (Smith *et al.*, 1998) :

- L'hormone de croissance (GH, *Growth Hormone*) (Zhang *et al.*, 1997)
- Certaines molécules de la famille des IGF (*Insulin-like Growth Factor*) (Begue-Kirn *et al.*, 1994)
- Les TGF- β 1, 2 et 3 (*Transforming Growth Factor*) (D'Souza *et al.*, 1990)

Des fibroblastes sont également présents dans la pulpe, comme dans tout tissu conjonctif. Ils synthétisent et renouvellent les composants de la matrice extra-cellulaire.

Les cellules immunitaires de la pulpe sont présentes physiologiquement, comme les cellules dendritiques et les mastocytes (Jontelle *et al.*, 1987) mais également des macrophages (Trowbridge, 2002). Les odontoblastes et les fibroblastes auraient également un rôle dans la réponse inflammatoire face à une agression par des pathogènes (Staquet *et al.*, 2008).

La couche de Höhl, séparée de la palissade odontoblastique par la couche acellulaire de Weil, contient les types de cellules précédemment décrits (sauf les odontoblastes), mais aussi des cellules souches :

- Les DPSC (*Dental Pulp Stem Cells*) seraient impliqués dans le processus de régénération du tissu pulpaire lésé (Gronthos *et al.*, 2000),
- Les SHED (*Stem cells from Human Exfoliated Deciduous teeth*) présentes au sein des dents temporaires (Miura *et al.*, 2003),
- Les cellules souches de la papille apicale présentes à l'apex de la dent immature (Huang *et al.*, 2008), similaires aux cellules souches de la moelle osseuse, qui ont un potentiel de différenciation ostéogénique et dentinogénique.

Les vaisseaux sanguins pulpaire sont en grande partie situés au centre de la dent et occupent 15% du volume pulpaire selon Vongsavan et Matthews (1992). Les artérioles pénètrent la pulpe par les *foramina* apicaux et se divisent en périphérie de la pulpe en un réseau capillaire très dense, notamment sous la palissade odontoblastique. Les cellules musculaires lisses des artérioles et les sphincters pré-capillaires permettent de réguler le débit sanguin. Ainsi de nombreux échanges de substances sont possibles au niveau odontoblastique, par diffusion ou par le biais de transporteurs. Les capillaires pulpaire sont composés d'une couche cellulaire et sont fenêtrés ou continus (Yoshida et Ohshima, 1996). Les veinules prennent le chemin inverse et des shunts artério-veineux permettent également la régulation du flux sanguin. Comme expliqué dans le paragraphe sur la perméabilité pulpaire, la pression intra-pulpaire est élevée et permet d'empêcher la pénétration de substances par les *tubuli* jusqu'à la pulpe (Vongsavan et Matthews, 1992 et 2000). Le réseau sanguin a une grande capacité d'adaptation et de renouvellement, notamment face aux agressions, grâce à des facteurs comme le VEGF (*vascular endothelial growth factor*) (Rodd et Boissonade, 2005) et à la densité du réseau qui permet une redistribution du flux sanguin. (Figure 2). Cependant, la pulpe présente une plus faible résistance à la nécrose que d'autres organes, à cause de la dentine qui l'entoure : aucune suppléance collatérale d'autres vaisseaux n'est possible et sa compliance est faible, autrement dit sa capacité à se distendre face à un flux sanguin plus important.

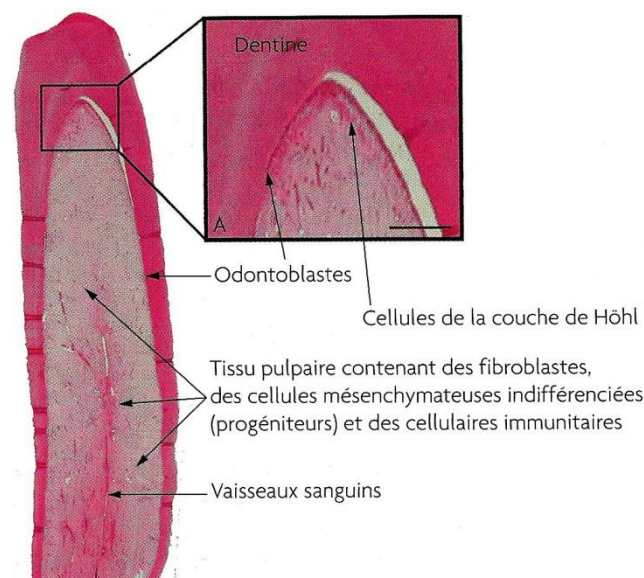


Figure 2 : Coupe histologique d'une première molaire de bovin (Simon *et al.*, 2012).

La pulpe est un tissu très innervé et contient des fibres sensibles et des fibres du système nerveux autonome. Si ces fibres sont observées dans l'ensemble du tissu pulpaire, elles sont surtout présentes dans le plexus sous-odontoblastique de Raschkow, sous forme de fibres sans gaine de myéline. Une partie traverse la couche odontoblastique pour pénétrer dans les *tubuli*.

1.3. Réponse du complexe pulpo-dentinaire à l'agression :

- Lors de la dentinogénèse réactionnelle, les toxines bactériennes vont induire une réponse inflammatoire qui va faire sortir les odontoblastes de leur phase quiescente et provoquer la synthèse de dentine réactionnelle. Comme expliqué plus haut les facteurs de croissance séquestrés dans la dentine jouent également un rôle dans cette synthèse. La déminéralisation du tissu, notamment lors du processus carieux, va induire la libération de ces facteurs (Smith, 2003)
- Lors de la dentinogénèse réparatrice, la palissade odontoblastique est détruite au niveau du site de l'agression. Les odontoblastes adjacents ne pouvant pas se diviser, des cellules progénitrices sont alors recrutées et se différencient en cellules de phénotype odontoblastique ou odontoblastes-like qui vont pouvoir synthétiser un pont dentinaire. Ces cellules progénitrices sont recrutées localement ou à distance du site (Fitzgerald, 1979).

1.4. Une application des propriétés régénératrices du complexe pulpo-dentinaire : le coiffage pulpaire direct :

Pour une réparation dentinaire correcte, la pulpe doit être isolée du milieu buccal. Le but du coiffage pulpaire est d'induire la formation d'une barrière de dentine réparatrice entre la pulpe et le matériau d'obturation, en permettant aux cellules pulpaires d'exprimer leur potentiel dentinogénétique (Schroder, 1985). Le pronostic du coiffage pulpaire dépend de plusieurs critères (Mjör, 2002):

- l'élimination de l'inflammation pulpaire
- le contrôle de l'infection
- la biocompatibilité du matériau utilisé

L'hydroxyde de calcium, matériau utilisé pour cette indication pendant de nombreuses années, présente plusieurs inconvénients :

- la barrière dentinaire formée à son contact est poreuse (Cox *et al.*, 1996),
- il n'adhère pas à la dentine,
- il présente une mauvaise aptitude au scellement,
- ses propriétés antibactériennes sont limitées : certaines bactéries comme *Enterococcus faecalis* ou champignons tels que *Candida albicans* résistent au pouvoir bactéricide du matériau (Waltimo *et al.*, 1999, Evans *et al.*, 2002),
- son pH basique provoque, à son contact, la formation d'une couche de cellules nécrotiques (Hargreaves et Goodis, 2002)

Le MTA, dont les indications seront développées plus loin, est utilisé depuis plusieurs années pour le coiffage pulpaire direct. La qualité du pont dentinaire est meilleure et les cellules à son contact, qui présentent des marqueurs propres au phénotype odontoblastique, peuvent donc poursuivre la dentinogenèse réparatrice (Simon *et al.*, 2008).

Plusieurs étapes se succèdent avant la formation du pont dentinaire (Figure 3):

- hémostase et formation du caillot sanguin
- réponse inflammatoire
- prolifération cellulaire, recrutement de cellules progénitrices
- réparation dentinaire.

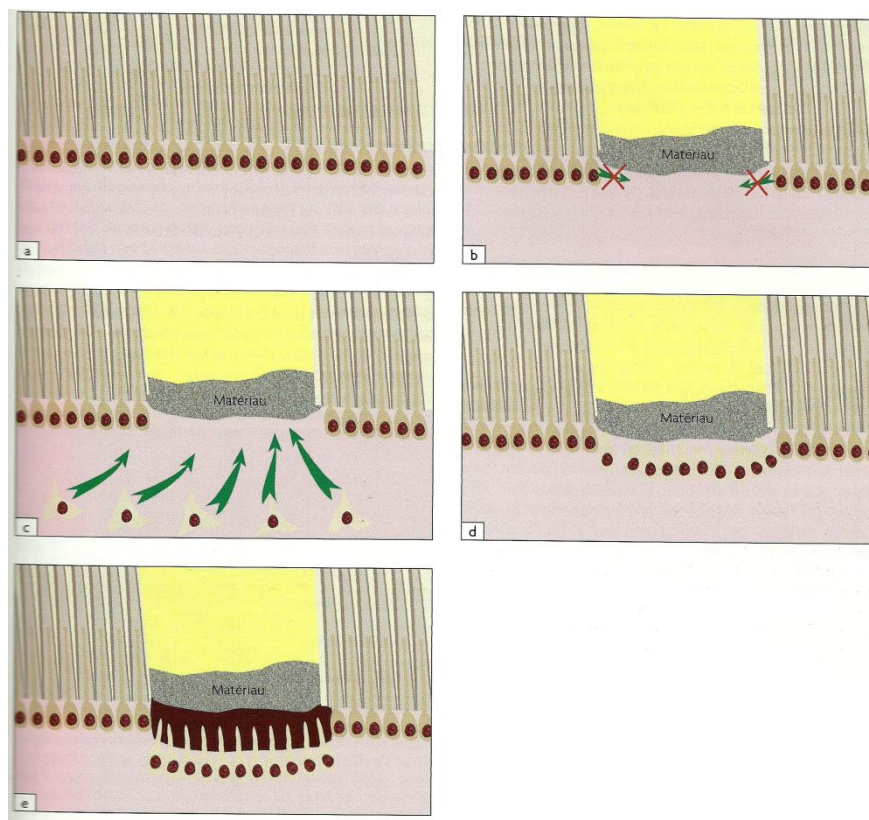


Figure 3 : Schéma de la dentinogenèse réparatrice induite par coiffage pulpaire direct. (b) Absence de division des odontoblastes, (c) recrutement de cellules progénitrices, (d) différenciation en odontoblastes et (e) sécrétion d'un pont dentinaire (Simon *et al.*, 2012).

Comme indiqué précédemment, les cellules progénitrices pourraient avoir plusieurs origines, mais les DPSC semblent les plus à même de participer à la néoformation de la palissade d'odontoblastes et du tissu pulpaire.

2. Présentation du produit :

Les laboratoires Septodont™ et ATO Zizine™ commercialisent le Biodentine™. Le conditionnement est le suivant : 15 capsules de poudres et 15 doses de liquide, ainsi que des spatules en plastique (Figure 4).



Figure 4 : Conditionnement du Biodentine™ par Septodont™ et par ATO Zizine™ (Septodont™, ATO Zizine™).

Le mode d'emploi pour chaque indication est le suivant : d'abord tapoter sur une surface dure la capsule pour mobiliser la poudre. Ouvrir la capsule et placer cinq gouttes de liquide à l'intérieur. Refermer et placer la capsule dans un vibreur pendant 30 secondes, à une fréquence de 4000 à 4200 oscillations par minute. Ouvrir et prélever le matériau avec la spatule en plastique fournie. Il est possible d'utiliser ensuite un porte-amalgame, une spatule, ou un système *Root Canal Messing Gun*® (Septodont. Biodentine™ : notice d'utilisation).

3. Biomatériau :

3.1. *Structure, composition et réaction de prise :*

La réaction chimique principale lors de la prise du Biodentine™ va permettre au silicate de calcium de réagir avec l'eau et de former un gel de silicate de calcium hydraté (CSH) mêlé à de l'hydroxyde de calcium (Biodentine™: Scientific file).



La dissolution se produit à la surface des grains de silicate de calcium. L'hydratation permanente du milieu va permettre au gel CSH de se former d'abord à la surface de ces grains, puis de combler les interstices jusqu'à baigner complètement les espaces résiduels. Ainsi, le matériau va durcir progressivement par la formation de cristaux dans cette solution sursaturée (Figure 5).

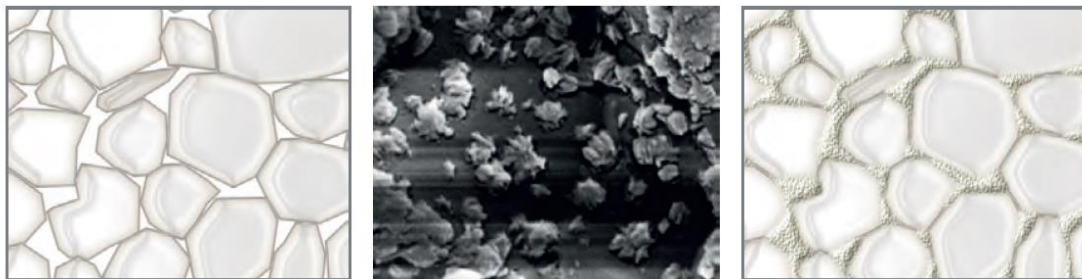


Figure 5 : Illustration des étapes de la prise du matériau. A gauche : Poudre avant son hydratation. Au centre : dépôt de gel CSH sur les grains de silicate de calcium. A droite : Biodentine™ après la réaction de prise (Biodentine™: Scientific File).

Cependant, cette réaction de prise doit approcher les 9 à 12 minutes. De plus le matériau doit avoir des propriétés physiques approchant celles de la dentine. C'est pourquoi Biodentine™ est composé d'autres éléments que la poudre de silicate tricalcique.

Différents moyens permettent de réduire le temps de prise : premièrement, plus la taille des particules est petite, plus la surface de réaction est grande, donc le temps de prise diminue. Deuxièmement, l'ajout de chlorure de calcium à l'eau va également accélérer la réaction. Enfin, la réduction de la quantité de liquide va avoir le même effet.

D'autres procédés vont améliorer les propriétés du Biodentine™. Comme expliqué plus haut, la technologie Active Biosilicate Technology™ élimine les aluminates et les autres impuretés, sources de fragilité au sein des ciments de type Portland. Ensuite, la taille des

particules va être optimisée par l'ajout de charges de carbonate de calcium. Ce choix a été fait en raison de la biocompatibilité de ces particules et de la présence de calcium.

Des polymères hydrosolubles sont présents dans le liquide pour permettre de diminuer la présence d'eau au sein du matériau, tout en assurant une certaine malléabilité au mélange. En effet, l'eau est essentielle pour la prise du Biodentine™, mais, en trop grande quantité, elle diminue la résistance mécanique du matériau. Par contre, en trop faible présence d'eau le mélange sera moins homogène. Les polymères hydrosolubles vont alors permettre un compromis entre ces deux problèmes (Ridi *et al.*, 2013).

De l'oxyde de fer est utilisé comme pigment et de l'oxyde de zirconium est ajouté pour ses propriétés radio-opaques (Tableau 1).

Tableau 1 : Composition du Biodentine™ (Biodentine™: Scientific Files ; Colon *et al.*, 2010).

Poudre :		
Silicate tricalcique	Matériau de base principal	70%
Silicate dicalcique	Second matériau de base principal	
Carbonate et oxyde de calcium	Charges	10%
Oxyde de fer	Teinte	
Oxyde de zirconium	Radio-opacifiant	5%
Liquide :		
Eau		
Chlorure de calcium	Accélérateur de prise	15%
Polymère hydrosoluble	Agent réducteur d'eau	

3.2. Temps de prise :

Plusieurs méthodes existent pour mesurer le temps de prise des matériaux. La première consiste à mesurer la résistance du matériau à la pénétration d'une aiguille, à différents moments du durcissement. Quand l'aiguille ne laisse plus de trace sur le matériau, le temps de prise est considéré comme écoulé (norme ISO 9917). Avec cette méthode dite de Gilmore, le temps de travail calculé est d'une minute et le temps de prise de 9 à 12 minutes (Biodentine™: Scientific file).

Un rhéomètre peut aussi être utilisé. Il permet de mesurer la transmission par un échantillon d'une contrainte appliquée de façon sinusoïdale. Un rhéomètre ARES (Rheometric Scientific Inc., Piscataway, USA) a été choisi pour le Biodentine™. Après mélange, le matériau est placé entre deux plateaux striés de 6 mm de diamètre et espacés de 2 mm. Le plateau inférieur est maintenu à 37,5°C et l'ensemble est soumis à 100% d'humidité relative. La contrainte est appliquée avec des oscillations de 1 radian par seconde et une déformation de 0,0005%. Cette déformation doit être inférieure à celle qui altérerait

la structure du matériau (0,0015%). Grâce à cet instrument, le module d'élasticité du matériau peut aussi être mesuré (Nonat et Franquin, 2006).

Avec cette méthode, le temps de prise du Biodentine™ a été comparé avec celui du ProRoot MTA® (Dentsply) et d'un ciment verre-ionomère ou CVI (Fuji IX®, GC). Le début du temps de prise correspond à un module d'élasticité de 10 MPa, lorsqu'il commence à augmenter et la fin du temps de prise à un module de 100 MPa. Le temps de travail est donc l'intervalle de temps entre le mélange du matériau et le début du temps de prise (Figure 6).

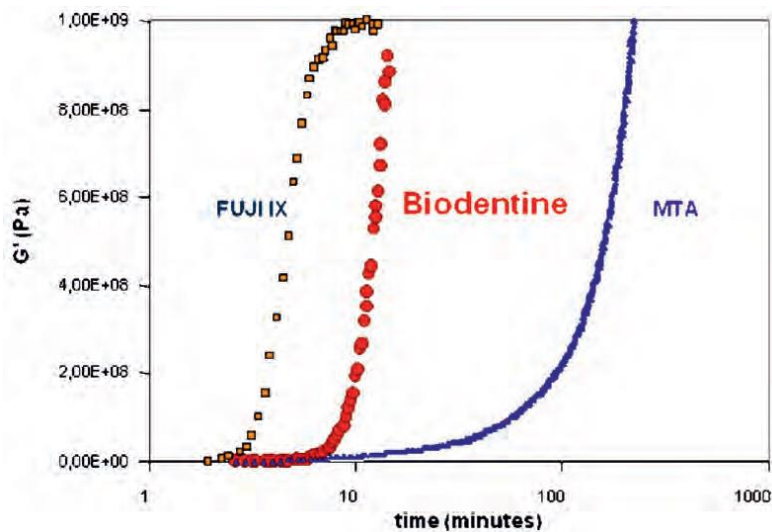


Figure 6 : Evolution de la rhéométrie dynamique du début à la fin du temps de prise (Biodentine™: Scientific Files).

Ainsi, le temps de travail du Biodentine™ est de 6 minutes, avec un temps de prise de 10 à 12 minutes, ce qui est bien inférieur aux ciments à base de silicate de calcium tel que le MTA (Biodentine™: Scientific file).

Grech *et al.* (2013) ont comparé le temps de prise du Biodentine™ avec plusieurs ciments : ciment à base de silicate tricalcique (Mineral Research Processing, Meyzieu) et d'oxyde de zirconium (Sigma-Aldrich®) abrégé TCS-ZR, Bioaggregate® (Verio Dental Co. Ltd. Vancouver) et IRM® (Dentsply DeTrey), après immersion dans une solution saline (HBSS ; H6648, Sigma-Aldrich®, St Louis) gélifiée avec 20% de gélatine de porc (Fluka Biochemika, Fluka Chemie GmbH). Cette solution saline simule les conditions cliniques. La méthode de Gilmore a été utilisée. Le temps mesuré est de 45 minutes, ce qui est inférieur au ciment à base de silicate tricalcique utilisé en comparaison (Figure 7).

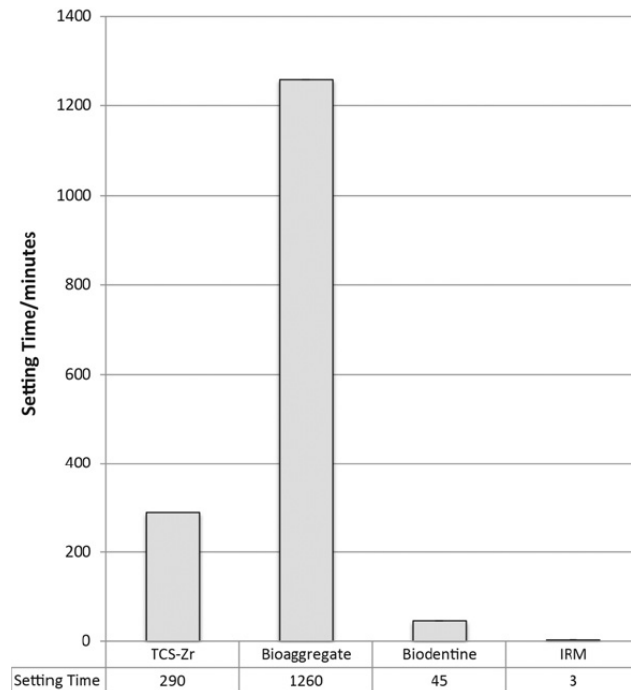


Figure 7 : Temps de prise dans une solution saline (Grech *et al.*, 2013).

3.3. Propriétés physiques :

3.3.1. Densité :

Plus la porosité du matériau est basse, plus sa densité est élevée. Ainsi, la densité supérieure du Biodentine™ par rapport aux ciments à base de silicate de calcium est due à la faible teneur en eau utilisée pour le mélange.

La première méthode utilisée pour confirmer cette faible porosité du Biodentine™ est la porosimétrie par intrusion de mercure. Avec une pression qui dépend du diamètre des pores, le mercure va être forcé à travers le matériau. Des échantillons des mêmes matériaux que pour l'étude du temps de prise ont été préparés dans les mêmes conditions. 14 cylindres de chaque matériau, préparés 28 jours auparavant, ont été séchés pendant 12 jours à 40°C sous vide. Le volume des pores et la répartition de leur diamètre ont été évalués avec un appareil Autopore III (Micromeritics Instruments Corporation®, Norcross, USA).

Les résultats obtenus montrent que le Biodentine™ a une densité plus importante que le ProRoot MTA® : elle est de 2,3g/cm³ pour le Biodentine™ et de 1,9g/cm³ pour le ProRoot MTA®. La porosité est de 6,8% pour le Biodentine™ et 22,6% pour le ProRoot MTA® (Biodentine™: Scientific file).

Une autre méthode utilise la résistance électrique, car les ions présents dans l'eau ont une mobilité qui va dépendre du diamètre des pores et de leur répartition dans le matériau. Ainsi, la technique de spectroscopie d'impédance met en évidence une

augmentation de la résistance électrique du Biodentine™ avec la réduction de la porosité au fil du temps. Cette amélioration de la densité va se poursuivre après le temps de prise, mais plus lentement (Goldberg *et al.*, 2009 ; Biodentine™: Scientific file) (Figure 8).

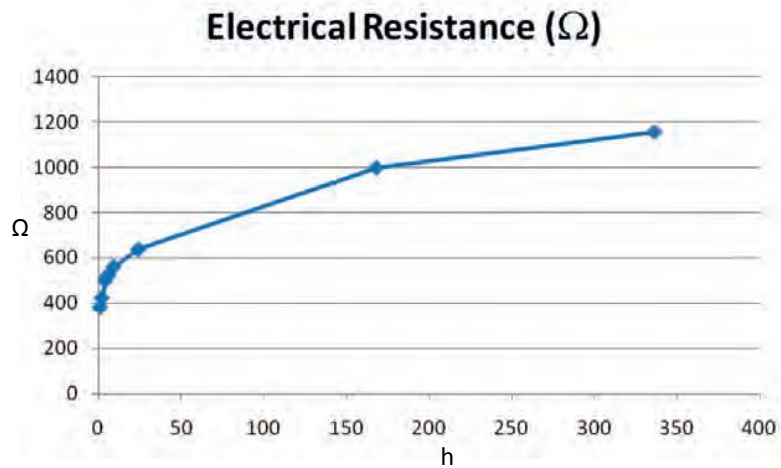


Figure 8 : Résistance électrique en fonction du temps pendant le temps de prise du Biodentine™ (Goldberg *et al.*, 2009).

3.3.2. Résistance à la compression :

La résistance à la compression est évaluée avec un test défini par la norme ISO 9917,1991. Les mêmes matériaux que pour les autres tests seront évalués. Chaque produit est mélangé selon les recommandations du fabricant. Pour chaque matériau, 6 échantillons sont préparés dans des moules cylindriques en Téflon de 4 mm de diamètre et de 6 mm de long, en éliminant les bulles d'air. Les échantillons sont placés 15 minutes dans un incubateur à 100% d'humidité relative, à 37°C, puis, une fois démoulés, sont plongés dans de l'eau distillée à 37°C pour simuler une situation clinique. Pour le MTA, les échantillons sont placés 24h dans l'incubateur, en raison de son temps de prise plus lent. Chaque matériau est testé à 1 heure, puis à 1, 7 et 28 jours. Le test est réalisé avec une machine de traction (Model 2/M MTS Systems® 1400, Eden Prairie), avec une vitesse de compression de 0,5 mm par minute. Le Biodentine™, pendant la première heure, voit sa résistance à la compression augmenter fortement jusqu'à atteindre 100 MPa. Comme la densité du matériau s'améliore avec le temps, la résistance mécanique va elle aussi s'améliorer, jusqu'à atteindre une valeur de 300 MPa au bout d'un mois, ce qui est similaire à la résistance à la compression de la dentine (297 MPa, O'Brien, 2008) (Goldberg *et al.*, 2009, Biodentine™: Scientific file) (Figure 9).

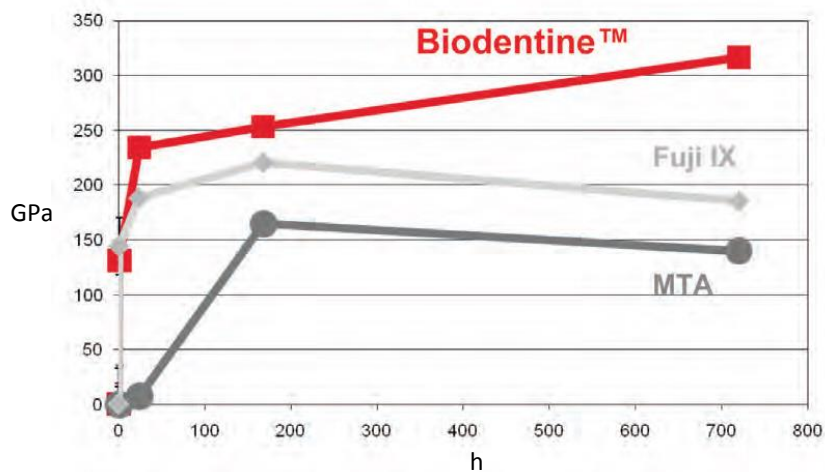


Figure 9 : Evolution de la résistance à la compression après la prise du Biodentine™, Fuji IX® et ProRoot MTA® (Biodentine™: Scientific Files).

Le CVI testé a une résistance équivalente au Biodentine™ au bout d'une heure, mais sans augmentation au fil du temps. Le ProRoot MTA® n'a pas de résistance mécanique après 24h et cette résistance va progresser et atteindre un maximum de 150 MPa après une semaine (Biodentine™: Scientific file).

Grech *et al.* (2013) ont comparé la résistance à la compression du Biodentine™ avec plusieurs ciments décrits plus haut, après immersion dans une solution saline HBSS pendant 28 jours. Ces conditions permettent également de simuler le milieu buccal. La résistance à la compression obtenue dans ces conditions est de 67 MPa environ, valeur significativement supérieure aux autres matériaux testés dans l'étude (Figure 10).

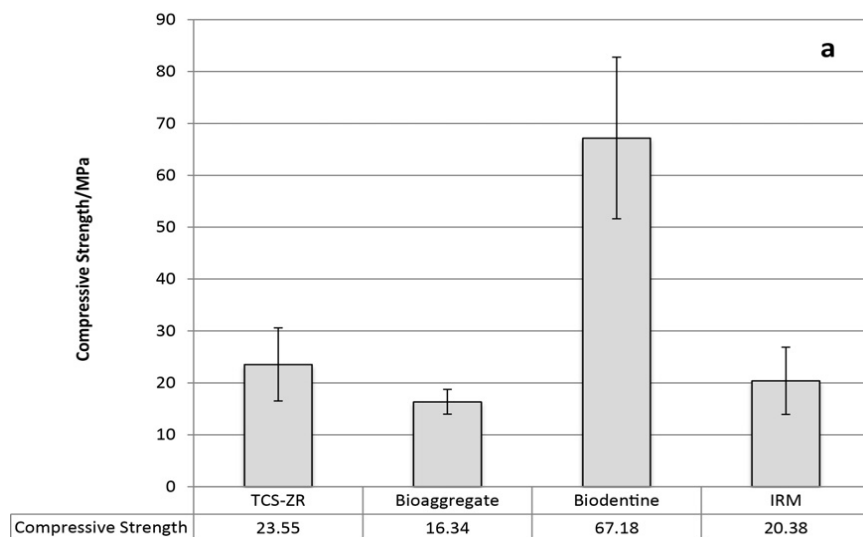


Figure 10 : Résistance à la compression de différents matériaux après immersion dans une solution HBSS pendant 28 jours (Grech *et al.*, 2013).

3.3.3. Résistance à la flexion :

La méthode du test de flexion en trois points est utilisée. Un échantillon de matériau est placé sur deux supports écartés et une force constante est appliquée au centre de l'échantillon. La force nécessaire pour courber l'échantillon du Biodentine™ testé au bout de 2 h est de 34 MPa. Cette force est supérieure pour les CVI (5-25 MPa) mais inférieure aux résines composites (61-182 MPa, O'Brien, 2008) (Biodentine™ : Scientific file).

3.3.4. Micro-dureté Vickers :

La dureté est définie en mesurant la résistance à la déformation de la surface du matériau lorsqu'elle est soumise à une indentation. Des mesures sont faites à différents moments. La dureté augmente dans le temps après une immersion dans l'eau distillée des ciments testés (Goldberg *et al.*, 2009). Après 2 heures de compression, on observe une dureté Vickers de 51 unités pour le Biodentine™. Cette dureté augmente à 69 unités au bout d'un mois. A nouveau, cette progression est due à la formation continue de gel CSH qui va diminuer la porosité du matériau. Cette dureté est de 36 unités pour le ciment verre-ionomère modifié par adjonction de résine (CVIMAR) Fuji II LC® (GC) et de 97 unités pour la résine composite (GC). Enfin, la dentine a une dureté Vickers de 60 à 90 unités (O'Brien, 2008) ce qui est similaire au Biodentine™ (Biodentine™: Scientific file).

L'étude de Grech *et al.*, décrite plus haut, mesure une micro-dureté de 48,4 unités après immersion dans une solution saline pendant 28 jours, toujours pour simuler des conditions cliniques. Là encore, la micro-dureté du Biodentine™ est supérieure aux autres matériaux, notamment le ciment au silicate tricalcique (Figure 11).

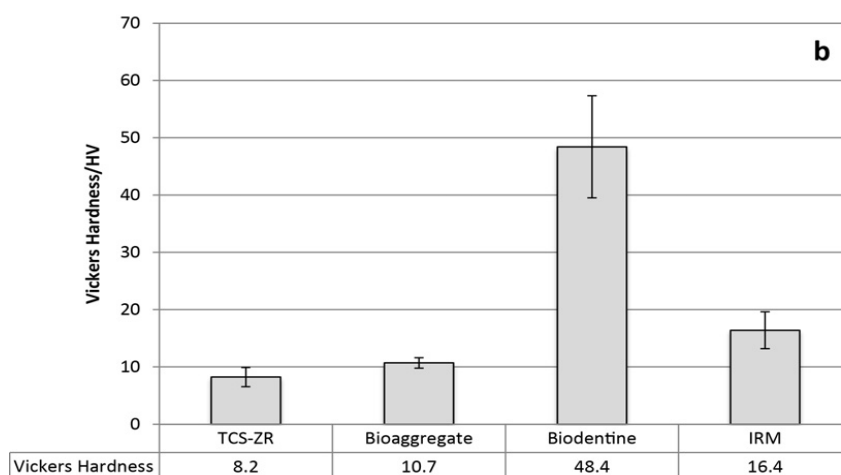


Figure 11 : Micro-dureté Vickers de différents matériaux après immersion dans une solution HBSS pendant 28 jours (Grech *et al.*, 2013).

3.3.5. Radio-opacité :

Selon la norme ISO 6876:2001, les matériaux dentaires à visée d'obturation endodontique doivent avoir une radio-opacité équivalente à 3 mm d'aluminium. Tanalp *et al.* (2013) ont comparé la radio-opacité du Biodentine™, de MTA Angelus® (Angelus, Londrina, Brésil) et de MM-MTA® (Micro-Méga, Besançon). Des échantillons de 10 mm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur sont préparés dans un moule en acier inoxydable et conservés à 37°C jusqu'à la prise. Un disque de dentine de même épaisseur, issu de canines extraites sans tissu carieux, est utilisé comme témoin. Les cylindres sont placés à côté d'un échantillon d'aluminium pur à 99,5% et du témoin de dentine naturelle, sur une plaque au phosphore (Digora®, Soredex). Le cliché est réalisé à l'aide d'un tube radiologique Trophy (Novalix), avec un faisceau de 65kV et de 8mA et à une distance de 30 cm. Le film est scanné et les images converties par un logiciel (Digora®, Soredex).

Tous les échantillons ont une radio-opacité supérieure à la dentine. Mais le Biodentine™ a une radio-opacité inférieure aux deux autres matériaux. De plus, elle est aussi légèrement inférieure à la radio-opacité obtenue par 3 mm d'aluminium. Le fait que cette opacité se rapproche davantage de la dentine que du MTA complique sa visibilité radiologique et rend plus difficile la visualisation radiographique d'une obturation *a retro* par exemple (Tanalp *et al.*, 2013).

3.3.6. Résistance à l'exposition immédiate aux fluides :

L'étude de Grech *et al.* décrite précédemment porte également sur la résistance à l'exposition immédiate à l'eau. Cette propriété décrit la tendance d'un ciment fraîchement préparé à se désagréger après une première exposition au sang ou à d'autres fluides (Wang *et al.*, 2007). 1g du matériau à tester est placé dans un cylindre de laiton tressé dont le poids a été pesé précisément avec une balance (Sartorius). Puis le tout est immergé 15s dans un tube à essai avec 120 mm d'eau distillée. L'ensemble cylindre/matériau est ensuite égoutté pendant 2 minutes et l'eau résiduelle est éliminée à l'aide de papier absorbant, puis l'échantillon est pesé. L'ensemble est plongé puis ressorti du tube trois fois. Le test est réalisé deux fois par matériau. Le résultat est exprimé en perte de masse par rapport au poids initial (Figure 12).

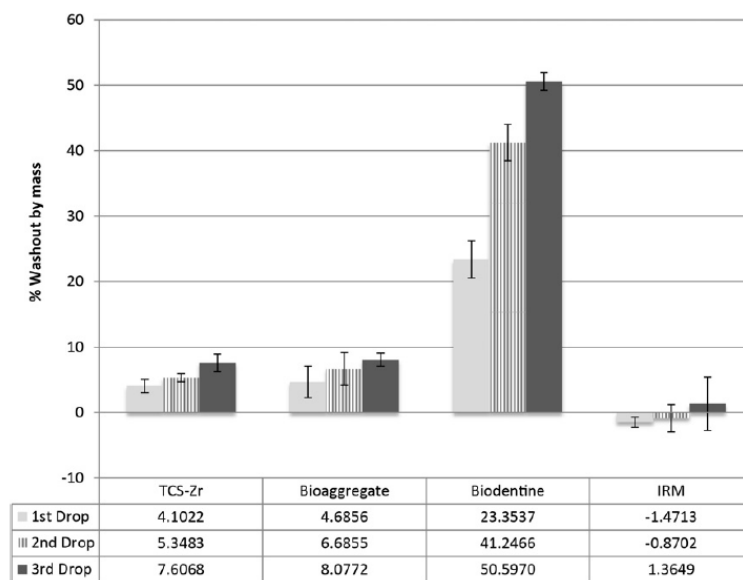


Figure 12 : Résistance à l'immersion immédiate dans l'eau après une, deux et trois immersions (Grech *et al.*, 2013).

D'après le test, le Biodentine™ tend à perdre sa cohésion lors d'une exposition à l'eau pendant sa prise, plus que les autres produits étudiés. Une isolation du site opératoire semble donc nécessaire avant utilisation du Biodentine™, du moins pendant la réaction de prise du matériau (Grech *et al.*, 2013).

3.3.7. Couleur :

Il a été montré que les ciments à base de silicate de calcium utilisés jusqu'à présent, tels que le MTA, provoquaient à long terme une altération de leur coloration. Plusieurs hypothèses l'expliquent, comme la présence d'oxyde de bismuth en tant que radio-opacifiant et/ou la contamination du matériau par le sang (Lenherr *et al.*, 2012).

Vallés *et al.* (2013) ont comparé la stabilité colorimétrique dans différentes conditions expérimentales de 5 ciments au silicate de calcium : du ProRoot MTA®, du MTA Angelus®, du ciment de Portland, du ciment de Portland avec de l'oxyde de bismuth et du Biodentine™. Des petits cylindres de matériau ont été préparés dans des moules en silicone et placés en incubateur à 37°C pendant 48h. Après démoulage, 5 groupes de 3 échantillons de chaque matériau ont été placés. Le premier groupe est immergé 15 minutes dans de la glycérine et exposé à une lampe à polymériser pendant 2 minutes. Le deuxième groupe est immergé 15 minutes dans la glycérine sans polymérisation préalable. Le troisième groupe est placé sous la lampe sans immersion préalable. Le quatrième groupe est placé à l'abri de la lumière sous une feuille en aluminium après immersion dans la glycérine. Enfin, le cinquième groupe est placé dans le noir sans immersion préalable. Des mesures spectrophotométriques ont été réalisées à 0 seconde, 120 secondes et 5 jours. Les groupes 4 et 5 n'ont pas été observés à 120 secondes pour laisser la feuille d'aluminium en place (Figure 13).

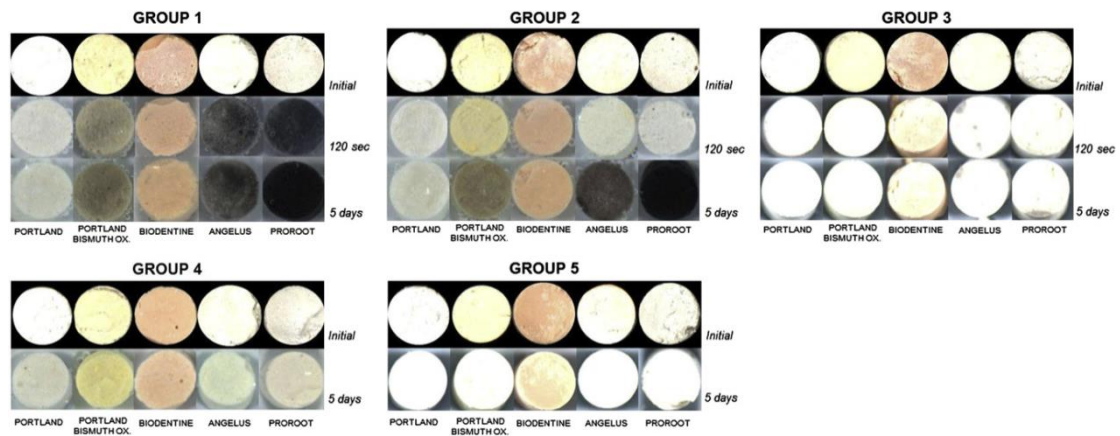


Figure 13 : Variation de la couleur en fonction du temps et de différentes expositions (Vallés *et al.*, 2013).

Les résultats montrent une très bonne stabilité colorimétrique du Biodentine™ dans toutes les conditions. La présence d'oxyde de bismuth en tant que radio-opacifiant au sein du MTA semble provoquer un assombrissement prononcé du matériau quand l'exposition initiale est réalisée dans un milieu sans oxygène (Vallés *et al.*, 2013).

Keskin *et al.* (2015) ont étudié les variations colorimétriques de plusieurs ciments à base de silicate de calcium exposés à différents irrigants utilisés en endodontie. Plusieurs cylindres ont été préparés avec les matériaux suivants : Biodentine™, ProRoot MTA® (Dentsply), MTA Angelus® (Angelus Solucoes Odontologicas) et Bioaggregate®. Les cylindres ont été exposés aux irrigants suivants pendant 24h : de l'eau distillée, de l'hypochlorite de sodium (NaOCl) à 5% (Wizard, Istanbul, Turquie) et du gluconate de chlorhexidine à 2% (Drogsan, Ankara, Turquie). Une analyse spectrophotométrique a permis de détecter les variations de couleur (Figure 14).

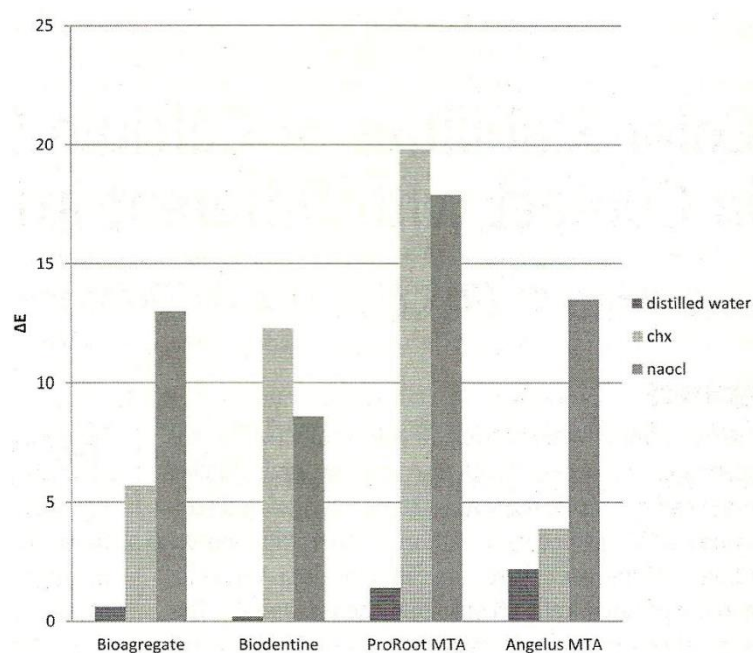


Figure 14 : Variation de la luminosité (ΔE) de différents matériaux exposés à différents irrigants (Keskin *et al.*, 2015).

La variation colorimétrique du Biodentine™, est importante lors de l'exposition aux irrigants endodontiques testés, mais elle est moins importante que pour les autres matériaux testés dans cette étude, comme le MTA. C'est là encore la présence d'oxyde de bismuth en tant que radio-opacifiant dans le ProRoot MTA® et le MTA Angelus® qui semble être préjudiciable à une bonne stabilité colorimétrique (Keskin *et al.*, 2015).

3.4. Propriétés chimiques :

3.4.1. Résistance à un milieu acide :

Les matériaux dentaires peuvent être exposés à des milieux acides tels que les tissus inflammatoires (Shie *et al.*, 2009). Leurs propriétés peuvent donc être altérées en raison d'un pH acide provoqué par un processus inflammatoire, notamment lors de leur utilisation pour des obturations endodontiques ou des réparations de perforations. L'érosion acide et les effets du vieillissement du Biodentine™ sur sa structure et sa composition ont été étudiés par Laurent *et al.* (2008) (Biodentine™: Scientific file).

L'érosion acide est évaluée en mesurant chaque jour et pendant une semaine la perte de hauteur d'échantillons du Biodentine™ (2 mm de haut, 30 mm de diamètre) plongés dans une solution aqueuse de 0,02 mol/L d'acide lactique et de 0,1 mol/L de lactate de sodium. Le pH est de 2,74. Un microscope électronique à balayage (MEB) est utilisé pour observer la surface du matériau avant et après le vieillissement. Enfin, une mesure de la concentration de silicium, de zirconium, de calcium et de carbone inorganique dans de la salive artificielle de Meyer et Fusayama, contenant des phosphates et de pH 5,3, va permettre d'évaluer la dissolution du matériau après 1, 2, 3 et 4 semaines. Dans la solution acide au pH de 2,74, une érosion est observée pour le Biodentine™, mais plus faible qu'avec un CVI (Nomoto and McCabe, 2001) (Figure 15).

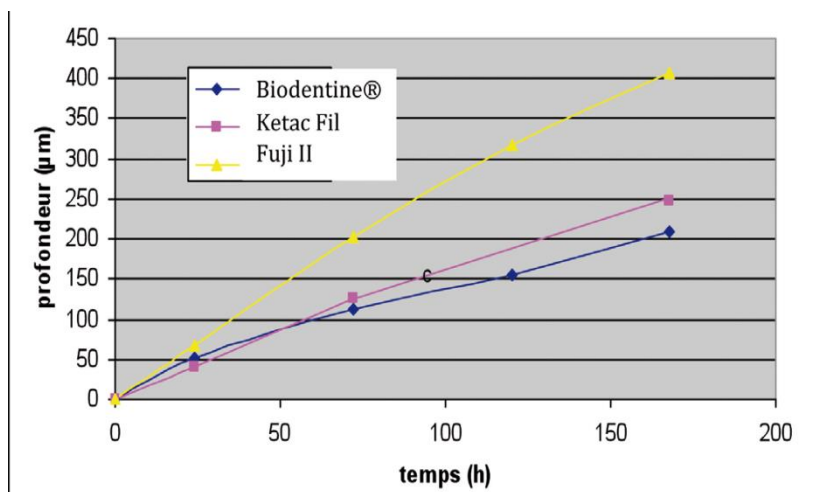


Figure 15 : Erosion acide dans une solution d'acide lactique de pH 2,74 (Colon *et al.*, 2010).

Dans la salive artificielle un dépôt blanc se forme à la surface du Biodentine™ et il n'y a pas d'érosion. Il y a même une augmentation de l'épaisseur des échantillons (Figure 16). Le MEB montre une structure de cristaux en aiguilles, qui rappellent l'apatite. La diffraction aux rayons X confirme cette nature de type apatite, avec un ratio calcium/phosphate de 1,6. Cela correspond à l'analyse de la concentration d'éléments dans la salive artificielle au cours du temps. En effet, la concentration en ions calcium diminue au fur et à mesure du dépôt de cristaux sur le matériau. Ces dépôts sont aussi observables avec des matériaux de type MTA (Colon *et al.*, 2010 ; Biodentine™: Scientific file) (Figure 17).

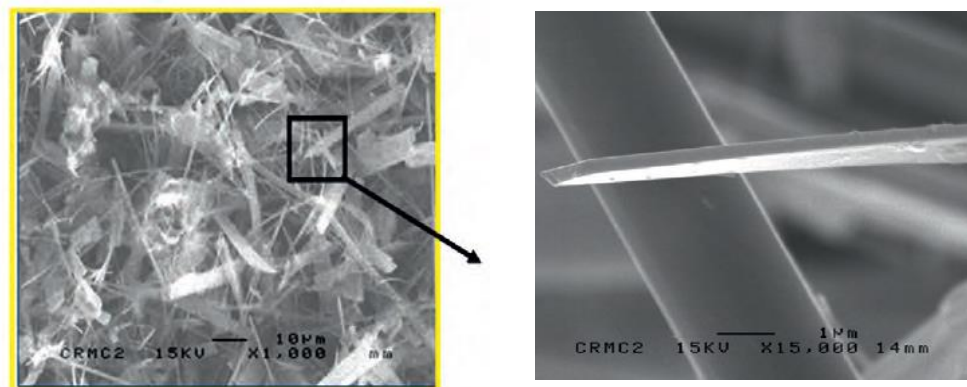


Figure 16 : Dépôts de cristaux à la surface du Biodentine™ après exposition à une salive artificielle de pH 5,3 (Biodentine™: Scientific File).

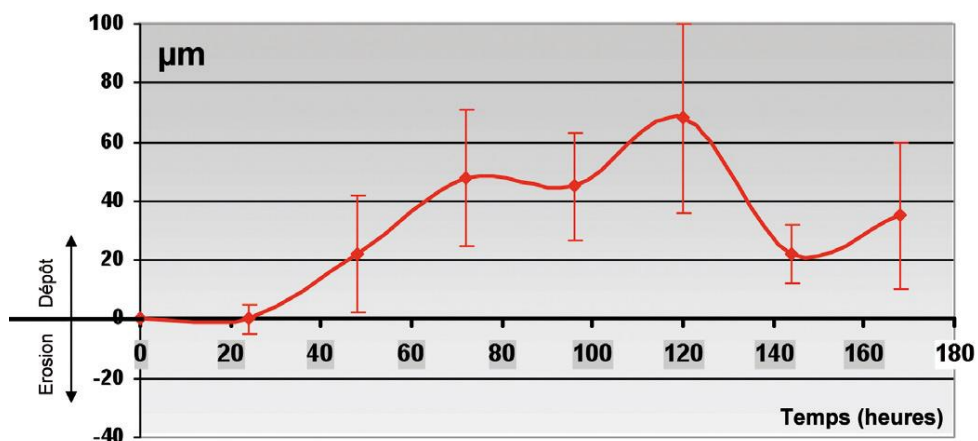


Figure 17 : Evolution de la hauteur de l'échantillon en fonction de la durée d'exposition à la salive artificielle (Colon *et al.*, 2010).

Elnaghy *et al.* (2014) ont étudié l'influence d'un environnement acide sur les propriétés mécaniques du Biodentine™ et du MTA. Des échantillons ont été placés soit dans de la gaze imbibée d'eau distillée (pH 7,4) soit imbibée d'une solution d'acide butyrique (pH 6,4 ; 5,4 ; ou 4,4 selon les groupes). Ils ont ensuite été placés en incubateur à 37°C pendant 7 jours. La micro-dureté et la force de compression ont été mesurées. D'autres échantillons ont été placés au contact de disques de dentine avant leur immersion dans les différentes solutions, afin d'évaluer les variations de l'adhérence en fonction du milieu. Des

observations au MEB ont aussi été réalisées après les immersions. Les mêmes structures cristallines que précédemment sont observées sur le Biodentine™. Les propriétés mesurées diminuent lorsque le pH est bas, mais restent supérieures à celles du MTA (Figure 18).

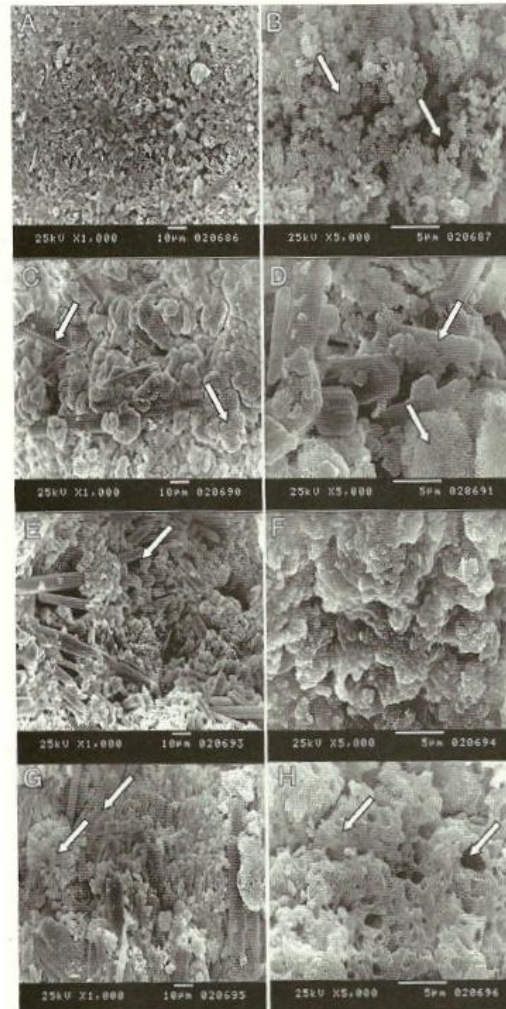


Figure 18 : Observation du Biodentine™ au MEB à deux grossissements (x 1000 à gauche et x 5000 à droite), exposée à un pH de 7,4; 6,4; 5,4; et 4,4 (de haut en bas) (Elnaghy *et al.*, 2014).

Ce phénomène de dépôt de cristaux est prometteur quant à la qualité de l'interface entre le Biodentine™ et la dentine naturelle, comme expliqué dans les paragraphes suivants.

3.4.2. Résistance à la micro-infiltration :

Plusieurs méthodes sont possibles pour évaluer la qualité de l'interface entre le Biodentine™ et d'autres matériaux. L'interface avec la dentine et l'émail est étudié en mesurant la pénétration d'un colorant, le nitrate d'argent, qui est la substance la plus

utilisée pour évaluer l'intégrité de l'interface entre divers matériaux *in vitro* (Goldberg *et al.*, 2009).

Pour cette méthode, des cavités de classe II en mésial et en distal ont été aménagées sur des molaires récemment extraites. Plusieurs groupes ont été réalisés en fonction de plusieurs critères : (i) conditionnement de la cavité avec de l'acide polyacrylique (GC Conditioner, GC Corp.) avant la mise en place du Biodentine™, (ii) application d'un vernis après la prise du Biodentine™ pour protéger le matériau de l'humidité (Optiguard®, Kerr) et (iii) mordantage (Xeno III®, Dentsply ou G Bond™, GC) sur le Biodentine™ avant le placement d'une résine composite (Ceram-X® Mono, Dentsply) un jour après la prise du Biodentine™. Les résultats montrent qu'il n'y a pas de grande différence de pourcentage de micro-infiltration entre l'interface Biodentine™/émail et Biodentine™/dentine. Rien de significatif non plus avec ou sans mordantage à l'acide polyacrylique. L'application de vernis sur le matériau augmente la micro-infiltration à l'interface avec l'émail, mais pas avec la dentine. Cette différence disparaît avec le temps, au bout de 3 mois notamment. Un jour après la mise en place du Biodentine™, il y a plus de micro-infiltration dans l'interface des échantillons mordancés avec G Bond™ qu'avec Xeno III®. La percolation va diminuer au fil du temps et devenir similaire au bout de 3 mois (Goldberg *et al.*, 2009) (Figure 19).

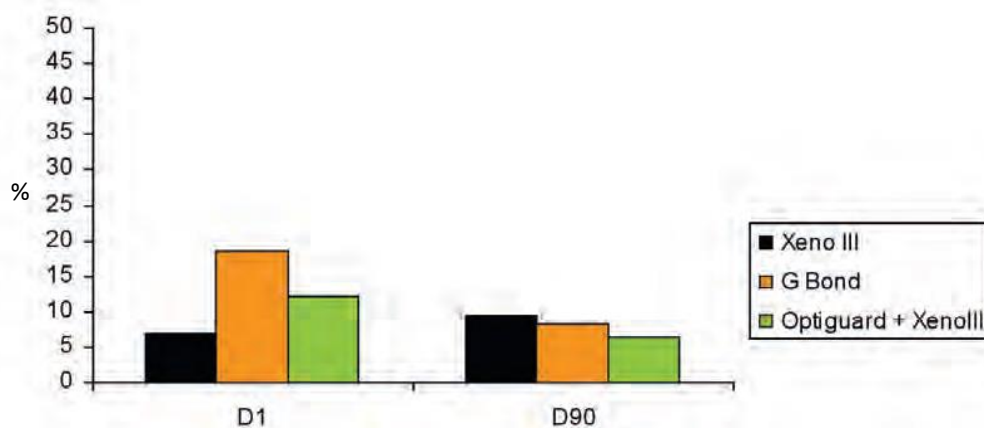


Figure 19 : Pourcentage de micro-infiltration en fonction de l'adhésif et du mordantage utilisé, à 1 et 90 jours (Goldberg *et al.*, 2009).

L'étanchéité à l'interface Biodentine™/surfaces dentaires est donc très bonne, avec ou sans mordantage à l'acide polyacrylique. Cette étanchéité ne varie pas significativement au bout de 3 mois.

Raskin *et al.* (2012) ont comparé la résistance à la micro-infiltration du Biodentine™ et d'un CVIMAR (Fuji II LC®, GC Corp.). La pénétration de nitrate d'argent a été évaluée en mesurant la profondeur de pénétration (de 0 : pas de pénétration, à 3 : pénétration complète de l'interface). Des cavités de classe II en mésial et distal ont été réalisées sous la jonction amélo-cémentaire, sur 42 molaires extraites. Les dents ont été réparties dans 6 groupes, en fonction des matériaux placés en fond de cavités. Les matériaux sont ensuite recouverts de résine composite (Filtek™ Z250, 3M ESPE) pour réaliser une obturation en

sandwich ouvert. Les matériaux utilisés en fond de cavité sont : Biodentine™; Fuji II LC®; Biodentine™ + Optibond® Solo Plus (Kerr); Biodentine™+ Optibond® Solo Plus + silane; Biodentine™ + Septobond™ SE (Septodont) ; Fuji II LC® + Optibond® Solo Plus (Figure 20).

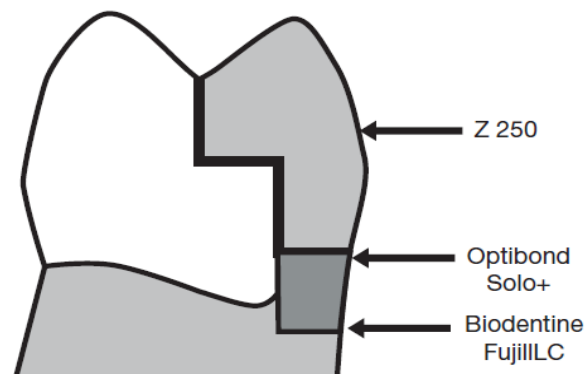


Figure 20 : Schéma de l'obturation et des interfaces. Le Z250 est placé systématiquement, avec en fond de cavité du Biodentine™ ou du Fuji II LC®, recouverts ou non par de l'Optibond® Solo Plus (Biodentine™: Scientific Files).

Plusieurs observations sont faites à la vue des résultats. Le Biodentine™ a une meilleure étanchéité que le CVIMAR, au niveau de l'interface avec l'émail ou la dentine. La résistance aux micro-infiltrations est similaire à l'interface Biodentine™/résine et Biodentine™/CVIMAR, avec un mordantage à l'Optibond® Solo Plus. Cependant, avec l'application d'un adhésif auto-mordançant (Septobond™ SE) entre les deux matériaux, l'étanchéité est moins importante (Raskin *et al.*, 2012) (Figure 21).

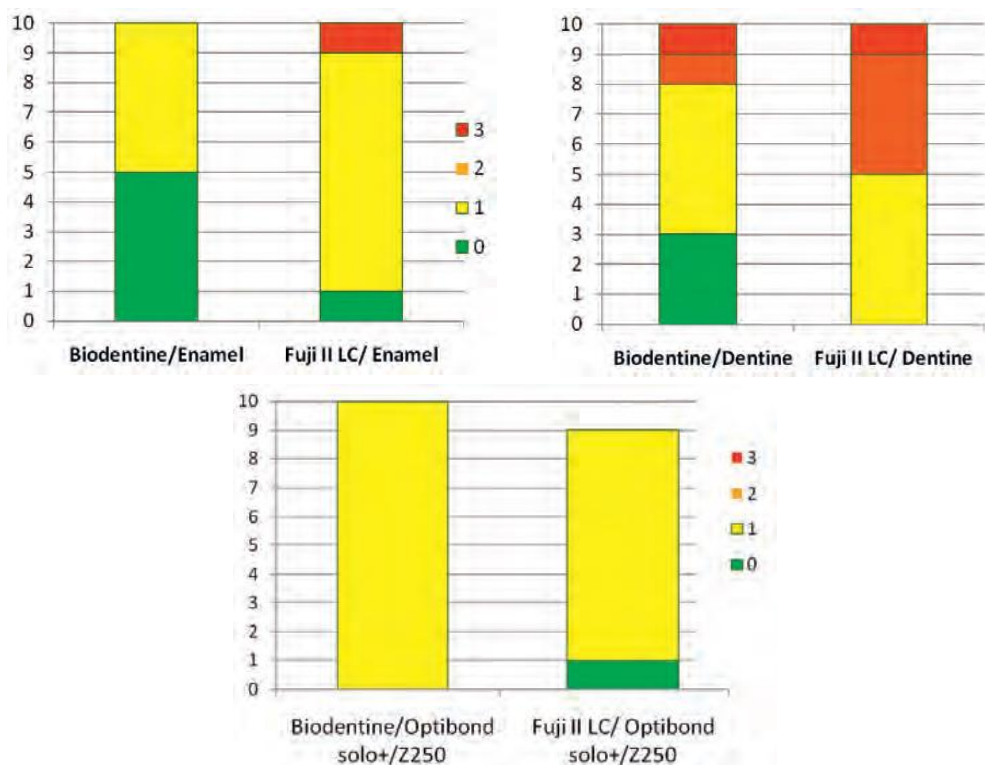


Figure 21 : Score de micro-infiltration lors d'une adhésion du Biodentine™ avec l'émail, la dentine et une résine composite (Z250) (Biodentine™: Scientific Files).

Le Biodentine™ a donc une propriété de résistance à la micro-infiltration similaire aux CVIMAR quelles que soient les interfaces testées (émail, dentine, ou adhésif).

3.5. Biocompatibilité :

Un matériau biocompatible est capable de fonctionner dans une application spécifique avec une réponse favorable de l'hôte (Archien *et al.*, 2004). La norme ISO 7405:2008 décrit les protocoles de tests pour un biomatériau voué à rester en contact avec les tissus à long terme, soit plus de 30 jours.

3.5.1. Cytotoxicité (ISO 7405, ISO 10993-5) :

Plusieurs études ont été menées pour mesurer la cytotoxicité du Biodentine™.

La première compare les effets du Biodentine™, de MTA (ProRoot MTA® Dentsply) et d'hydroxyde de calcium (Dycal®, Dentsply) sur des fibroblastes humains issus de pulpe de dents de sagesse. Les résultats, en détectant les cellules vivantes grâce au sel de tétrazolium MTT, montrent que le Biodentine™ et le MTA ne sont pas cytotoxiques, contrairement à l'hydroxyde de calcium qui affecte 22% des fibroblastes. L'expression de certaines protéines par les fibroblastes (collagène, sialoprotéine dentinaire (DSP) et ostéonectine (OSN)) ont été observées au contact du Biodentine™ et du MTA, après 4 semaines d'exposition des matériaux aux cellules (About, 2003 ; Biodentine™: Scientific file) (Figure 22).

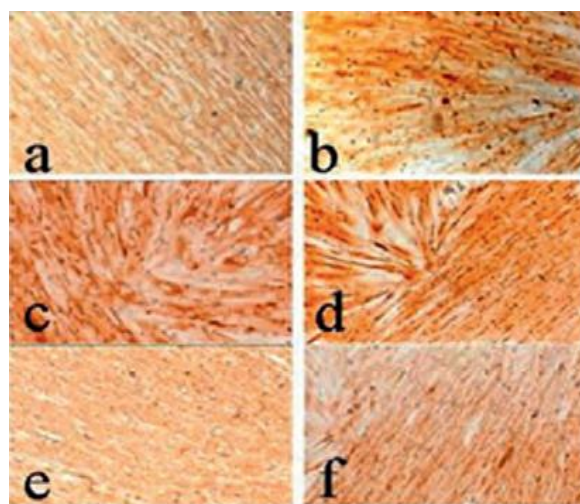


Figure 22 : Expression de collagène (gauche) et de DSP (droite) après contact avec du Biodentine™ (c, d) et MTA (e, f). Le groupe de contrôle est visible en a et b (About, 2003).

La deuxième étude consiste à exposer le Biodentine™, du MTA et de la résine composite Filtek™ Z250 à des fibroblastes. Les échantillons sont extraits au bout de 3h, 24h et 7 jours après la mise en place des matériaux. La survie des cellules est mesurée avec du sel MTT. Le Biodentine™ n'a pas de toxicité (moins de 10% de mort cellulaire) et ce indépendamment de la durée d'exposition des cellules au matériau (Franquin, 2003 ; Biodentine™: Scientific file).

Laurent *et al.* (2008) ont comparé la cytotoxicité du Biodentine™ à d'autres matériaux utilisés pour le coiffage pulpaire : MTA et hydroxyde de calcium (Dycal®). Avec une interposition de dentine, aucun de ces matériaux n'est cytotoxique mais sans interposition, Dycal® est cytotoxique, contrairement au Biodentine™ (Biodentine™: Scientific file).

Ainsi, ces études montrent l'absence de cytotoxicité du Biodentine™ au contact de fibroblastes pulpaire et de cellules pulpaire spécialisées et que l'expression des protéines fibroblastiques pulpaire n'est pas altérée.

3.5.2. Tests de sensibilisation (ISO 7405, ISO 10993-10) :

Une étude a été réalisée sur des cochons d'Inde par application d'échantillons de matériau au contact de la peau et en intradermique. L'évaluation de l'œdème et de l'érythème a été réalisée à 24h puis à 48h, sur une échelle clinique de 0 à 4. Le potentiel de sensibilisation du matériau est calculé grâce au pourcentage d'animaux sensibilisés (à partir d'un score clinique de 2). Le Biodentine™ n'a pas de potentiel allergisant mis en évidence par les tests (Gomond, 2003 ; Biodentine™: Scientific file).

3.5.3. Tests de génotoxicité (ISO 7405, ISO 10993-3, OCDE 471) :

Un test d'Ames a été effectué sur des souches de *Salmonella typhimurium* et *Escherichia coli*. Ce test permet d'évaluer le potentiel mutagène d'une substance en l'exposant à des souches bactériennes porteuses d'une mutation qui leur empêche de synthétiser de l'histidine. Certaines bactéries vont alors muter à leur tour au contact du matériau ou spontanément, puis produire de l'histidine. Le pourcentage de bactéries à nouveau mutantes révélera le potentiel mutagène du produit. Parfois un extrait de foie de rongeur appelé « S9-Mix » est ajouté au milieu de culture, pour mieux métaboliser l'échantillon à tester. Les souches TA98, TA100, TA1537, TA1535, pKM101, ont ainsi été mises en présence d'un échantillon du Biodentine™, sans qu'un effet mutagène ne soit observé (Harmand, 2003 ; Laurent *et al.*, 2008 ; Biodentine™: Scientific file).

Un autre test d'Ames a été réalisé sur des souches TA97A, TA98, TA100 et TA102 de *Salmonella typhimurium*. Là encore, le Biodentine™ ne présente pas de génotoxicité, en présence ou non de S9-Mix (Laurent *et al.*, 2008 ; Biodentine™: Scientific file).

Un test des micronoyaux a été réalisé sur des lymphocytes humains (Laurent *et al.*, 2008). Les cellules ont été exposées à des échantillons du Biodentine™ préparés avec un milieu de culture ou du diméthylsulfoxyde (DMSO). Ces échantillons sont dilués à 1% et 5%. Après 72h, les cellules sont prélevées et analysées. 1000 lymphocytes sont examinés, afin de détecter une anomalie nucléaire, ou un micronoyau. Un indice de toxicité est établi, en comparaison avec le nombre de micronoyaux dans un milieu témoin sans agent toxique. Après incubation, le nombre de lymphocytes ayant un micronoyau est similaire aux résultats obtenus en milieu négatif (3,9% à 4,1%), quelles que soient les concentrations en Biodentine™ et le milieu d'incubation (Biodentine™: Scientific file).

Le test des comètes, qui consiste à mesurer par électrophorèse les cassures d'ADN causées par un agent génotoxique a été effectué sur des fibroblastes pulpaire humains. (About, 2003). Un extrait du Biodentine™ est préparé avec du DMSO et un milieu de culture, à une concentration de 50mg/ml pendant 24h à 37°C. Les cellules sont exposées au matériau à différentes concentrations pendant deux heures. Après électrophorèse, les lames sont observées au microscope à fluorescence, puis les lésions de l'ADN sont analysées. Les résultats montrent que le pourcentage de longueur des brins d'ADN varie de 12,59% pour une solution de matériau à 1% et 15,58% pour une solution non diluée. Ce qui est similaire à la longueur détectée lors d'une exposition à une solution sans matériau. Il n'y a donc pas de potentiel mutagène mis en évidence avec le Biodentine™ (Biodentine™: Scientific file).

3.5.4. Tests d'irritation cutanée, oculaire et orale (ISO 7405, ISO 10993-10, ISO 10993-11, OCDE 405, OCDE 423) :

Des tests d'irritation cutanée ont été réalisés sur des lapins par application cutanée directe du matériau. L'apparition d'un œdème est évaluée à 1h, 24h, 48h et 72h. Aucune irritation n'a été mise en évidence (Gomond, 2003 ; Biodentine™: Scientific file).

Les tests d'irritation oculaire consistent à appliquer une goutte de 0,1 mL de la partie liquide du Biodentine™ (avant mélange du matériau) sur la muqueuse oculaire de lapins. On évalue ensuite la corrosion ou l'irritation de cette muqueuse (rougeur, chémosis conjonctival, lésions de l'iris et de la cornée) après une exposition de 1h, 24h, 48h et 72h. Après le test, le Biodentine™ n'est pas considéré comme un irritant chimique oculaire (Fagette, 2009 ; Biodentine™: Scientific file).

Enfin, l'irritation orale du matériau est réalisée en administrant une dose du matériau de 2g/kg à des rats. Ces rats sont examinés immédiatement après l'absorption, puis après

1h, 2h, 3h, 4h et chaque jour pendant 14 jours. Ce test ne montre pas de toxicité orale du Biodentine™ (Gomond, 2003 ; Biodentine™: Scientific file).

3.5.5. Relargage de métaux :

Le relargage de certains métaux par le Biodentine™ a été étudié, conjointement avec le MTA Angelus® (Camillieri *et al.*, 2012). Dans cette étude, le taux de relargage d'arsenic, de plomb et de chrome a été mesuré dans une solution acide, puis dans une solution neutre.

D'abord, les poudres et les liquides des matériaux ont été mesurés par spectrométrie de fluorescence X (EDXRF, Bruker S2 Ranger, Bruker Corporation). Ensuite, des échantillons de chaque matériau ont été préparés et placés en incubation à 37°C pendant 24h, puis réduits en poudre et mélangés à une concentration de 50mL d'acide chlorhydrique à 2,4 mol/L, pour 2 grammes de matériau. Après 16h d'incubation, la solution est passée en centrifugeuse puis les concentrations en arsenic, plomb et chrome ont été mesurées par spectrométrie de masse (ICP-MS, Agilent 4500, Agilent Technologies). Ces concentrations sont également mesurées dans 10 mL d'une solution saline équilibrée, servant de témoin, à 37°C pendant 28 jours (HBSS H6648, Sigma Aldrich) (Figure 23).

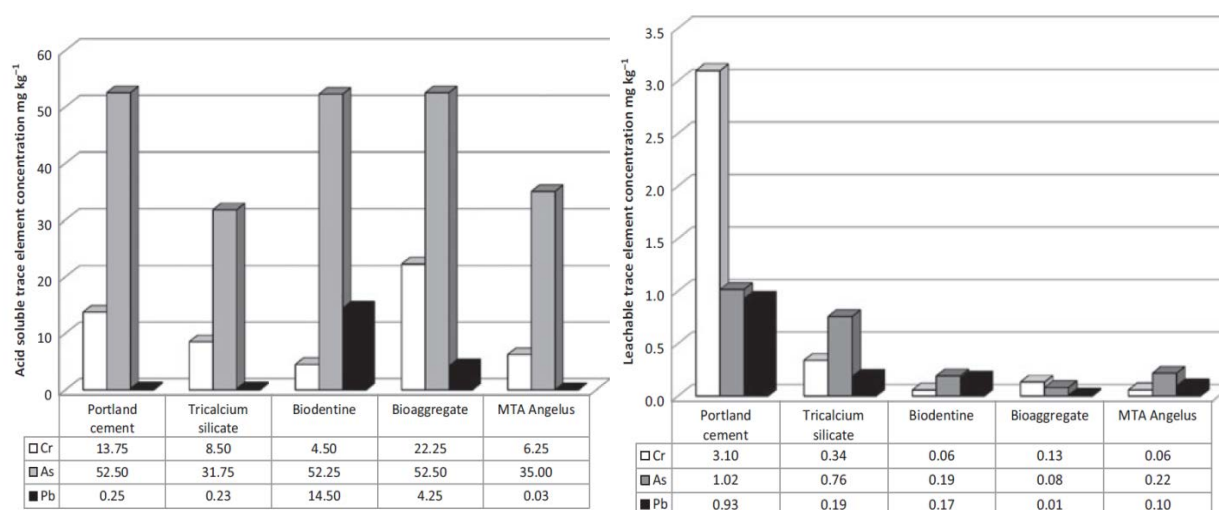


Figure 23 : Libération d'éléments métalliques dans une solution acide et tampon (Camillieri *et al.*, 2012).

Les résultats montrent que la présence d'éléments tels que le plomb, le chrome et l'arsenic est très faible dans des conditions simulant le milieu buccal, ce qui permet donc l'utilisation de ces matériaux au contact des tissus humains (Camillieri *et al.*, 2012).

3.5.6. Relargage d'ions silicium et calcium :

Les ions calcium et un pH alcalin auraient un effet positif sur la formation de tissus durs (Estrela *et al.*, 1995). L'induction de la formation de tissus durs par les ions silicium est encore mal décrite, bien qu'ils aient un rôle supposé dans la calcification osseuse (Carlisle *et al.*, 1970 ; Patel *et al.*, 2002). Ces ions induisent aussi la reminéralisation de la dentine *in vitro* (Saito *et al.*, 2003).

Une étude a évalué la capacité du Biodentine™ et d'autres ciments au silicate de calcium à libérer ces ions : ProRoot MTA® (Dentsply) et EndoSequence® BC Sealer (BC sealer) (Han et Okiji, 2011). Des disques de racines de dents humaines sont sectionnés sur 3 mm d'épaisseur, puis nettoyées et débarrassées de la pulpe. Les matériaux sont ensuite placés dans le canal pulpaire. Les échantillons (20 par matériau et 5 témoins) sont placés pendant 4h (24h pour BC Sealer) dans un milieu à 100% d'humidité avant d'être placés dans une solution saline tampon (solution PBS : 136.4 mmol/L NaCl, 2.7 mmol/L KCl, 8.2 mmol/L NaH₂PO₄ et 1.25 mmol/L KH₂PO₄ dans 1000 mL d'eau distillée ; pH 7.4). Les précipités à la surface des matériaux sont récupérés après 14 jours dans la solution PBS puis observés et analysés avec un microscope électronique à balayage (SEM-EPMA, EPMA1601; Shimadzu). Les interfaces dentine/matériau ont aussi été analysées de la même façon, pour mesurer la profondeur du relargage d'ions dans les canalicules dentinaires. D'autres échantillons, 5 par matériau, ont été préparés (4h à 24h pour BC Sealer, à 100% d'humidité) puis placés dans 10mL d'eau distillée. Les concentrations en silicium et calcium dans l'eau distillée ont été mesurés de 0 à 168h. Ces analyses montrent un plus grand relargage de ces ions par le Biodentine™ et une pénétration plus profonde du matériau dans les canalicules dentinaires. Ce phénomène va permettre au matériau une liaison sans préparation avec la dentine, comme expliqué plus bas.

Khan *et al.* (2012) ont mesuré le pH du Biodentine™ ainsi que sa capacité à libérer des ions calcium, en comparaison avec du ProRoot MTA® et du MTA gris (Dentsply). Les échantillons ont été placés dans des tubes en plastique remplis d'eau distillée. Le pH avant immersion est de 6,8 et aucun ion calcium n'est présent. Les mesures ont été réalisées après immersion de 3 heures, 6 heures et 7 jours. Le Biodentine™ a un pH de 9,1 environ qui décroît à 8 au bout de 7 jours. De même, le relargage d'ions calcium décroît lentement. La réaction de prise du matériau, qui génère de l'hydroxyde de calcium, explique ce pH alcalin, ainsi que la libération d'ions (Koubi *et al.*, 2013).

3.6. Propriétés biologiques :

3.6.1. Liaison à la dentine :

Il a été observé que les ciments à base de silicate de calcium interagissent avec la dentine pour s'y lier sans préparation préalable. Ils vont ainsi pénétrer dans les canalicules dentinaires pour renforcer cette liaison. Les relargages d'ions précédemment décrits semblent jouer un grand rôle dans cette liaison.

Une étude a comparé l'interaction avec la dentine d'un CVI (Fuji IX®) et du Biodentine™ (Atmeh *et al.*, 2012). Des cavités occlusales ont été préparées sur 49 dents humaines. Ces dents sont nettoyées par ultrasons pendant 5 min. 31 cavités sont obturées avec le Biodentine™ et 18 avec le CVI, sans mordantage préalable. Puis, les échantillons sont placés en incubateur à 37°C pendant 24h avant d'être sectionnés pour l'observation au microscope. 10 disques de dentine sont préparés avec d'autres dents extraites, 5 sont mis en contact avec le Biodentine™ et les 5 autres avec le CVI. Les disques sont plongés 4 jours dans de l'eau distillée à 37°C avant d'être sectionnés perpendiculairement à l'interface dentine/matériau. Avant l'observation les échantillons sont séparés en plusieurs groupes. Dans le premier groupe, une solution de 0,25% de rhodamine B est placée dans la cavité pulpaire ouverte des échantillons obturés par le Biodentine™ (n=10) et par le CVI (n=5). Ces échantillons sont placés en environnement humide pendant 3h pour laisser la rhodamine B pénétrer à travers l'interface. Dans le second groupe, le Biodentine™ (n=10) et le CVI (n=5) sont mélangés avec 1 mg de fluorescéine avant d'être appliqués dans les cavités. Un MEB permet d'observer la structure de l'interface dentine/matériau. Un microscope confocal (TSM, Noran Instruments) est utilisé pour observer le premier groupe et un microscope confocal à balayage laser (CLSM, Leica Microsystems) permet l'observation du second groupe. Un groupe sans ajout de produit fluorescent est aussi préparé, seulement avec les ciments comblant la cavité dentinaire (5 échantillons par ciment). Un microscope à fluorescence est utilisé pour l'observation de ces échantillons. Enfin, un dernier groupe (n=6 pour le Biodentine™ et n=3 pour le CVI) est placé 8 jours dans de l'eau distillée à 37°C. Ce groupe est analysé par micro-spectroscopie Raman (Renishaw®) (Figures 24, 25).

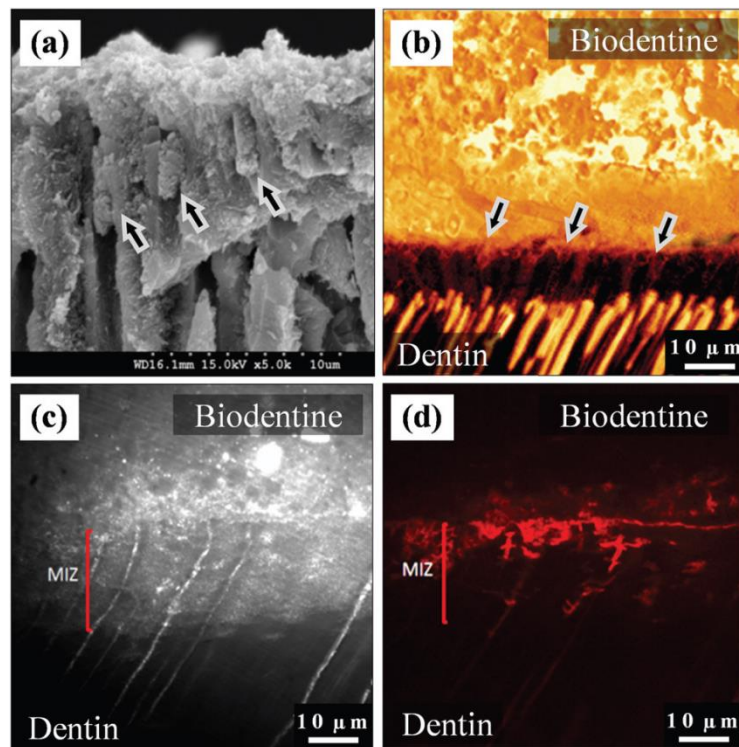


Figure 24 : (a) Observation au MEB montrant la pénétration du Biodentine™ dans les canalicules dentinaires, ici le matériau est fracturé. (b) Image fluorescente au microscope confocal montrant les mêmes structures. (c) Zone d'infiltration minérale (MIZ) au microscope TSM. (d) Infiltration de rhodamine-B observée par fluorescence (Atmeh *et al.*, 2012).

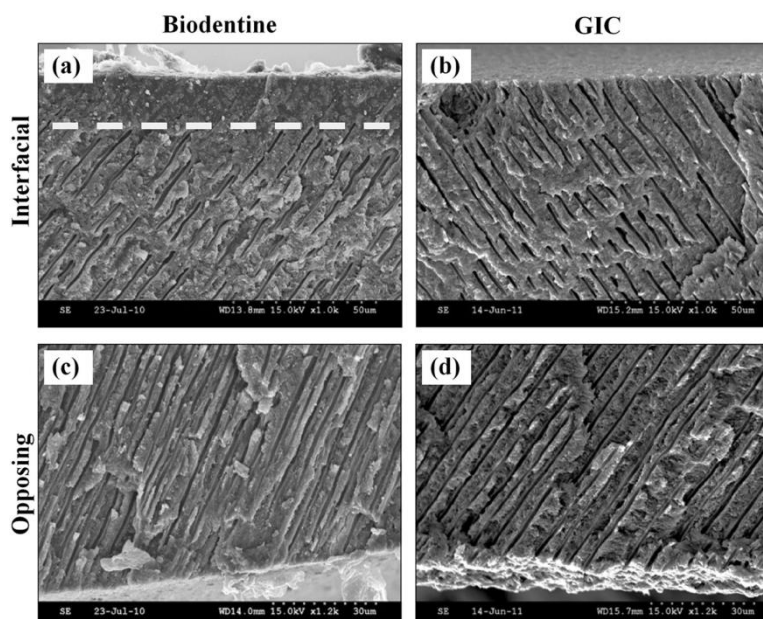


Figure 25 : Observation au MEB de l'interface avec la dentine (a et b) et au côté opposé (c et d), pour le Biodentine™ (gauche) et le CVI (droite) (Atmeh *et al.*, 2012).

Les images au microscope montrent une bande fluorescente entre le Biodentine™ et la dentine, mais moins évidente au niveau de l'interface CVI/dentine. Cette bande de 5 à 15 μm , le long de l'interface Biodentine™/dentine, est révélatrice d'une modification des propriétés fluorescentes du collagène de la dentine. Avec de la rhodamine dans la chambre pulpaire, au microscope CLSM, on observe une infiltration dans les canalicules dentinaires et

dans l'interface au niveau du matériau, mais très peu dans la dentine intertubulaire. Enfin, par analyse au MEB, la bande de dentine altérée se retrouve au contact du Biodentine™, mais pas au contact du CVI. Sur cette bande, les canalicules sont oblitérés. L'analyse spectrométrique montre une pénétration des deux matériaux dans la dentine : du carbonate de calcium et de l'hydroxyde de calcium pour le Biodentine™ et des sels d'acide polyacrylique et tartrique pour le CVI. Cette pénétration se fait sur une distance d'une cinquantaine de microns pour les deux matériaux. Ces observations sont expliquées par la structure et la réaction de prise du Biodentine™. En effet, pendant ce temps de prise, le gel CSH non cristallisé va pénétrer dans les canalicules jusqu'à sa précipitation. L'apparition d'une bande fluorescente, appelée zone d'infiltration minérale, est expliquée par le changement des propriétés optiques de la dentine. Le pH élevé de l'hydroxyde de calcium libéré par la réaction de prise va dénaturer le collagène dentinaire. Cet effet est beaucoup moins important au niveau de la dentine périrtubulaire, plus minéralisée (Atmeh *et al.*, 2012).

D'autres images au MEB à fort grossissement (Goldberg *et al.*, 2009) confirment cette présence de structures minéralisées au sein des canalicules (Figure 26).

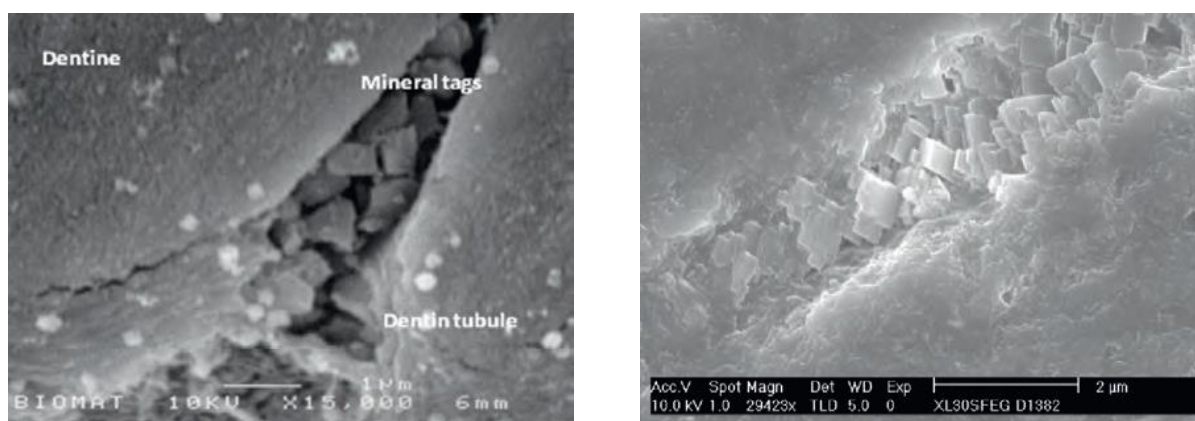


Figure 26 : Interface Biodentine™/dentine observée au MEB (Goldberg *et al.*, 2009).

C'est donc le pH alcalin du matériau pendant sa réaction de prise et la pénétration du matériau dans les canalicules dentinaires qui vont permettre au Biodentine™ d'avoir une étroite interaction avec la dentine.

3.6.2. Stimulation de la dentinogenèse :

Un modèle de culture a été créé pour observer les différentes étapes de la régénération dentinaire après exposition pulpaire. Des troisièmes molaires immatures ont été extraites et placées dans un milieu de culture, l'ouverture de l'apex permettant aux nutriments du milieu de passer de façon plus efficace que pour un apex mature édifié. Un marqueur, le 5-bromo-20-désoxyuridine (BrdU) est placé dans le milieu de culture pendant

un jour le temps qu'il se fixe sur les cellules progénitrices pulpaire. Au bout de deux semaines, par observation au microscope optique, ces cellules sont trouvées dans les vaisseaux sanguins aux alentours de la cavité d'exposition. Puis au bout de 4 semaines, elles sont retrouvées sous la cavité. Dans les échantillons de dents témoins avec ou sans cavité dentinaire et sans exposition pulpaire, un tel recrutement de cellules progénitrices dans les vaisseaux ne se produit pas (Téclès *et al.*, 2005) (Figure 27).

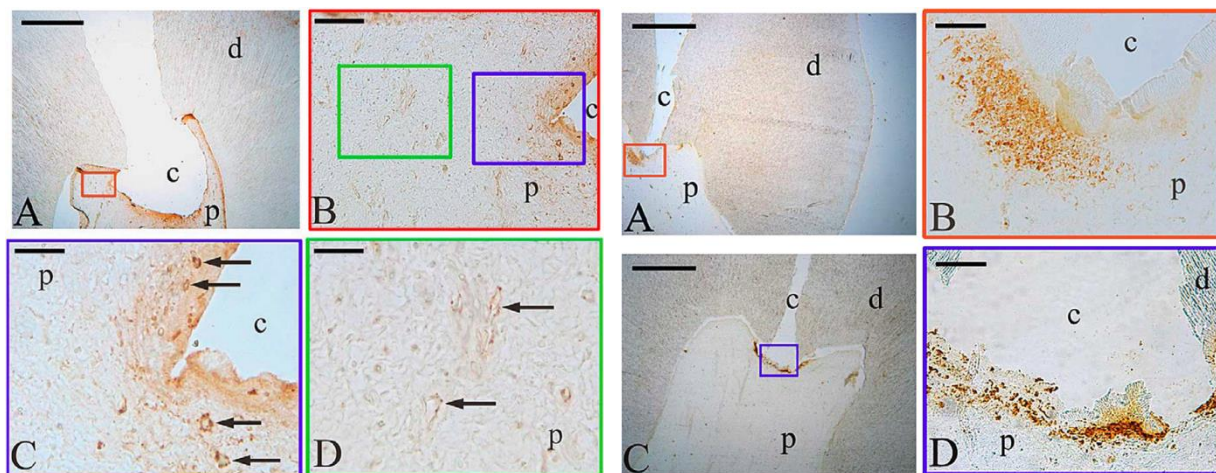


Figure 27 : Migration des cellules progénitrices observée au microscope optique (Téclès *et al.*, 2005).

Laurent *et al.* (2011) ont utilisé ce type de modèle de culture pour comparer la capacité du Biodentine™, du ProRoot MTA® et de la résine composite (Xeno III®) à stimuler la dentinogenèse par coiffage pulpaire direct et plus précisément à stimuler la sécrétion de facteur de croissance TGF- β 1. Les dents extraites ont été placées dans un milieu de culture enrichi en antibiotiques. Sur chaque dent, une perforation pulpaire est réalisée et du matériau placé en coiffage (soit le Biodentine™, soit le MTA, soit la résine composite). Puis les dents sont surveillées pendant 2 jours, 14 jours et 28 jours (5 dents par groupe), en changeant le milieu de culture chaque jour. Pour observer la différenciation des cellules pulpaire et évaluer la synthèse de dentine réparatrice, des anticorps marqués ont été ajoutés au tissu dentaire avant son sectionnement pour observation au microscope optique. Ces anticorps sont dirigés contre des protéines témoignant de ces phénomènes : le collagène de type I, l'ostéonectine, la sialoprotéine dentinaire et la nestine, qui sont des protéines caractéristiques de la matrice extra-cellulaire dentinaire (About, 2013). Le marqueur sera ensuite révélé chimiquement avant observation. Des anticorps anti TGF- β 1 ont été utilisés pour quantifier cette molécule avec la méthode ELISA. Cette méthode permet de quantifier des molécules en leur associant des anticorps marqués, dont la concentration sera mesurée par spectrophotométrie.

2 jours après le coiffage pulpaire avec le Biodentine™, pour 2 échantillons sur 5, la coloration à l'hémaroxiline/éosine révèle dans la pulpe des nodules de minéralisation, petits et denses, juste sous le matériau. Ces nodules sont observés dans tous les échantillons à partir de 14 à 28 jours, plus nombreux et plus gros. De petites cavités remplies de cellules

sont présentes dans les nodules. Les protéines dentinaires marquées sont observées en grande quantité aux environs de ces nodules. La nestine est fortement présente dans les cellules au centre des nodules. Le Biodentine™ stimule donc fortement la sécrétion de TGF- β 1, indépendamment de la surface de biomatériau en contact avec la pulpe. Cette sécrétion est également observée avec le MTA, mais moins avec la résine (Laurent *et al.*, 2011) (Figure 28).

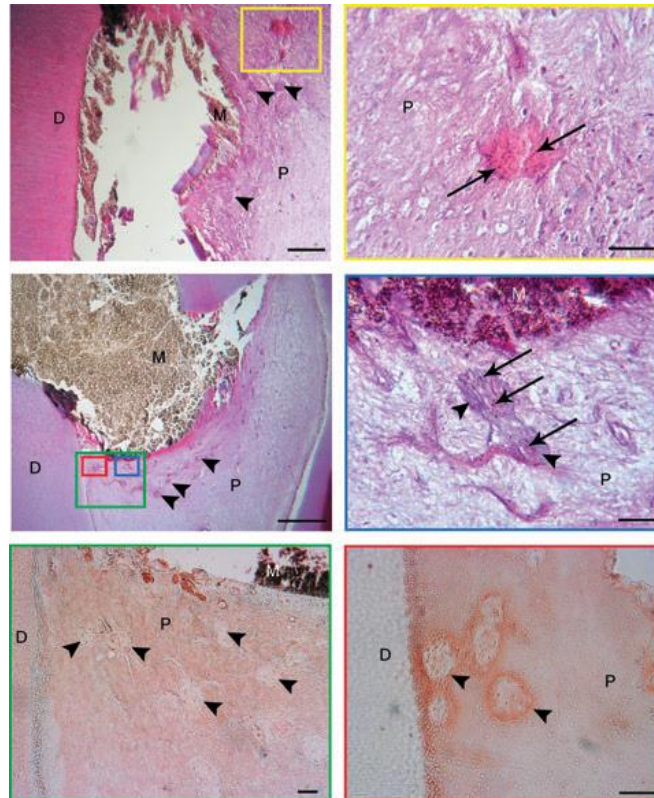


Figure 28 : Observation de nodules de minéralisation au contact du Biodentine™, au microscope optique. Les flèches montrent les nodules (a, b). 2 jours après exposition, (c, d) 14 jours après exposition. D : dentine, P : pulpe, M : matériau (Laurent *et al.*, 2011)

Cette expérience montre que la dentinogenèse réparatrice induite par le Biodentine™ est similaire à celle induite par le MTA et l'hydroxyde de calcium, ainsi qu'à la dentinogenèse réparatrice *in vivo*. Les molécules détectées dans les nodules de minéralisation sont révélatrices d'une réparation du tissu dentinaire. De plus, les particules du Biodentine™ semblent emprisonnées dans les nodules et non dans le tissu pulpaire ou dans des macrophages, comme c'est le cas avec des monomères de résine (Kitasako *et al.*, 2006). Le Biodentine™ semble ainsi être intégré par les cellules pulpaires. A propos des mécanismes de déclenchement de cette minéralisation du tissu pulpaire, seules des hypothèses peuvent être émises : le relargage d'ions calcium et silicium par des matériaux à base de silicate de calcium semble stimuler la différenciation des cellules progénitrices pulpaires en odontoblastes, puis augmenter la sécrétion du facteur TGF- β 1 (Laurent *et al.*, 2011).

Une autre expérience de Laurent *et al.* (2008) a également permis d'étudier la différenciation des fibroblastes pulpaire en présence du Biodentine™. Des anticorps anti-nestine, anti-collagène de type I et anti-sialoprotéine dentinaire ont été utilisés pour observer les protéines dentinaires. Les échantillons de fibroblastes pulpaire ont été observés avant et après exposition au Biodentine™ et une expression plus importante des protéines dentinaires a été observée.

Enfin, Tran *et al.* (2012) ont étudié la formation de dentine tertiaire après coiffage pulpaire avec du Biodentine™ *in vivo*, chez le rat. Du ProRoot MTA® et de l'hydroxyde de calcium mélangé à du sérum physiologique à 0,9% ont été utilisés en comparaison. 27 rats mâles ont été anesthésiés puis une cavité de 0,6 mm sur chaque première molaire a été creusée, jusqu'à exposition pulpaire. Chaque cavité a été obturée par coiffage pulpaire avec du Biodentine™, du MTA ou de l'hydroxyde de calcium. Puis les matériaux ont été recouverts de CVI (Fuji IX®). Puis les rats sont euthanasiés à 7, 14 et 28 jours. Les molaires sont prélevées puis préparées pour une observation au microscope optique. Des anticorps marqués sont utilisés pour observer l'expression de plusieurs molécules dentinaires : sialoprotéine dentinaire (DSP) et ostéopontine (OPN). Des zones nécrotiques sont observées au contact des matériaux, mais décroissent avec le temps, surtout au niveau des matériaux à base de silicate de calcium. Après 7 jours, pour les échantillons coiffés avec du MTA et du Biodentine™, les fibres de collagène s'organisent en paquets au niveau du site d'exposition pulpaire. Après 2 semaines sur ces mêmes échantillons, une dentine réparatrice homogène est observable sous les matériaux en continuité avec la dentine adjacente. Le tissu pulpaire sous-jacent ne présente plus de cellules inflammatoires ou nécrosées. Dans le groupe d'échantillons à 7 jours, on peut observer une concentration de DSP et d'OPN au niveau des paquets de fibrilles de collagène, sous le Biodentine™. Enfin, dans les échantillons prélevés à 14 jours, des cellules polarisées contenant ces deux molécules sont observables sous le matériau (Figure 29).

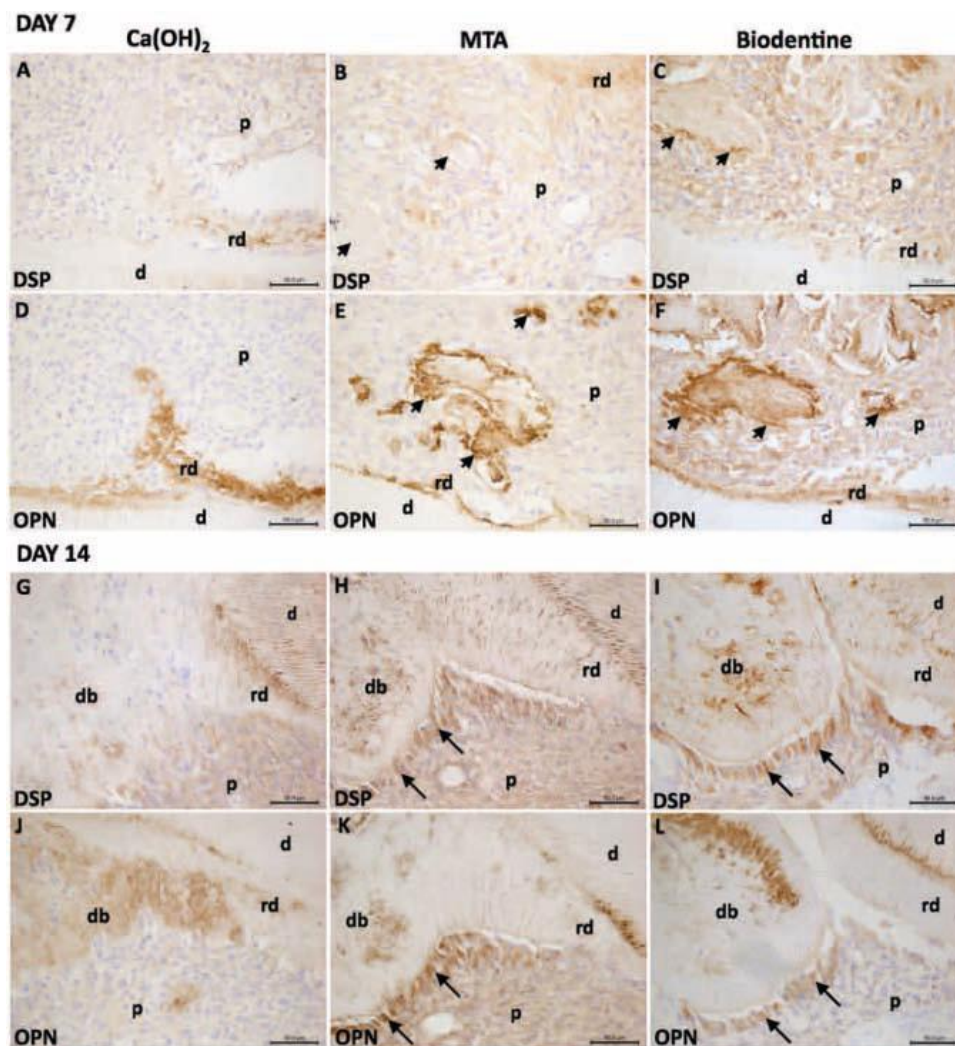


Figure 29 : Observation au microscope optique de l'expression de DSP et OPN au contact des trois matériaux, à 7 et 14 jours d'exposition aux matériaux. Les flèches correspondent aux cellules positives aux molécules correspondantes. P : pulpe, d : dentine, db : pont dentinaire, rd : dentine réactionnelle (Tran *et al.*, 2012).

La dentine réparatrice sécrétée sous le matériau reste localisée au site d'agression. Cette dentine présente des canalicules et les cellules sont polarisées, comme des odontoblastes et sécrètent des DSP.

Les cellules nécrotiques présentes sur les échantillons prélevés au 7^e jour sont dues au pH alcalin de l'hydroxyde de calcium libéré par la réaction de prise du Biodentine™. Ce relargage alcalin diminue avec le temps, au fur et à mesure du durcissement (Tran *et al.*, 2012). Ainsi, dans un organisme vivant, le Biodentine™ semble biocompatible et tout à fait utilisable pour un coiffage pulpaire direct (Figure 30).

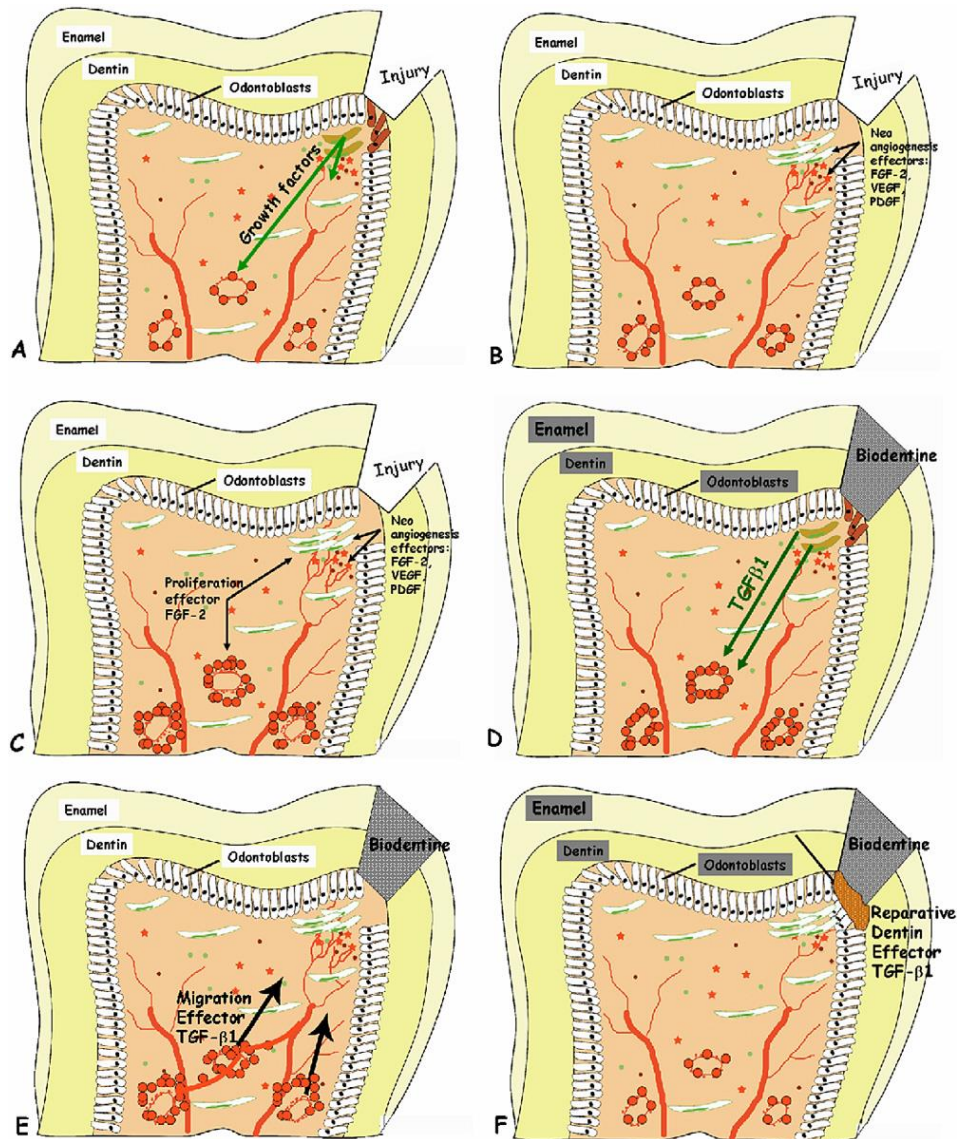


Figure 30 : Schéma de la stimulation de la dentinogenèse réactionnelle au contact du Biodentine™ (About, 2013).

3.6.3. Altération de la matrice collagénique de la dentine :

Leiendecker *et al.* (2012) ont étudié les effets sur les fibres de collagène dentinaires de deux ciments au silicate de calcium : MTA Plus™ (Prevest-Denpro®, Jammu City, Inde) et le Biodentine™. Des blocs de dentine humaine sont préparés puis mis en contact avec chaque matériau. L'ensemble dentine/matériau est placé dans un tube contenant 400 µL de milieu de culture à 37°C et prélevé au bout de 24 h, 1, 2 et 3 mois. Le milieu de culture permet d'éviter la prolifération bactérienne et son pH est neutre. Les peptides collagéniques sont dosés dans le milieu après le prélèvement, par détermination de la concentration d'hydroxyproline. En effet, le collagène de type I constitue 90% de la masse protéinique dentinaire et l'hydroxyproline est présente surtout dans ce collagène (Butler, 1984), ce qui permet d'estimer l'altération des fibres. Les résultats montrent une augmentation de la

concentration de cette protéine dans le milieu de culture, ce qui révèle une fragmentation et donc une fragilisation du collagène au contact des matériaux à long terme. L'observation au microscope électronique à transmission (MET) de l'interface matériau/dentine montre aussi une dégradation du collagène sur quelques microns (Figure 31).

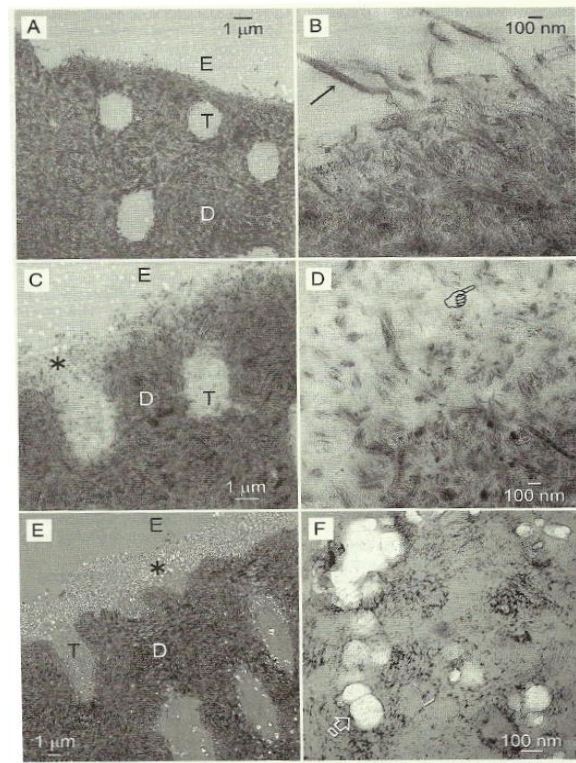


Figure 31 : Observation au MET (grossissement plus fort à droite) de blocs de dentine déminéralisés après 3 mois d'exposition au MTA (C, D) ou au Biodentine™ (E, F) A et B sont des blocs témoins. L'astérisque est une zone de collagène dégradé, le grossissement de cette zone confirme cette dégradation (flèches et pointeur) (Leiendecker *et al.*, 2012).

L'altération du collagène semble être due au relargage d'hydroxyde de calcium par les ciments au silicate de calcium et donc par le Biodentine™. Ce relargage élève le pH du milieu et déminéralise localement la dentine, ce qui fragilise le collagène. Cependant les concentrations d'hydroxyproline relevées lors de l'expérience sont relativement faibles par rapport au volume de dentine. De plus, les observations au MET ne montrent qu'une dégradation au contact du matériau et non pas en profondeur (Leiendecker *et al.*, 2012).

Sawyer *et al.* (2012) ont étudié la résistance à la flexion de la dentine après exposition à deux ciments au silicate de calcium : le Biodentine™ et MTA Plus™ (Prevest-Denpro®, Jammu City, Inde). 160 plaques de dentine ont été préparées à partir de dents humaines et mis en contact avec des plaques de MTA ou du Biodentine™ de dimension similaire pendant 24h, 1, 2 ou 3 mois, dans un incubateur à 37°C et 100% d'humidité. 8 groupes d'échantillons sont donc testés. Un test de résistance à la flexion est réalisé en exposant la face de dentine au contact des matériaux à une force de tension. Ainsi,

différents paramètres sont mesurés : le module d'élasticité, le module de dureté (capacité à résister à la fracture) et la résistance à la flexion (Figure 32).

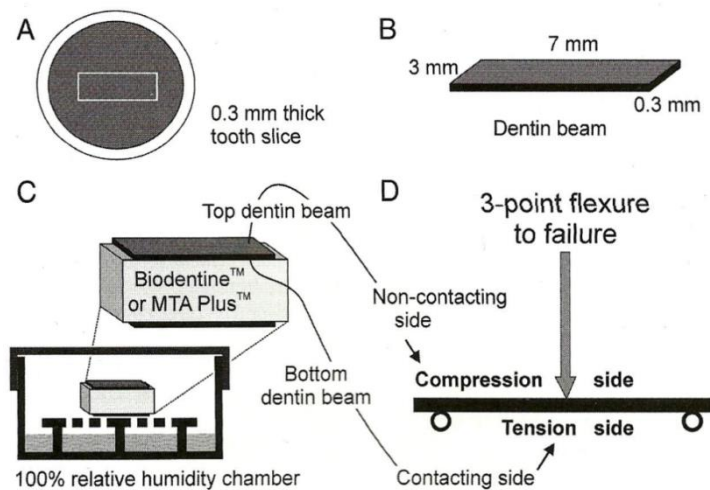


Figure 32 : Schéma du test de flexion d'un échantillon de dentine exposé au Biodentine™ ou au MTA Plus™. A, B: dimensions de l'échantillon. C: Dentine placée en incubateur, au contact du matériau. D: Test de flexion (Sawyer et al., 2012).

On observe une diminution de la résistance à la flexion et du module de dureté lorsque la dentine est exposée à long terme aux matériaux, mais pas de variation significative du module d'élasticité (Figure 33). Les auteurs attribuent ces résultats à l'altération de la matrice collagénique dentinaire par l'hydroxyde de calcium libéré lors de la réaction de prise des ciments au silicate de calcium.

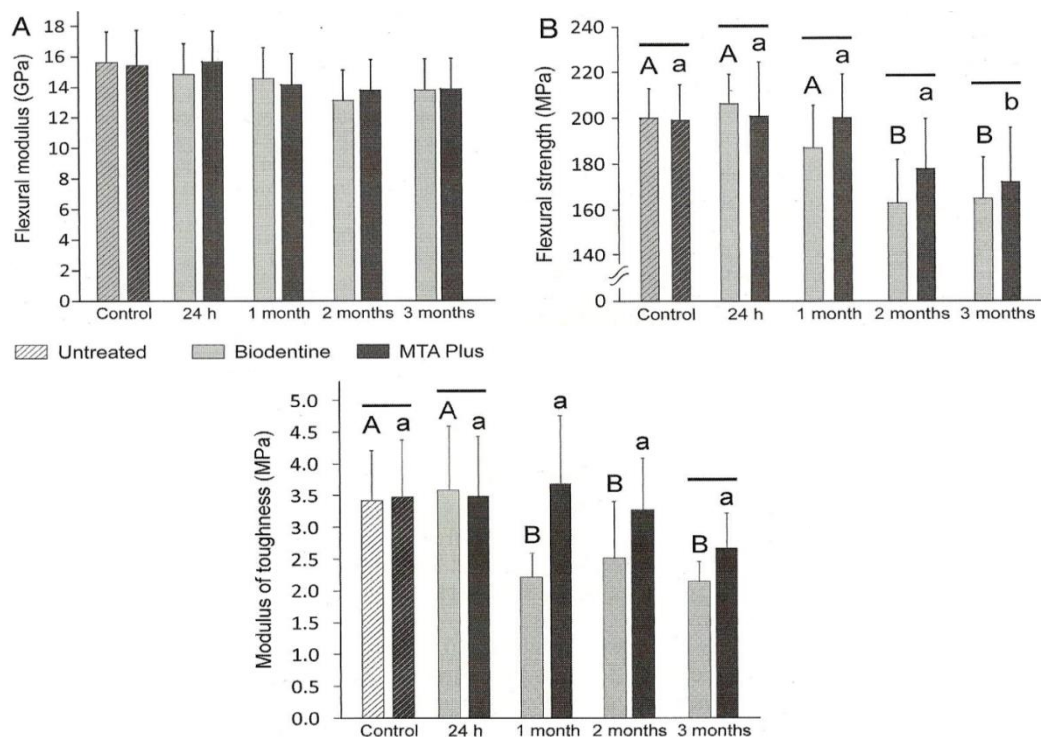


Figure 33 : Module d'élasticité, résistance à la flexion et module de dureté de la dentine en fonction du temps et de son exposition au Biodentine™ ou au MTA Plus® (Sawyer et al., 2012).

3.7. Comparatif des propriétés de la dentine, du Biodentine™ et du MTA :

Les différences de propriétés entre les formes commerciales du MTA ne sont pas significatives, car leur composition chimique est similaire. Chaque propriété a été mesurée lors de la même étude et certaines valeurs n'étaient pas mesurables pour le MTA lors d'une même étude. Les valeurs des propriétés sont indicatives et varient parfois selon les études pour une même propriété (Tableau 2).

Tableau 2 : Comparatif de différentes propriétés entre la dentine, le Biodentine™ et le MTA.

Propriétés	Dentine	Biodentine™	MTA
Résistance à la flexion (MPa) (Biodentine™ : Scientific file)	-	34	Non mesurable
Module d'élasticité (GPa) (Biodentine™ : Scientific file)	18,5	22	Non mesurable
Résistance à la compression à 24h (MPa) (Biodentine™ : Scientific file)	297	213,7	56,1 (ProRoot MTA®)
Micro-dureté Vickers (Biodentine™ : Scientific file)	60	60,9	Non mesurable
Porosité (%) (Biodentine™ : Scientific file)	-	6,8	22,6 (ProRoot MTA®)
Temps de prise (minutes) (Biodentine™ : Scientific file)	-	10	175 (ProRoot MTA®)
Radio-opacité (mm d'Al) (Tanalp <i>et al.</i> , 2013)	-	2,8	5 (MM-MTA®)
Couleur (Keskin <i>et al.</i> , 2015 ; Vallés <i>et al.</i> , 2013)	-	Peu de variation	Variation importante (ProRoot MTA, MTA Angelus®)
Toxicité (Biodentine™ : Scientific file)	-	Non	Non (ProRoot MTA®)
Libération de métaux lourds (Camillieri <i>et al.</i> , 2012)	-	Non significative	Non significative (MTA Angelus®)
Pénétration d'ions dans les canalicules dentinaires (Han et Okiji, 2011)	-	Oui	Oui, moins importante (ProRoot MTA®)

Ce tableau confirme les conclusions établies dans les paragraphes précédents : les propriétés mécaniques du Biodentine™ sont comparables à celles de la dentine, mais supérieures à celles du MTA, notamment la résistance à la compression qui est plus importante pour le Biodentine™, et sa porosité qui est plus faible. Le temps de prise du MTA est nettement supérieur à celui du Biodentine™. Les variations colorimétriques sont plus importantes pour le MTA que pour le Biodentine™. Certaines caractéristiques sont similaires : les deux matériaux ne sont pas toxiques et présentent une bonne liaison avec la dentine. Enfin, l'inconvénient du Biodentine™ par rapport au MTA est sa radio-opacité limitée. Certaines études de cas cliniques que nous évoquerons plus bas mentionnent ce manque de radio-opacité, notamment lors des contrôles post-opératoires d'obturations radiculaires *a retro*.

4. Indications cliniques :

Le fabricant indique plusieurs applications pour le Biodentine™ (Septodont. Biodentine™: notice d'utilisation):

- Substitut dentinaire et coiffage pulpaire indirect
- Coiffage pulpaire direct
- Pulpotomie
- Réparation des perforations et résorptions
- Apexification
- Obturation radiculaire *a retro*

Des études de cas à propos d'obturation de sillons palato-radiculaires avec le Biodentine™ ont également été publiées, ce qui semble ajouter un champ d'application à ce matériau (Johns *et al.*, 2014 ; Naik *et al.*, 2014). Cette partie tend à décrire les protocoles cliniques pour chaque indication, en les illustrant de cas cliniques.

4.1. *Substitut dentinaire :*

Pour les restaurations carieuses postérieures importantes, les résines composites sont couramment utilisées. Cependant l'utilisation de ces matériaux restent limitée par une résistance à l'usure insuffisante lors de fortes contraintes, une rétraction lors de la polymérisation (appelé facteur C), un manque d'étanchéité par liaison à la dentine et une libération de monomères libres toxiques dans le tissu pulpaire (Dewaele *et al.*, 2014).

Un substitut dentinaire peut être utilisé en technique sandwich ouverte ou fermée pour pallier à ces inconvénients. Il doit permettre la protection des tissus pulpaire et la réduction du facteur C. Il doit pouvoir être mis en place rapidement et acquérir dans les plus brefs délais de bonnes propriétés biologiques et mécaniques. Il doit aussi être compatible avec les systèmes adhésifs et pouvoir rehausser les limites cervicales d'une restauration sous-gingivale (Koubi *et al.*, 2011). Ainsi, Les bonnes propriétés mécaniques et biologiques du Biodentine™ permettent de poser la question de son utilisation en tant que substitut dentinaire.

4.1.1. Etude de Koubi *et al.* (2013)

Koubi *et al.* ont publié en 2013 une étude prospective à propos de l'utilisation du Biodentine™ comme matériau de restauration sur les dents postérieures. Les auteurs ont

étudié la résistance du Biodentine™ dans le temps en tant que restauration postérieure et notamment sa résistance aux forces de mastication. La résine Z100® a été utilisée pour permettre au Biodentine™ de jouer le rôle de substitut dentinaire. L'étude a commencé en 2005 sur 400 patients des services d'odontologie Gaston Berger du CHU de Marseille et Garancière-Rothschild à Paris. Les patients ont été sélectionnés selon plusieurs critères : consentement éclairé du patient quant à sa participation à l'étude, âge de 18 à 80 ans, indication de restauration directe définitive occlusale ou occluso-proximale sur dents postérieures vitales. Les lésions carieuses doivent être confirmées radiologiquement et un test de vitalité pulpaire, devant être positif, est réalisé avant le soin. Les critères de non-inclusion à cette étude sont l'impossibilité clinique de réaliser une restauration avec du Biodentine™ ou Z100®, une allergie ou hypersensibilité à ces matériaux ou à l'un de leurs composants, une forte maladie parodontale, un refus de restauration définitive et un antécédent de traitement par radiothérapie.

Les patients ont été répartis aléatoirement pour recevoir une obturation soit avec du Biodentine™, soit avec Z100®. Les cavités et les obturations ont été réalisées selon les exigences cliniques en vigueur pour une restauration en résine composite et selon les consignes des fabricants des matériaux utilisés. Une radiographie de contrôle est prise après l'obturation. Ensuite, des contrôles cliniques sont réalisés à 15 jours, puis 6, 12, 24 et 36 mois. Les évaluations ont porté sur plusieurs critères et un score a été donné pour chaque critère : plus le score est élevé, moins il est acceptable (Figures 34-38). Les paramètres évalués sont :

- la consistance, le temps de travail, l'adhésion aux instruments et la facilité de travail (0 à 3) ;
- la forme anatomique de la restauration (0 à 3, acceptable jusqu'à 1) ;
- l'adaptation marginale (0 à 4, acceptable jusqu'à 2) ;
- la qualité du point de contact proximal (en cas de restauration occluso-proximale, 0 à 4, acceptable jusqu'à 2) ;
- la coloration marginale (0 à 3, acceptable jusqu'à 2) ;
- la rugosité de surface (0 à 3, acceptable jusqu'à 1) ;
- la présence de caries secondaires (0 à 1, la note de 1 correspond à une lésion donc n'est pas acceptable)
- la douleur post-opératoire (0 à 2, acceptable jusqu'à 1).

En tout, 397 patients ont été suivis, dont 212 pendant au moins 12 mois. Les résultats de l'étude concernent ces derniers patients. 77 personnes ont eu des cavités occlusales et 135 des cavités occluso-proximales. 96 patients d'un âge moyen de 36 ans ont été soignés avec du Biodentine™ et 116 avec Z100®.

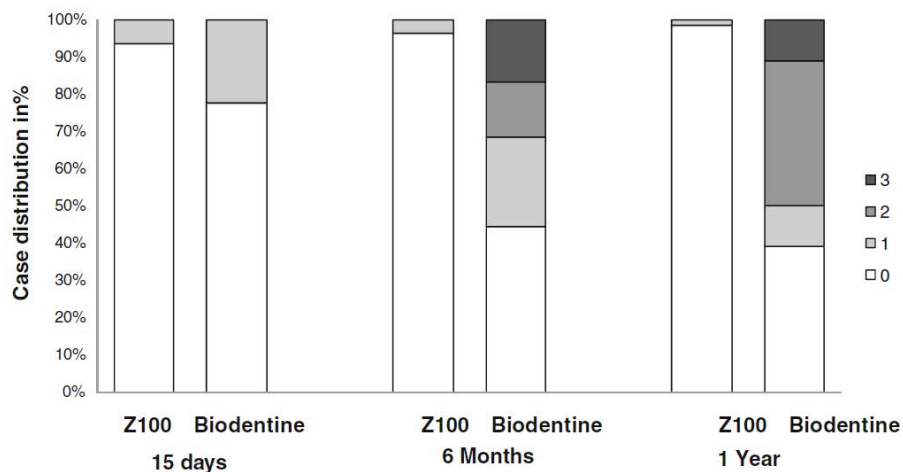


Figure 34 : Score de la forme anatomique (Koubi *et al.*, 2013)

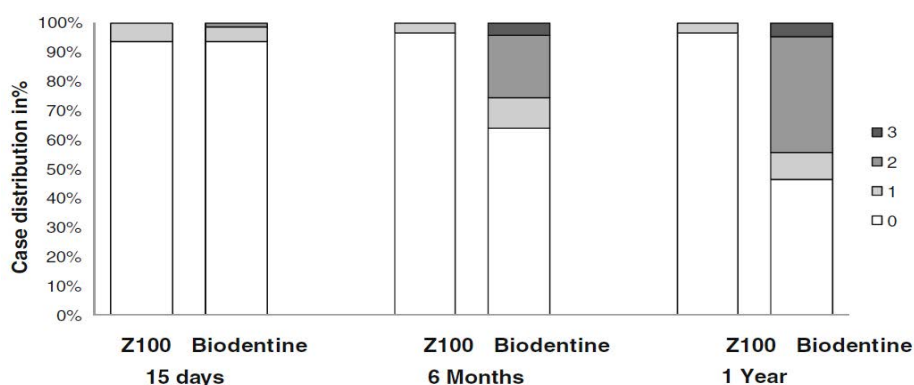


Figure 35 : Score de l'adaptation marginale (Koubi *et al.*, 2013).

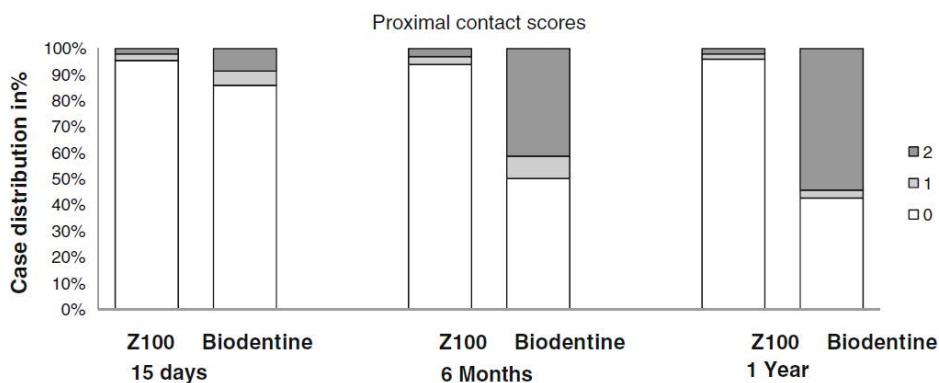


Figure 36 : Score de la qualité du point de contact (Koubi *et al.*, 2013).



Figure 37 : Score de la coloration de l'interface (Koubi *et al.*, 2013).

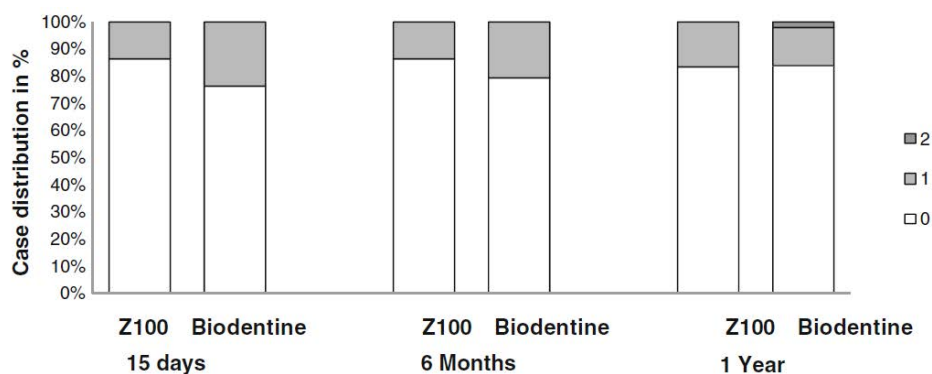


Figure 38 : Score de l'état de surface (Koubi *et al.*, 2013).

La manipulation et la mise en place du Biodentine™ semble aussi aisée que celle du Z100®. Mais l'état de surface du matériau, sa forme anatomique ainsi que les zones proximales présentent des scores de moins en moins bons au fil du temps. En effet, 80 restaurations avec du Biodentine™ ont dû être recouvertes avec Z100® au bout de plusieurs mois. Les causes de ce traitement complémentaire sont surtout liées à la faible résistance mécanique du Biodentine™ : d'abord l'abrasion du matériau, puis la qualité du point de contact et la fracture du matériau (Figure 39).

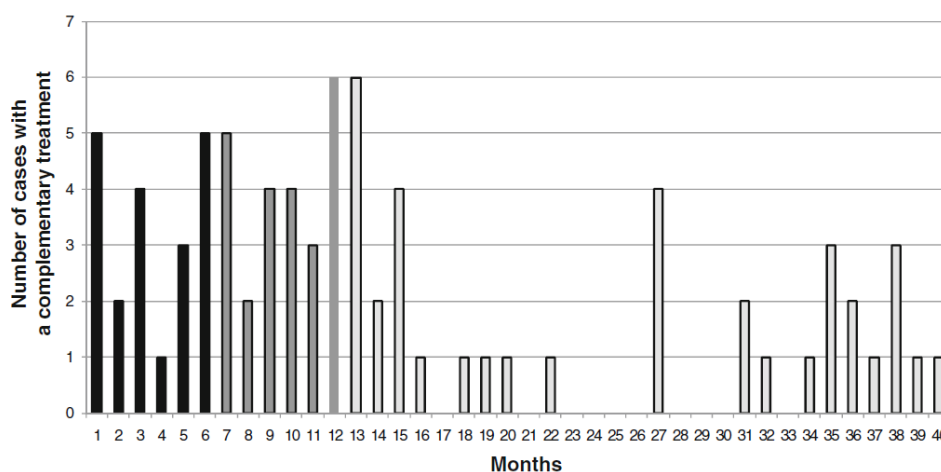


Figure 39 : Nombre de cas ayant nécessité un recouvrement du Biodentine™ par Z100 en fonction des mois (Koubi *et al.*, 2013).

Plusieurs études ont été réalisées pour déterminer la capacité d'adhésion du Biodentine™ aux résines composites. Hashem *et al.* (2013) ont étudié la force d'adhésion du matériau en fonction du moment où la résine est collée à l'échantillon puis en fonction du moment où l'adhésif est mis en place. Le test a été réalisé avec deux types d'adhésifs auto-mordants nécessitant un mordantage préalable. Aucune différence significative n'a été mesurée quel que soit le type d'adhésif, ou le moment où il est appliqué. Par contre, plus le moment de la mise en place de la résine sur le Biodentine™ est tardif, plus la force d'adhésion sera grande, ce qui confirme les résultats de l'étude de Koubi *et al.* (2012).

Odabas *et al.* (2013) ont étudié la force d'adhésion du Biodentine™ avec plusieurs types d'adhésifs : un système mordantage/rinçage en deux étapes, un système auto-mordant en deux étapes et un système auto-mordant en un seul temps. Les mesures ont été faites pour un collage sur le Biodentine™ juste après son temps de prise (12 minutes) et après 24 h. Là encore, les résultats montrent que plus le collage est réalisé longtemps

après la prise du Biodentine™, plus il est solide. De plus, le système auto-mordant en deux étapes étudié permet un meilleur collage (Clearfil™ SE Bond, Kuraray Noritake Dental Inc). Cependant cette étude n'est pas exhaustive du fait de la grande variabilité des compositions des systèmes adhésifs.

Kayahan *et al.* (2013) ont étudié la résistance à la compression du Biodentine™ après mordantage à l'acide orthophosphorique à 37% pendant 15 secondes et rinçage à l'eau distillée pendant 15 secondes. Aucune variation significative par rapport à la résistance à la compression sans mordantage n'a été mesurée.

Sous des restaurations indirectes de type inlay/onlay souvent volumineuses l'utilisation du Biodentine™ comme substitut dentinaire doit être limitée, notamment à cause de l'altération des propriétés mécaniques à long terme de la dentine par le matériau, décrites plus haut. Cependant, une épaisseur réduite de matériau en coiffage pulpaire direct sous ces restaurations peut être envisageable (Decup *et al.*, 2014).

4.1.2. Etude de cas de Koubi et al. (2011)

Un cas de pose d'inlay en résine composite sur du Biodentine™ a été décrit par Koubi *et al.* en 2011. La patiente, âgée de 54 ans et venue se plaindre pour des douleurs au chaud, au froid et à la pression sur sa deuxième molaire mandibulaire droite (47). Les examens clinique et radiographique révèlent la présence d'une carie juxtapulpaire sous une ancienne obturation à la résine composite, avec invagination de la gencive dans la cavité carieuse en mésial. Une obturation avec du Biodentine™ est réalisée de la même façon que pour l'étude prospective de Koubi *et al.* (2013). A 6 et 12 mois, le test de vitalité est positif. A 18 mois une légère usure du matériau est observée en proximal. Une préparation pour inlay est réalisée, avec 3 mm de matériau laissé au-dessus du joint cervical proximal, au vu de la bonne santé gingivale au contact du Biodentine™. Puis l'inlay en résine composite est collé une semaine plus tard (Figure 40).

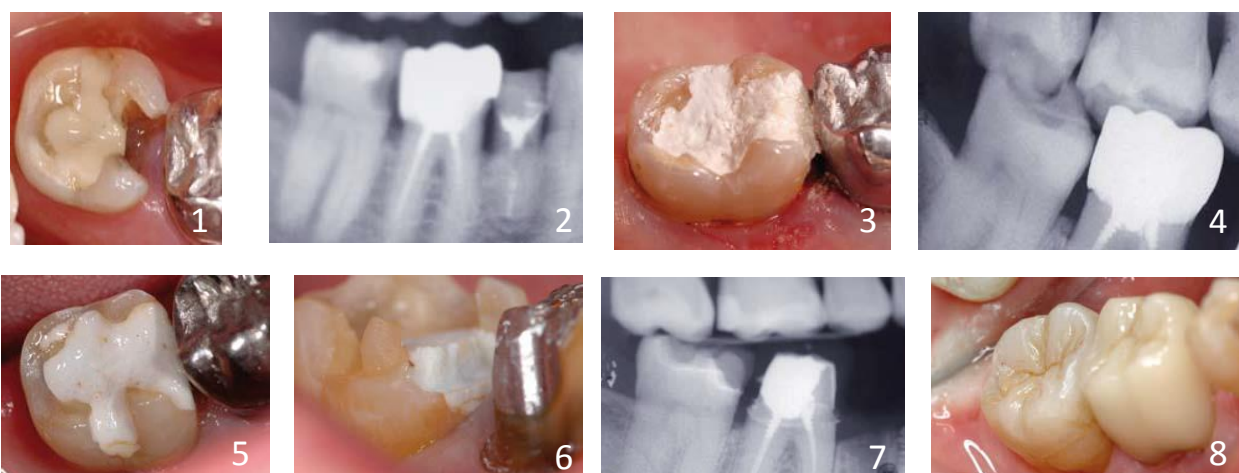


Figure 40 : (1) Etat initial: carie sous ancienne obturation. (2) Radiographie pré-opératoire. (3) Biodentine™ mis en place. (4) Radiographie post-opératoire. (5) Biodentine™ à 18 mois. (6) Taille de la cavité pour l'inlay. (7) Radiographie de l'inlay collé. (8) Vue vestibulaire de l'inlay après collage (Koubi *et al.*, 2011).

Au vu de ces études, nous pouvons conclure que le Biodentine™ est un bon matériau de coiffage pulpaire indirect, grâce à ses bonnes propriétés mécaniques et sa biocompatibilité pulpaire. Mais pour les soins définitifs, il est plus indiqué comme substitut dentinaire en raison de sa mauvaise tolérance aux forces occlusales et à l'abrasion.

4.1.3. Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire indirect avec du Biodentine™

Tableau 3 : Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire indirect avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Koubi <i>et al.</i> , 2012	96	Etude multicentrique prospective randomisée, afin d'évaluer l'utilisation du Biodentine™ en tant que substitut dentinaire.	80 obturations avec Biodentine™ seul altérées à 1 an. 1 cas de carie secondaire.
Hashem <i>et al.</i> , 2015	36	Essai clinique randomisé pour comparer l'efficacité du Biodentine™ et d'un CVI (Fuji IX®) en coiffage indirect après pulpite réversible.	6 nécroses un an après.
Roubalikova, 2012	3	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire.	Aucun symptôme à 6 mois.
Levin, 2012	9	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire.	Aucun symptôme à 3 mois.
Spirollari, 2012	2	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire.	Aucun symptôme à 1 an pour un patient, à 16 mois pour l'autre.
Denga <i>et al.</i> , 2013	30	Evaluation d'un traitement des caries profondes chez des patients avec d'importants antécédents allergiques, comparaison entre Biodentine™ et une résine composite (Grandio, VOCO).	Aucun symptôme post-opératoire, reminéralisation des tissus à 12 mois (analyse spectro-colorimétrique)
Bakopoulou et About, 2013 et 2014	6	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire sous de la résine composite pour 2 cas, des inlays en résine composite pour 2 cas et des couronnes céramo-métalliques (CCM) pour 2 cas.	Aucun symptôme à 6 mois et un an.
Boutsiouki <i>et al.</i> , 2013	1	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire sous un onlay en céramique.	Aucun symptôme à 6 mois.
Banerji, 2014	1	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, en tant que substitut dentinaire sous une résine composite.	Aucun symptôme à 2 ans.
Cauwels et Martens, 2014	2	Soin de caries profondes sans exposition pulpaire, un cas concernant une 46 immature.	Aucun symptôme à un mois et un an.

4.2. Coiffage pulpaire direct :

Les expositions pulpaire ont plusieurs causes : la maladie carieuse, les traumatismes dentaires et les expositions iatrogènes. Une exposition et d'autant plus si elle est large et/ou ancienne, peut provoquer une inflammation pulpaire par contact avec le milieu buccal et les toxines bactériennes. Le rôle du coiffage direct pulpaire est de permettre la dentinogenèse réparatrice en formant un pont dentinaire sous le matériau utilisé. Le pronostic dépend de la biocompatibilité du matériau de coiffage, de l'élimination de l'inflammation et du contrôle de l'infection locale (Simon *et al.*, 2008).

Le Biodentine™, de par son absence de toxicité, sa capacité à stimuler la dentinogenèse et son étanchéité semble être un matériau de choix pour cette indication. Aucune étude clinique concernant le coiffage pulpaire direct n'a encore été publiée, mais plusieurs rapports de cas ont été traités avec du Biodentine™.

4.2.1. Suite à un traumatisme :

4.2.1.1. Etude de cas de Borkar *et al.* (2015)

Cette étude de cas porte sur le coiffage pulpaire direct d'incisives centrales ou latérales maxillaires permanentes matures suite à une exposition pulpaire prolongée d'origine traumatique. Les quatre cas étudiés sont similaires : les patients sont des hommes âgés de 18 à 26 ans et leur traumatisme est survenu 5 à 8 jours auparavant. Les dents sont toujours vitales et ne présentent pas de fractures radiculaire. Le protocole de soins est similaire pour les 4 cas. Après consentement éclairé du patient quant à la réalisation d'un coiffage pulpaire, l'incisive concernée est anesthésiée, isolée du milieu buccal par une digue et la pulpe inflammatoire est éliminée sur 2 mm avec une fraise diamantée. Puis, la bonne santé pulpaire est à nouveau vérifiée par la présence d'un saignement après fraisage. Ce saignement est ensuite stoppé par rinçage au sérum physiologique et application de cotons stériles pendant 5 minutes. Le Biodentine™ est ensuite placé immédiatement au contact de la pulpe, en le laissant prendre pendant 20 minutes. Les fragments fracturés sont reconstitués avec de la résine composite, collée par un adhésif auto-mordant. Dans un des cas décrits le fragment de couronne a été conservé et a pu être recollé (Figure 41).



Figure 41 : Etapes du coiffage pulpaire avec du Biodentine™ d'une 11 mature, suivi d'une reconstitution à la résine composite. Les trois radiographies respectivement: pré-opératoire, post-opératoire et 18 mois plus tard (Borkar *et al.*, 2015).

Le suivi post-opératoire est réalisé à 24h, 7 et 30 jours, puis à 3, 6, 9, 12 et 18 mois. Lors de ce suivi, des tests de percussion et électrique vérifient l'absence de douleur et la réponse pulpaire aux *stimuli*. Une radiographie rétro-alvéolaire vérifie l'intégrité de l'apex et l'absence de lésion péri-apicale et desmodontale. Ce suivi n'a révélé aucun symptôme significatif post-opératoire. Pour deux cas, une opacité adjacente au Biodentine™ suggère une formation de pont dentinaire. Pour les deux autres cas, il n'y a pas de pont dentinaire distinct, mais une radio-opacité plus importante de la pulpe adjacente au matériau.

4.2.1.2. Etudes de cas de Bhat *et al.* (2014) et Cauwels et Martens (2014)

Les cas de ces deux études sont similaires. Les patients, fille ou garçon, sont âgés de 7 à 8 ans et présentent une fracture amélo-dentinaire d'une incisive maxillaire survenue lors d'un choc. L'exposition pulpaire est récente (moins de 24h) et l'exposition pulpaire mesure jusqu'à 1 mm. Les *stimuli* douloureux décrits par les patients sont déclenchés par le froid ou à la percussion. Il n'y a pas de mobilité ni de fracture radiculaire. Le protocole opératoire est le même que pour les cas précédents, de même que les séances de suivi. Les radiographies de contrôle montrent qu'une apexogenèse débute à partir du 18^e mois après le soin et se poursuit ensuite normalement. Les patients n'ont pas présenté de douleurs post-opératoires (Figure 42).



Figure 42 : Etapes du coiffage pulpaire avec du Biodentine™ d'une 11 immature. Les radiographies sont prises, dans l'ordre, en post-opératoire et à 18 mois (Cauwels, Martens, 2014).

D'après ces quelques cas, nous pouvons conclure qu'un coiffage pulpaire direct avec le Biodentine™ semble être efficace, si la pulpe dentaire ne présente ni nécrose, ni inflammation de type pulpite irréversible. En effet, tous les patients soignés n'avaient ni douleurs spontanées, ni infection péri-apicale. Il est important de réaliser les soins sous champ opératoire et de rincer minutieusement le site, pour éviter au maximum les contaminations bactériennes. En plus de créer un pont dentinaire à son contact, le matériau va également induire une fermeture apicale si la dent est immature.

4.2.2. Suite à une lésion carieuse ou iatrogène :

4.2.2.1. *Etude de cas de Dammaschke (2012), Cauwels et Martens (2013), Firla (2013) et Villat et al. (2013)*

Des cas de coiffage direct avec du Biodentine™ ont été étudiés, suite à une lésion carieuse ou à une effraction iatrogène du plancher pulpaire lors d'une éviction carieuse. Comme précédemment, les dents concernées sont soit asymptomatiques, soit atteintes d'une pulpite réversible. Il n'y a ni nécrose pulpaire, ni fort délabrement dentaire, ni forte exposition pulpaire. Les patients soignés sont jeunes, de 7 à 14 ans, sauf pour un homme âgé de 42 ans. Dans un des cas, la pulpe était déjà exposée par l'atteinte carieuse. Dans l'ensemble des cas, le test de vitalité étant positif, un coiffage pulpaire direct après pulpotomie partielle a été effectué. Une résine composite a été placée sur le Biodentine™ soit dans la même séance, soit quelques semaines plus tard. Dans un cas, du CVI a été utilisé. Encore une fois, les patients soignés ne se plaignent pas de douleurs après le traitement lors des séances de suivi. Le pont dentinaire se forme au bout de quelques mois et l'apexogenèse se poursuit si la dent est immature (Figure 43).



Figure 43 : Etapes du coiffage pulpaire d'une 46 mature cariée. L'obturation finale en sandwich ouvert à la résine composite N'Durance® (Septodont) est réalisée 6 semaines après l'obturation provisoire avec le Biodentine™ seul (Firla, 2013).

Ainsi, le Biodentine™ semble pouvoir permettre un coiffage pulpaire direct efficace quelle que soit la cause de l'exposition pulpaire, selon les conditions précédemment exposées.

4.2.3. Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire direct avec du Biodentine™

Tableau 4 : Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire direct avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Nowicka <i>et al.</i> , 2013	11	Comparaison de la réponse pulpaire après un coiffage direct avec Biodentine™ ou du ProRoot MTA®. Etude in vivo.	A 6 semaines, pont dentinaire dans tous les cas, pas d'inflammation ni de nécrose pulpaire.
Villat <i>et al.</i> , 2013	1	Soin de carie profonde sur 45 immature, pulpite réversible.	Disparition des douleurs à 12h. Aucun symptôme à 7 jours et 3 mois.
Borkar <i>et al.</i> , 2014	4	Soin de fracture du bord libre d'incisives, avec exposition pulpaire de 5 à 7 jours, par coiffage direct et reconstitution coronaire en résine.	Aucun symptôme à 24h, 7 jours, 1, 3 et 6 mois, 1 et 2 ans.
Bhat <i>et al.</i> , 2014	1	Soin d'une fracture de 11 immature avec exposition pulpaire de 24h, par coiffage direct et reconstitution coronaire en résine.	Aucun symptôme à 24h, 1, 3, 6 mois et 1 an. Poursuite du développement de 11.
Dammaschke, 2012	3	Soin d'une carie profonde, coiffage direct après exposition pulpaire et obturation à la résine en technique sandwich à 3 mois.	Aucun symptôme à 3 mois lors de l'obturation à la résine, ni à 6 mois et 1 an.
Goupy, 2012	1	Soin d'une carie profonde, coiffage direct après exposition pulpaire et collage d'un onlay céramique 1 mois plus tard.	Aucun symptôme à 3 mois.
Firla, 2012	1	Coiffage direct après dépose d'un amalgame ayant provoqué une exposition pulpaire et mise en place à 6 mois d'une résine en sandwich ouvert.	Aucun symptôme 6 mois après la pose du Biodentine™.
Levin, 2012	37	Coiffages directs suivis d'une obturation directe ou indirecte par résine ou prothèse fixée.	4 échecs décrits.
Bakopoulou et About, 2013	1	Soin d'une carie profonde, coiffage direct après exposition pulpaire et obturation indirecte par une CCM à 6 semaines.	Aucun symptôme à 6 mois.
Cutts, 2013	2	Soin d'une carie profonde, coiffage direct après exposition pulpaire, obturation à la résine en technique sandwich à 2 semaines. Soin d'une fracture de 11 immature avec exposition pulpaire, coiffage direct et reconstitution à la résine.	Aucun symptôme à 3 et 6 mois, poursuite du développement de 11.
Ree, 2014	2	Soins de fractures d'incisives immatures avec exposition pulpaire. Coiffage direct, puis reconstitution à la résine.	Aucun symptôme à 7 jours, 6, 12 et 18 mois. Poursuite du développement dentaire.
Cauwels et Martens, 2014	2	Soin de caries profondes, coiffage direct après exposition pulpaire. Obturation à la résine en technique sandwich.	Aucun symptôme à 4 et 8 mois.

4.3. Pulpotomie :

Le coiffage pulpaire direct donnant de bons résultats avec le Biodentine™, il semble tout indiqué en obturation après une pulpotomie sur dent temporaire. Cette technique est utilisée chez l'enfant pour les soins de lésions carieuses profondes provoquant des pulpites aiguës ou chroniques, difficiles à évaluer à cet âge selon la coopération du patient. On émet l'hypothèse que seule la pulpe camérale est inflammatoire. Elle est alors éliminée et la pulpe radiculaire est conservée après contrôle de l'hémostase. Le but est d'éviter la pulpectomie, difficile à réaliser sur les dents temporaires en raison de leur anatomie radiculaire et de la résorption physiologique des racines (Cauwels et Martens, 2013 ; Zhang et Yelick, 2010).

Le matériau idéal pour ce type de soins doit être (i) bactéricide, (ii) biocompatible, (iii) assurer la cicatrisation et (iv) la régénération du complexe pulpo-dentinaire et ne pas affecter la résorption radiculaire physiologique.

4.3.1. Etude de Shayegan *et al.* (2009)

Shayegan *et al.* (2009) ont analysé les réactions pulpaires de dents temporaires de cochons après pulpotomie. Les dents ont été obturées soit par du formocrésol, soit par du MTA, soit par du Biodentine™. Les cochons sont répartis en trois groupes, avec un matériau d'obturation différent pour chaque groupe. Les dents sont extraites soit une semaine, un mois, ou 3 mois après l'obturation pour réaliser des observations sous microscope. Un début de calcification est observable au niveau de la pulpe radiculaire au bout d'une semaine pour les dents obturées avec le Biodentine™ et le MTA. Au bout de trois mois, le pont dentinaire est complètement formé (Figure 44).

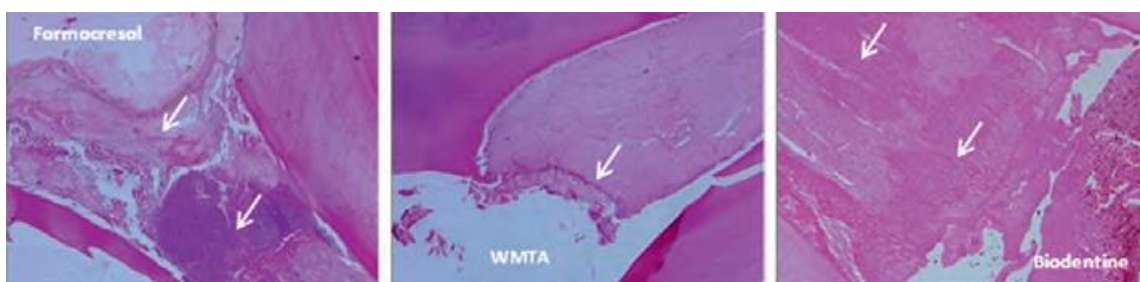


Figure 44 : Observation au microscope optique d'une obturation au formocrésol, au MTA et au Biodentine™ chez le cochon. Les flèches montrent une nécrose et une inflammation sous le formocrésol et une formation de pont dentinaire sous les autres matériaux (Shayegan *et al.*, 2009).

4.3.2. Etude de cas de Cauwels et Martens (2013)

Plusieurs cas d'obturation avec ce matériau ont été décrits chez l'enfant, notamment par Cauwels et Martens (2013). Le protocole opératoire est toujours similaire : toute la pulpe camérale doit être éliminée, ainsi que le tissu carieux. Le saignement de la pulpe radiculaire est contrôlé par rinçage régulier au sérum physiologique et le séchage est réalisé à l'aide de coton stérile. Puis le matériau est spatulé et inséré dans la cavité en le foulant correctement afin qu'il soit en contact avec la pulpe radiculaire. Là encore, la bonne résistance mécanique du Biodentine™ va permettre une obturation provisoire prolongée, puis une obturation par résine composite ou une coiffe pédodontique est réalisée en fonction du délabrement dentaire. Dans trois des cas étudiés, des enfants de 3 à 6 ans présentaient une lésion carieuse sur une de leur molaire temporaire ; les dents sont toujours asymptomatiques un an après la pulpotomie et l'obturation. Dans un des cas, la pulpe radiculaire a été complètement oblitérée par l'apposition de dentine tertiaire, sans aucune complication clinique (Figure 45).

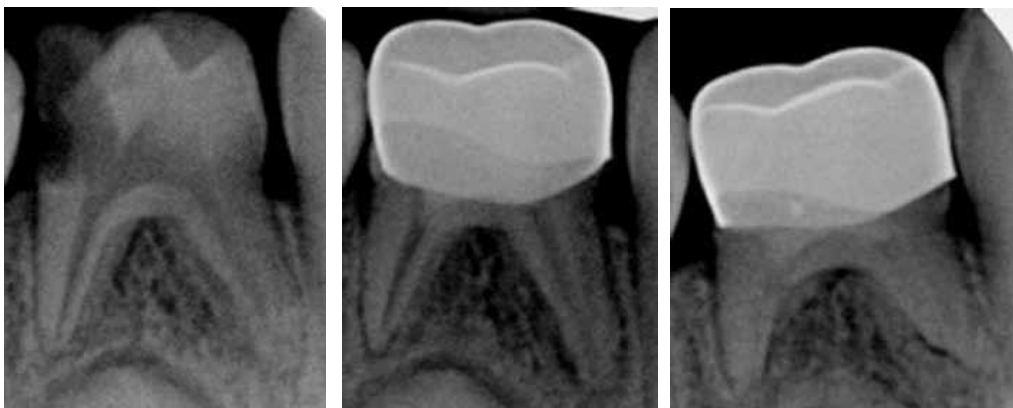


Figure 45 : Radiographies d'une pulpotomie sur 84 : pré-opératoire, post-opératoire et 1 an plus tard (Cauwels et Martens, 2013).

4.3.3. Etude de cas de Cauwels et Martens (2014)

Des obturations avec du Biodentine™ après pulpotomie sur des premières molaires définitives ont été étudiées, chez l'enfant. Comme pour la pulpotomie sur dents temporaires, la dent ne doit pas être nécrosée et présenter des signes de pulpite réversible ou chronique. Dans les deux cas présentés, une obturation de deux molaires mandibulaires chez deux enfants de âgés 9 et 11 ans, le protocole de soin est le même que pour une dent temporaire. Là encore, aucun symptôme post-opératoire n'est observé (Figure 46).

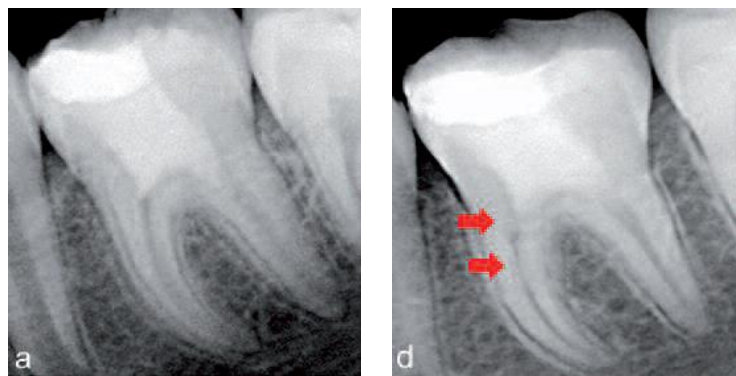


Figure 46 : Pulpotomie suivie d’une obturation avec du Biodentine™ : radiographie post-opératoire et à 10 mois. Des calcifications apparaissent au niveau des flèches rouges (Cauwels, Martens, 2014).

Les techniques de coiffage pulpaire indirect, direct et de pulpotomie, présentent de très bons résultats lorsque le Biodentine™ est utilisé comme matériau. D’autres utilisations de ce matériau sont faites en endodontie pour permettre de réaliser une obturation canalaire complexe, par fermeture de l’apex des racines immatures ou encore en réalisant une obturation *a retro*.

4.3.4. Synthèse des cas publiés de pulpotomie avec du Biodentine™

Tableau 5 : Synthèse des cas publiés de pulpotomie avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Goupy, 2012	1	Soin d’une carie asymptomatique d’une dent temporaire par pulpotomie, puis mise en place d’une coiffe pédodontique un mois plus tard.	Aucun symptôme à 3 mois.
Cauwels et Martens, 2013 et 2014	5	Soins de caries de 3 dents temporaires sous anesthésie générale et de 2 permanentes par pulpotomie, puis obturation par un CVI ou une résine selon les cas.	Aucun symptôme lors des suivis. Un an environ après le soin, une oblitération canalaire est visible.

4.4. Apexogenèse, apexification et mise en place d’un bouchon apical :

Dans le cas où la pulpe est nécrosée, les odontoblastes ne pourront plus synthétiser de dentine réparatrice et le coiffage pulpaire sera inefficace. La pulpectomie suivie d’une obturation canalaire sont alors nécessaires. Les apex larges rendent plus difficile cette obturation. Ils peuvent être la conséquence d’une résorption apicale sur dent mature, à

l'arrêt de la formation de l'apex d'une dent immature ou à un traumatisme (Simon *et al.*, 2008).

Deux techniques permettent de poursuivre cette édification radiculaire, en fonction de la persistance ou de l'absence de tissus pulpaire vitaux dans le canal. L'apexogenèse est un procédé de traitement de la pulpe vivante exécuté pour encourager le processus physiologique de formation de l'apex (American Association of Endodontists). L'apexification est une méthode pour induire une barrière calcifiée d'une racine présentant un apex ouvert, ou la poursuite du développement apical d'une racine immature à pulpe nécrosée (American Association of Endodontists). La lenteur du processus d'apexification conduit à une dernière solution : la mise en place au fond du canal d'un bouchon apical de matériau biocompatible. Ce bouchon apical joue le rôle d'une butée pour les matériaux d'obturation canalaire tout en permettant la régénération du desmodonte à son contact (Shabahang et Torabinejad, 2000 ; Felipe *et al.*, 2006).

La formation d'une barrière calcifiée est possible grâce à la présence de cémentoblastes, d'ostéoblastes et de cellules épithéliales de la gaine de Hertwig dans cette zone. Ces cellules ont une grande résistance à l'inflammation et à la nécrose (Huang *et al.*, 2008 ; Rafter, 2005). La barrière apicale formée a un aspect cémentaire et présente des inclusions cellulaires. Le ligament parodontal est la plupart du temps correctement reformé autour de l'apex (Felipe *et al.*, 2006).

Ce sont les bons résultats du MTA quant à son utilisation pour ces méthodes qui ont conduit à tester le Biodentine™ pour l'apexogenèse et l'apexification (Banchs et Trope, 2004 ; Bose *et al.*, 2009 ; Chueh et Huang, 2006 ; Huang *et al.*, 2008 ; Iwaya *et al.*, 2001 ; Jung *et al.*, 2008). L'utilisation du MTA en tant que bouchon apical permet une procédure de soins en un temps : le durcissement du matériau forme une barrière qui sert de butée pour l'obturation canalaire (Raskin *et al.*, 2012). L'hydroxyde de calcium, matériau fréquemment utilisé pour ces techniques, réduit les chances de succès car il nécessite plusieurs renouvellements et fragilise la racine (Andreasen *et al.*, 2002).

Les processus de formation de tissus durs à l'apex grâce au MTA sont encore mal connus. Les effets du MTA à ce niveau sont apparemment dus à :

- son pH alcalin,
- la présence d'ions calcium et phosphate dans sa formule,
- sa capacité à créer un environnement favorable à la formation de ciment,
- son effet ostéo et cémento-inducteur,
- la stimulation de l'adhésion et de la prolifération cellulaire,
- la stimulation de l'expression de facteurs de croissance par les fibroblastes et ostéoblastes (Felipe *et al.*, 2006).

4.4.1. Etude de cas de Cauwels et Martens (2014)

Deux cas similaires d'apexogenèse avec du Biodentine™ ont été présentés par Cauwels et Martens (2014). Les patients sont des enfants de 9 et 10 ans ayant subi un traumatisme des incisives centrales. Pour le premier cas, une fracture coronaire a conduit le praticien traitant à commencer une apexification. Cependant, le saignement abondant n'a pas pu être contrôlé et la symptomatologie clinique rendait le traitement difficile. Pendant la nouvelle première consultation et après anesthésie locale, le canal a été rincé à l'hypochlorite de sodium puis au sérum physiologique et séché. Une légère sensibilité a révélé des tissus pulpaire vivants au tiers apical et une obturation provisoire à l'hydroxyde de calcium a été mise en place pendant une semaine. A la séance suivante, après rinçage et séchage, la longueur à obturer est mesurée avec une pointe de papier stérile, puis le Biodentine™ est appliqué dans tout le canal à l'aide d'un fouloir endodontique au contact de la pulpe apicale résiduelle sous contrôle radiologique. A 8 mois, puis un an une radiographie montre la poursuite du développement radiculaire et le patient ne présente aucune symptomatologie (Figure 47).



Figure 47 : Apexogenèse d'une 21 immature par apposition de Biodentine™. De gauche à droite : radiographie pré-opératoire, radiographie avec de l'hydroxyde de calcium en traitement provisoire, radiographie avec le Biodentine™ en place, radiographie post-opératoire à 1 an (Cauwels et Martens, 2014).

Un autre cas a été rapporté chez une patiente de 10 ans où des incisives centrale et latérale maxillaires droites (11 et 12) ont été luxées et maintenues en place 3 semaines par une attelle. Les deux incisives présentent une réponse négative au froid. 3 mois après le choc, 11, qui n'a toujours aucun signe de vitalité et un apex ouvert, est obturée sur toute sa longueur avec du Biodentine™. 12 est trépanée 6 mois plus tard pour les mêmes raisons, les tissus pulpaire au niveau du tiers apical présentent toujours une sensibilité après anesthésie et le Biodentine™ est mis en place dans le canal. Après 9 mois, l'apex des deux dents poursuit sa maturation, une légère sensibilité au froid est réapparue au niveau de 12. Aucune douleur ni décoloration ne sont à déplorer (Figure 48).



Figure 48 : Apexogénèse d'une 12 par apposition de Biodentine™. De gauche à droite : radiographie pré-opératoire, radiographie 3 mois plus tard avec obturation complète de 11 par du Biodentine™ et partielle de 12 (flèche), radiographie post-opératoire à 3 mois, à 9 mois (Cauwels et Martens, 2014).

4.4.2. Etude de cas de Sinha *et al.* (2014)

Un cas présentant une lésion péri-apicale plus avancée a été présenté par Sinha *et al.* (2014). Le patient âgé de 18 ans décrit des tuméfactions intermittentes du secteur antérieur gauche, avec parfois présence de pus et un changement de couleur de l'incisive latérale maxillaire droite (12). Il a été victime d'une chute à l'âge de 10 ans, ce qui a nécessité l'obturation endodontique de l'incisive centrale (11) ainsi que la pose d'une couronne céramo-métallique avec ancrage radiculaire. 12 n'est plus vitale, la radiographie montre une obturation endodontique incomplète de 11, une fermeture incomplète de l'apex et une lésion péri-apicale en regard de 11 et 12, sans que le desmodonte de 12 ne soit affecté.

Après dépose de la couronne, le canal de 11 est désobturé, rincé, séché et à nouveau obturé à l'aide d'une pâte comprenant trois antibiotiques (minocycline, ciprofloxacine et métronidazole, chacun à 100 µg/mL). Le canal de 12 est nettoyé, rincé, séché et obturé avec un gel de chlorhexidine à 2%. Deux semaines plus tard, du Biodentine™ est placé en fond de canal de 11 puis les dents 11 et 12 sont obturées à la gutta-percha. A trois semaines les symptômes décrits par le patient ont disparu et à un an, les radiographies rétroalvéolaires et CBCT (*cone beam computed tomography*) montrent une cicatrisation progressive de la lésion péri-apicale, ainsi qu'une barrière calcifiée apicale sur 11 (Figure 50).

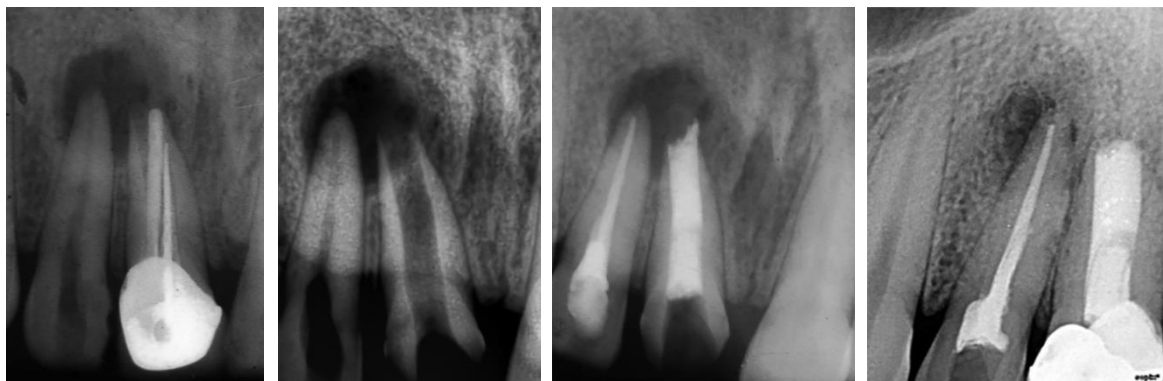


Figure 49 : Mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™ sur 11 et pulpectomie de 12. Dans l'ordre : radiographie pré-opératoire, radiographie après dépose de l'obturation de 11 et de la couronne, radiographie post-opératoire et radiographie de contrôle à 1 an (Sinha *et al.*, 2014).

D'autres cas similaires ont été présentés par Cauwels et Martens (2014). Les dents soignées avaient un canal suffisamment large pour être complètement obturé avec du Biodentine™. Cette obturation complète se justifie par les bonnes propriétés mécaniques du matériau. Là encore, le traitement semble durable (Figure 51).

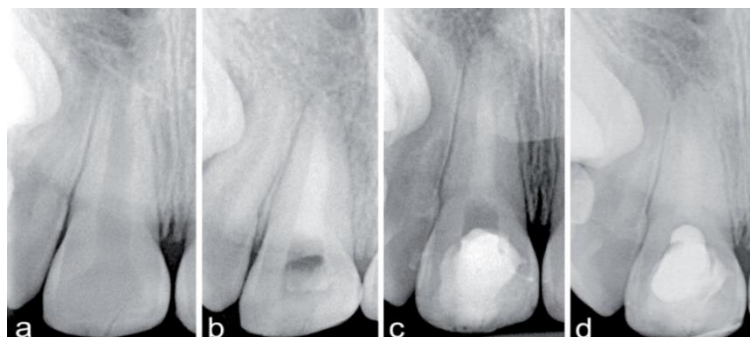


Figure 50 : Mise en place d'un bouchon apical sur 11, suivie d'une obturation complète du canal, le tout avec Biodentine™. (a) radiographie pré-opératoire, (b) radiographie post-opératoire, (c) à 6 mois, (d) à 1 an (Cauwels, Martens, 2014).

Cependant, comme expliqué plus haut, l'effet à long terme des ciments au silicate de calcium sur le collagène dentinaire tend à une altération de la résistance de la dentine (Leiendecker *et al.*, 2012). La résistance des racines à très long terme après une obturation complète avec du Biodentine™ doit donc être mieux étudiée.

4.4.3. Synthèse des cas publiés d'apexogenèse avec du Biodentine™

Tableau 6 : Synthèse des cas publiés d'apexogenèse avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Cauwels et Martens, 2014	4	Soin de traumatismes sur des incisives immatures. Coiffage des tissus pulpaire résiduels dans le tiers apical et attente du développement radiculaire par apexogenèse.	Aucun symptôme lors des suivis, poursuite du développement radiculaire.
Cauwels et Martens, 2014 ; Bhat <i>et al.</i> , 2014 ; Cutts, 2013 ; Ree, 2014 ; Villat <i>et al.</i> , 2013.	8	Cas de coiffages pulpaire directs décrits dans le tableau de synthèse des cas de coiffage pulpaire avec du Biodentine™.	Poursuite de l'apexogenèse, en plus de la formation d'un pont dentinaire précédemment décrite.

4.4.4. Synthèse des cas publiés de mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™

Tableau 7 : Synthèse des cas publiés de mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Sinha <i>et al.</i> , 2014	1	Formation d'une barrière apicale pour obturer une 11 nécrosée après un traumatisme ancien, dont l'apex est ouvert et présentant une lésion péri-apicale. Obturation canalaire.	Aucun symptôme 3 semaines plus tard, guérison de la lésion à un an.
Khetarpal <i>et al.</i> , 2014	1	Formation d'une barrière apicale pour obturer une 12 nécrosée après un traumatisme ancien, douloureuse, dont l'apex est ouvert et présentant une lésion péri-apicale. Obturation canalaire.	Aucun symptôme 3 et 18 mois plus tard, guérison de la lésion à partir de 3 mois.
Cauwels 2013 ; Cauwels et Martens, 2014	4	Symptômes similaires pour tous les cas: formation d'une barrière apicale pour obturer des incisives nécrosées après un traumatisme ancien. Obturation canalaire.	Aucun symptôme lors des contrôles, de 3 à 15 mois selon les cas.
Bronnec, 2012	1	Dépose d'une obturation canalaire insuffisante, formation d'une barrière apicale et ré-obturation.	Aucun symptôme lors des contrôles.
Mercado Velazquez <i>et al.</i> , 2015	1	Formation d'une barrière apicale pour obturer une 11 immature et nécrosée après un traumatisme ancien. Obturation canalaire.	Aucun symptôme à 6, 10 et 14 mois.
Nayak <i>et al.</i> , 2013	1	Formation d'une barrière apicale pour obturer une 21 nécrosée après un traumatisme survenu il y a 10 ans, présentant un apex ouvert et une lésion péri-apicale. Obturation canalaire.	Aucun symptôme à 1 an.

4.5. Obturation canalaire *a retro* :

L'obturation canalaire *a retro* consiste en une apposition de matériau placé dans une cavité apicale aménagée pendant une procédure d'endodontie chirurgicale ou avant une réimplantation dentaire intentionnelle. Elle est destinée à augmenter l'étanchéité d'une obturation canalaire orthograde non optimale (American Association of Endodontists). Les matériaux utilisés pour ce type de soin sont les amalgames, les ciments à base d'oxyde de zinc et d'eugénol comme l'IRM® ou le Super-EBA® (Bosworth® Company), le MTA. L'endodontie chirurgicale doit être réalisée en complément à une obturation orthograde précédemment réalisée, ou d'emblée. En complément du traitement orthograde, ce type de soins va permettre de drainer une collection kystique, de remédier à la persistance de douleurs ou de lésions après une obturation canalaire correcte ou incomplète et de corriger les fenestrations et résorptions iatrogènes ou non. Réalisée d'emblée, l'endodontie chirurgicale va permettre de traiter les cas où toute obturation canalaire par voie orthograde est impossible, par exemple en cas d'éléments prothétiques volumineux et/ou dont la dépose est risquée (Simon *et al.*, 2012).

Le matériau d'obturation est primordial pour la réussite du soin. Il devra répondre à plusieurs critères (Gartner et Dorn, 1992 ; Simon *et al.*, 2008):

- le scellement hermétique du système canalaire,
- la biocompatibilité,
- la stimulation de la régénération des tissus péri-apicaux,
- la bonne tolérance de l'humidité pour son durcissement,
- la stabilité volumétrique,
- l'absence de corrosion et d'activité électrochimique,
- l'absence de coloration des dents et des tissus adjacents,
- la facilité de manipulation,
- la radio-opacité distincte de la dentine.

A nouveau, les bons résultats du MTA en obturation *a retro* ont conduit à utiliser le Biodentine™ pour cette indication (Parirokh et Torabinejad, 2010).

4.5.1. Etude de cas de Caron *et al.* (2014)

Deux cas similaires nécessitant un acte d'endodontie chirurgicale ont été présentés par Caron *et al.* en 2014. Dans le premier cas la patiente âgée de 45 ans a été adressée par son praticien traitant pour une lésion péri-apicale asymptomatique découverte fortuitement lors d'un suivi de routine. Cette lésion est située sous la deuxième prémolaire maxillaire gauche (25), support d'une couronne céramo-métallique présentant une inlay-core volumineux. Un

isthme apical est suspecté, au vu de la forme de la racine. Dans l'autre cas, la patiente âgée de 50 ans souffre d'une maladie de Crohn stabilisée. Une douleur à la percussion et à la palpation est détectée sur 25, avec un dépassement de pâte d'obturation visible radiologiquement. Son praticien traitant a réalisé un retraitement endodontique mais les symptômes n'ont pas cessé et le dépassement de pâte n'a pas pu être éliminé. Le praticien a alors réalisé un lambeau d'accès pour cureter la pâte, à nouveau sans disparition des symptômes. La patiente a donc été adressée pour réaliser une obturation *a retro* (Figure 52).

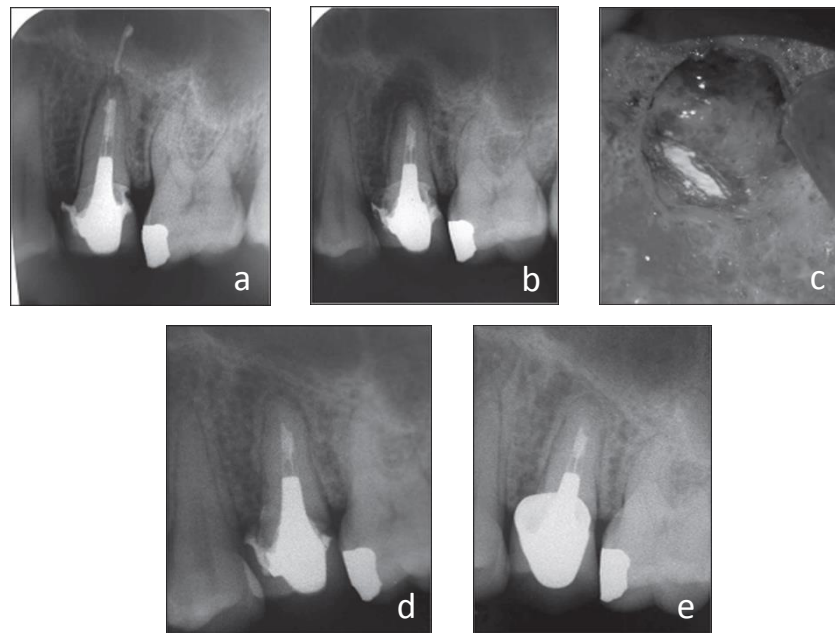


Figure 51 : Obturation *a retro* de 25 avec du Biodentine™. (a) Radiographie pré-opératoire, (b) post-opératoire, (c) observation à fort grossissement de l'obturation, (d) contrôle à 6 mois et (e) à 2 ans (Caron *et al.*, 2014).

Le traitement est le même pour les deux cas. Après anesthésie et bain de bouche antiseptique, un lambeau est réalisé suivi d'une ostéotomie sous irrigation constante au sérum physiologique. L'hémostase est réalisée au moyen de compresses imbibées de sulfate ferrique (Astringedent®, Ultradent Products). Une résection de la racine est réalisée perpendiculairement à l'axe de la dent sur 3 mm. La cavité d'obturation est préparée à l'aide d'inserts ultrasonores (Apical Surgery Set, Satelec®) sur une profondeur de 3 mm environ. Après séchage, du Biodentine™ est appliqué en plusieurs incréments à l'aide d'un instrument Map System (PDSA) et l'excès de matériau est retiré avec un coton stérile. Une radiographie est réalisée pour contrôler la qualité de l'obturation. La cavité osseuse est rincée et le lambeau suturé. Sont prescrits : un antalgique (1g de paracétamol toutes les 6h pendant 2 jours), un antibiotique (1g d'amoxicilline, 3h avant l'intervention puis 2 fois par jour pendant 7 jours) et un anti-inflammatoire (60 mg de prednisolone, chaque jour pendant 2 jours). Une séance de contrôle est programmée à 1, 3, 6, 12 et 24 mois. Aucun symptôme douloureux ou pathologique n'est observé et les radiographies montrent une reminéralisation osseuse de la lésion ainsi que la régénération du desmodonte.

4.5.2. Etude de cas de Bronnec (2012)

Bronnec (2012) a rapporté un autre cas d'obturation avec du Biodentine™. Le patient présente une symptomatologie persistante de lésion péri-apicale après un retraitement orthograde sur l'incisive latérale maxillaire droite (12): 3 mois après le retraitement la radiographie montre une persistance de la radioclarité et une résorption inflammatoire de l'apex. Un inlay-core est en place ainsi qu'une couronne provisoire. L'obturation endodontique est jugée satisfaisante. Le protocole de la résection apicale et de l'obturation avec le Biodentine™ est quasiment identique aux deux cas précédents. Le patient est revu 48h plus tard pour la dépose des fils et trois mois plus tard pour un contrôle. Les symptômes ont disparu et la lésion est en cours de cicatrisation. A un an la guérison est complète (Figure 53).

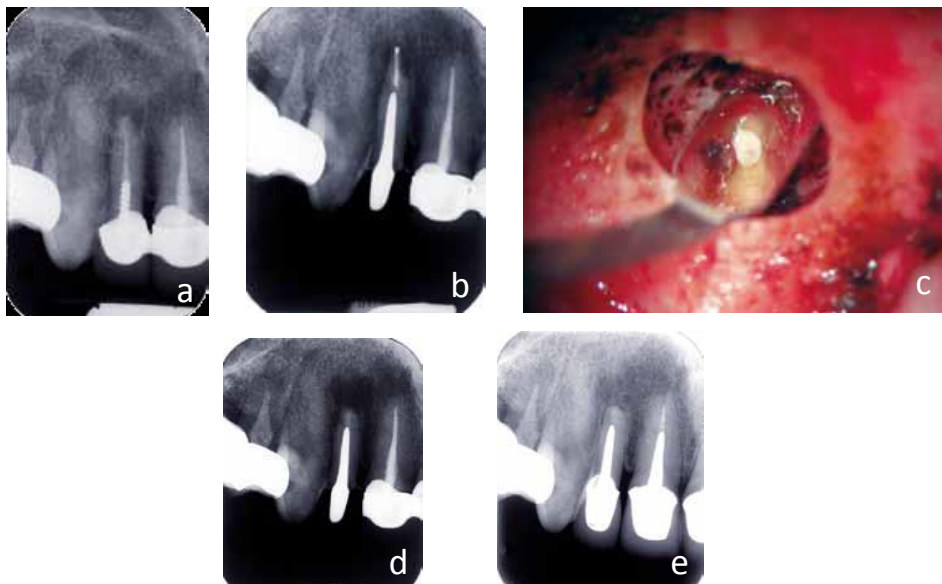


Figure 52 : obturation *a retro* de 12 avec Biodentine™. (a) Radiographie avant le retraitement endodontique, (b) radiographie de contrôle du retraitement montrant une absence de guérison, (c) obturation *a retro* observée au microscope, (d) radiographie post-opératoire, (e) contrôle à 1 an (Bronnec, 2012).

L'efficacité du Biodentine™ semble donc satisfaisante en considérant ces quelques cas. La prise rapide du matériau et sa facilité d'utilisation est là encore un avantage par rapport au MTA dont les propriétés biologiques sont similaires. Selon les auteurs sa capacité de liaison avec la dentine pour cette indication est soit identique, soit légèrement inférieure au MTA. L'inconvénient du Biodentine™ pour cette indication est sa radio-opacité similaire à la dentine, rendant difficile la visualisation de l'obturation rétrograde, surtout si l'apport de matériau est faible (Caron *et al.*, 2014 ; Soundappan *et al.*, 2014).

4.5.3. Synthèse des cas publiés d'obturations *a retro* avec du Biodentine™

Tableau 8 : Synthèse des cas publiés d'obturations *a retro* avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Bronnec, 2012	1	Résection apicale et obturation <i>a retro</i> . Lésion péri-apicale présente.	Aucun symptôme à 3 mois et 1 an.
Caron <i>et al.</i> , 2014	2	Résection apicale et obturation <i>a retro</i> . Lésion péri-apicale présente.	Aucun symptôme à 1 et 2 ans.
Pawar <i>et al.</i> , 2013	1	Résection apicale et obturation <i>a retro</i> et obturation canalaire de 11 et 12 après trois mois d'obturation à l'hydroxyde de calcium renouvelée tous les 15 jours. Kyste péri-apical large présent depuis le début du soin, dû à un ancien traumatisme, sans évolution à 3 mois. Exérèse de la lésion.	Aucun symptôme à 1, 3, 6, 12 et 18 mois. Bonne guérison de la lésion, complète à 18 mois.
Gutierrez, 2013	1	Obturation canalaire, résection apicale et obturation <i>a retro</i> . Lésion péri-apicale présente.	Pas de suivi décrit.

4.6. Résorptions et perforations radiculaires :

Une résorption est un état associé à un processus physiologique ou pathologique conduisant à une perte de dentine, de ciment et/ou d'os (American Association of Endodontists). Elle peut avoir plusieurs origines et localisations (Simon *et al.*, 2008 ; Tronstad, 1988). Elle est interne ou externe, inflammatoire ou de remplacement. Elle peut aboutir à une perforation et faire communiquer la cavité pulpaire et les tissus parodontaux. Leur étiologie peut provenir de facteurs généraux : maladies systémiques ou endocriniennes, prise de certains médicaments ; ou de facteurs locaux, tels que des traumatismes, des traitements orthodontiques, des infections et des agents chimiques ou thermiques. Les perforations peuvent aussi avoir une origine iatrogène, notamment lors des traitements ou retraitements endodontiques orthogrades (Gluskin *et al.*, 2008).

Le MTA est jusqu'alors un matériau de choix pour traiter ce type de lésions (Parirokh et Torabinejad, 2010). Là encore, le Biodentine™ semble plus intéressant grâce à ses propriétés mécaniques plus élevées et son temps de prise réduit. Jeevani *et al* (2014) ont étudié la résistance à la micro-infiltration du Biodentine™ en tant que matériau d'obturation des perforations du plancher pulpaire. L'infiltration est plus élevée pour le Biodentine™ que pour le MM-MTA™, mais cette infiltration a été mesurée à 48 h, alors que les propriétés de

liaison du Biodentine™ s'améliorent avec le temps. Aggarwal *et al.* (2013) confirment cette amélioration des propriétés en mesurant la force d'adhésion du Biodentine™ à la dentine de molaires extraites avec ou sans contamination sanguine. Cette force augmente avec le temps, notamment au bout d'une semaine et sans être altérée par une exposition au sang.

Une étude de Gruneser *et al.* (2013) souligne la bonne adhérence du Biodentine™ à la dentine en présence de plusieurs irrigants utilisés en endodontie (hypochlorite de sodium à 3,5% (Caglayan® Kimya), chlorhexidine (Klorhex®, Drogas) et solution saline (IE Ulagay)), pour la même indication de réparation des perforations.

Plusieurs études de cas confirment l'efficacité du Biodentine™ pour l'obturation des perforations.

4.6.1. Etude de cas de Bronnec (2012)

Bronnec (2012) a présenté un cas de soin de perforation du plancher pulpaire. La patiente est adressée après une complication survenue au cours d'un retraitement endodontique de la dent 26. Une symptomatologie de type desmodontite est mise en évidence et la radiographie montre d'une part des lésions péri-apicales en regard des apex, ce qui justifiait le retraitement endodontique. D'autre part une radioclarité est visible au niveau de la furcation sans perte d'attache parodontale associée. L'obturation provisoire est déposée, permettant de diagnostiquer une perforation iatrogène du plancher pulpaire. En accord avec la patiente, il est décidé de tenter de conserver la dent en tentant la réparation de la perforation. Deux séances seront nécessaires. D'abord, la perforation est nettoyée au moyen d'inserts ultrasonores après désobturation et préparation canalaire. De l'hydroxyde de calcium est mis en place en interséance pour réduire l'inflammation parodontale. Une semaine plus tard les symptômes ont disparu. L'obturation de la perforation est réalisée avant celle des canaux, pour éviter une contamination de la perforation par le ciment de scellement canalaire. Les orifices canaux sont isolés par du coton stérile puis la perforation est obturée avec du Biodentine™ à l'aide d'un porte-amalgame. Le matériau est adapté à la cavité avec une boulette de coton sans compression. Puis l'obturation canalaire est réalisée après curetage des excès de matériau. En fin de séance la convexité du plancher pulpaire est recrée en fraisant le Biodentine™, en vue d'une future restauration indirecte. Puis une coiffe métallique provisoire scellée au CVI est mise en place. 3 mois plus tard aucun symptôme n'est observé et la radiographie montre la guérison des lésions péri-apicales et au niveau de la furcation (Figure 54).

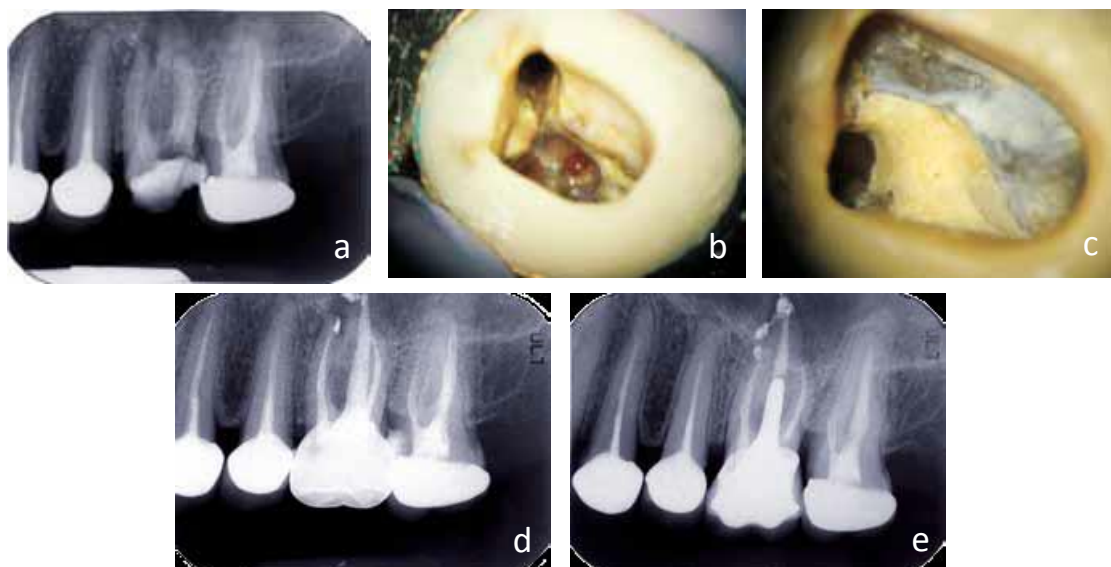


Figure 53 : Réparation d'une perforation du plancher pulpaire de 26 avec du Biodentine™. (a) Radiographie pré-opératoire, (b) site de la perforation nettoyé observé au microscope, (c) réparation de la perforation, (d) radiographie post-opératoire, (e) contrôle à 1 an (Bronnec, 2012).

4.6.2. Etude de cas de Bachoo *et al.* (2013)

Bachoo *et al.* (2013) ont quant à eux présenté un cas d'obturation de perforation radiculaire latérale. Un homme âgé de 54 ans est adressé par son praticien traitant après une perforation distale iatrogénique de la dent n°35, due à une tentative d'accès au canal pulpaire. Le patient décrit une douleur légère sur cette dent, exacerbée après la perforation. Un amalgame occluso-mésial est partiellement déposé pour accéder aux canaux et les tissus résiduels sont suffisamment importants pour permettre une restauration indirecte. La radiographie avec une lime en place met en évidence la perforation, une lésion péri-apicale est également visible justifiant la pulpectomie. Après anesthésie et mise en place d'une digue, le canal est préparé, rincé, séché et protégé par du coton stérile. La perforation est visible au microscope optique et mesure 5 mm sur 2 mm ; elle se situe sous la crête osseuse alvéolaire. Après rinçage et obtention de l'hémostase, du Biodentine™ est mis en place avec un fouloir à amalgame. Puis l'obturation endodontique est réalisée. La radiographie de contrôle montre une reconstitution du desmodonte et l'examen ne révèle aucune douleur (Figure 55).

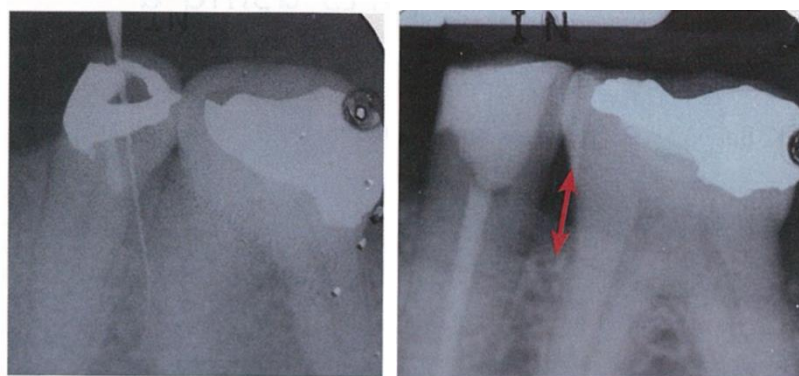


Figure 54 : Réparation d'une perforation distale de 35 avec du Biodentine™. Radiographie pré-opératoire avec la perforation mise en évidence, radiographie post-opératoire (Bachoo *et al.*, 2013).

Dans ces cas de figure, la rapidité de prise du matériau permet aussi de réduire le temps de traitement tout en associant biocompatibilité et résistance.

4.6.3. Synthèse des cas publiés de réparations de perforations iatrogènes avec du Biodentine™

Tableau 9 : Synthèse des cas publiés de réparations de perforations iatrogènes avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Bachoo, 2013	1	Réparation d'une perforation iatrogène en distal de la chambre pulpaire d'une 35, survenue après un échec de trépanation. Obturation.	Un contrôle est programmé dans 6 mois, pas de résultats précisés.
Bronnec, 2012	2	Réparation d'une perforation iatrogène du plancher pulpaire. Obturation canalair ou ré-obturation selon le cas. Des lésions péri-apicales sont présentes.	A 3 mois les lésions sont en cours de guérison. A 1 an aucun symptôme.
Roubalikova, 2012	4	Réparation de 2 perforations iatrogènes du tiers coronaire et 2 du plancher pulpaire. Obturation canalair.	Aucun symptôme à 2 et 4 mois.
Dammaschke, 2012	1	Réparation d'une perforation iatrogène du plancher pulpaire. Obturation canalair.	Aucun symptôme 1 mois plus tard, résorption de la radioclarité inter-radiculaire.
Cutts, 2012 ; 2013	3	Réparation de perforations iatrogènes du plancher pulpaire. Obturation canalair ou ré-obturation selon le cas.	Pour deux cas, aucun symptôme à 3 et 6 mois, non précisé pour le dernier cas.
Gomez-Rojas <i>et al.</i> , 2013	2	Réparation de perforations iatrogènes du plancher pulpaire. Ré-obturation radiculaire et obturation de la cavité d'accès à la résine. Episodes douloureux pour un cas. Lésion péri-apicale pour l'autre cas.	Aucun symptôme à 6 et 12 mois, guérison de la lésion.
Lorenzo, 2014	1	Réparation d'une perforation iatrogène du plancher pulpaire, après dépose d'un amalgame présent dans la chambre pulpaire et dans la perforation. Douleurs décrites. Ré-obturation canalair, pose d'une couronne.	Aucun symptôme à 2 et 3 ans.

4.6.4. Synthèse des cas publiés de réparations de résorptions perforantes avec du Biodentine™

Tableau 10 : Synthèse des cas publiés de réparations de résorptions perforantes avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Ulloa, 2013	1	Réparation d'une résorption cervicale externe perforante idiopathique, par décollement de lambeau.	Légère récession gingivale à 7 mois, sinon aucun symptôme.
Roubalikova, 2012	1	Réparation d'une résorption cervicale externe perforante d'une 23 ankylosée après un traitement orthodontique, par décollement de lambeau.	Aucun symptôme à 2 mois.
Cutts, 2013	1	Réparation d'une résorption interne coronaire par pulpotomie et coiffage direct.	Aucun symptôme à 6 mois.
Molina, 2015	1	Réparation d'une large résorption cervicale externe perforante d'une 11, survenue après un traitement orthodontique. Poche parodontale vestibulaire de 10 mm. Décollement de lambeau, obturation canalaire.	Aucun symptôme à 6 mois, disparition de la poche.

4.7. Obturation de sillon radiculaire :

Un sillon radiculaire est une anomalie de développement de la dent situé habituellement sur la face linguale d'une incisive maxillaire (American Association of Endodontists). Il est situé le long de la racine et peut aller du cingulum jusqu'au voisinage de l'apex (Naveed *et al.*, 2011). Sa longueur et sa profondeur sont variables.

4.7.1. Etude de cas de Naik *et al.* (2014)

Naik *et al.* (2014) ont présenté un cas d'obturation de sillon radiculaire avec du Biodentine™. Une femme âgée de 22 ans consulte pour un gonflement en regard de son incisive latérale maxillaire droite. L'examen montre également une tuméfaction palatine. Une poche parodontale de 10 mm de profondeur est détectée en palatin. Les tests de vitalité sont négatifs seulement pour la dent n°12. Aucun traumatisme antérieur n'est signalé. La patiente n'a pas de douleurs particulières dans cette région. Une radiographie avec un cône de gutta-percha placé dans la poche parodontale montre une communication de la poche avec une lésion péri-apicale. La communication endobuccale due au sillon palato-radiculaire permet une contamination bactérienne qui est à l'origine du granulome péri-apical. La nécrose pulpaire a donc une origine apicale.

Le traitement va d'abord consister en l'exérèse de la pulpe, suivi d'une obturation canalaire provisoire à l'hydroxyde de calcium. 2 semaines plus tard, le canal est obturé à la gutta-percha. Un mois plus tard la patiente ne décrit plus de gêne, mais la poche parodontale ainsi que la tuméfaction persistent. Un lambeau palatin est alors réalisé. Le tissu de granulation remplissant la zone de perte osseuse est éliminé, puis le sillon radiculaire est cureté et obturé avec du Biodentine™. Une fois le lambeau repositionné et suturé, de l'amoxicilline est administrée (500 mg, trois fois par jour pendant 5 jours) ainsi qu'un bain de bouche à base de chlorhexidine (0,12%) et de l'ibuprofène. 6 mois plus tard les tuméfactions sont résorbées, un sulcus sain de 2 mm de profondeur est reconstitué en regard du sillon obturé et la lésion péri-apicale est en cours de guérison (Figure 56).



Figure 55 : Scellement d'un sillon palato-radicaire de 22 avec du Biodentine™. (a, b) Aspect pré-opératoire avec tuméfaction vestibulaire, palatine et poche parodontale de 10 mm. (c, d) Lever de lambeau et curetage du tissu de granulation dans le sillon. (e) Obturation du sillon avec du Biodentine™, (f) suture du lambeau. (g, h) Disparition des tuméfactions en post-opératoire.

Radiographies : (i, j) pré-opératoire, sans et avec cône de gutta percha pour visualiser la communication endo-parodontale, (k) après obturation à l'hydroxyde de calcium, (l) après l'obturation endodontique, (m) après le scellement du sillon, (n) contrôle à 6 mois (Naik *et al.*, 2014).

4.7.2. Synthèse des cas publiés d'obturations de sillons palato-radicaux avec du Biodentine™

Tableau 11 : Synthèse des cas publiés d'obturations de sillons palato-radicaux avec du Biodentine™.

Auteurs	Nombre de cas	Objectifs	Résultats
Naik <i>et al.</i> , 2014	1	Obturation d'un sillon palato-radicaux à l'origine d'une nécrose de 12 et d'une lésion péri-apicale. Poche palatine de 10 mm. Obturation canalaire.	Aucun symptôme à 6 mois, guérison de la lésion. Disparition de la poche palatine.
Johns <i>et al.</i> , 2014	1	Obturation d'un sillon palato-radicaux à l'origine d'une nécrose de 22 et d'une lésion péri-apicale. Poche palatine de 9 mm. Obturation canalaire, résection apicale, comblement de la cavité par de l'os lyophilisé et mise en place d'une membrane de fibrine riche en plaquettes.	Aucun symptôme tous les 6 mois jusqu'à 2 ans. Disparition de la poche et de la lésion à 2 ans

Conclusion :

Les ciments à base de silicate de calcium permettent d'améliorer la mise en œuvre et le pronostic de certaines thérapeutiques endodontiques. Leur capacité à stimuler les cellules progénitrices pulpaire leur permet d'être utilisés pour des soins de coiffage pulpaire, d'apexogenèse ou d'apexification. Le desmodonte se régénère à leur contact, permettant une utilisation pour une obturation canalaire *a retro* ou pour réparer tout type de perforation radiculaire. Enfin, dans des conditions d'antisepsie et d'hémostase correctes leur liaison à la dentine est satisfaisante et ne nécessite pas de préparation des surfaces comme le mordantage. Cependant leurs mauvaises propriétés mécaniques et leur temps de prise lent n'en font pas des matériaux idéaux.

La mise au point du Biodentine™, qui a une composition similaire au MTA mais avec une plus grande pureté, combine les avantages des ciments à base de silicate de calcium avec une réduction significative de leurs inconvénients. Ainsi l'alliance du temps de prise court, de la facilité d'utilisation, de la stabilité colorimétrique et des bonnes propriétés mécaniques autorise une mise en place en une seule séance et en obturation sur toute la hauteur de la dent, dans le cas d'un coiffage pulpaire indirect ou direct. Par la suite, des procédures de collage en méthode directe ou indirecte peuvent être réalisées sur le matériau, qui jouera le rôle de substitut dentinaire. Ces évolutions facilitent également les soins endodontiques : par exemple, dans une même séance de soins une réparation de perforation canalaire avec du Biodentine™ peut être suivie d'une obturation canalaire à la gutta percha.

Peu d'inconvénients sont à signaler. Beaucoup d'études de cas concernant des indications endodontiques telles que les réparations de perforations et la chirurgie apicale pointent une radio-opacité proche de celle de la dentine, ce qui rend parfois difficile le contrôle radiologique de la mise en place du matériau. Après un contact de l'ordre de plusieurs mois avec les ciments à base de silicate de calcium et donc avec le Biodentine™, les propriétés mécaniques de la dentine semblent s'altérer. Les restaurations importantes devraient donc être réalisées avec précaution, mais plusieurs cas de collage d'inlays/onlays volumineux voire de scellement de couronnes céramo-métalliques ont été publiés.

La plupart des cas cliniques concernant le Biodentine™ s'accordent sur un point : davantage d'études à long terme sont nécessaires pour confirmer les bons résultats du matériau pour les différentes indications possibles. De même, si la préservation de la vitalité de la pulpe saine est avérée, il serait intéressant d'étudier la capacité du matériau à agir sur les pulpes inflammatoires comme l'ont déjà fait Hashem *et al.* en 2015. En effet, ces auteurs ont constaté l'efficacité d'un coiffage pulpaire indirect avec du Biodentine™, avec des symptômes de pulpite réversible.

Malgré encore un manque d'études, la grande diversité de cas publiés montre que les possibilités d'utilisation du Biodentine™ sont nombreuses. Le pronostic est favorisé par la préservation maximale des tissus dentaires et en privilégiant le coiffage pulpaire au traitement endodontique. Le Biodentine™ est donc un matériau d'avenir et possède toute sa place dans l'arsenal thérapeutique du chirurgien-dentiste.

Bibliographie :

1. About I. Dentin-pulp regeneration: the primordial role of the microenvironment and its modification by traumatic injuries and bioactive materials. Endod Topics 2013;28(1):61-89
2. About I. Etude in vitro sur culture cellulaire de la biocompatibilité du produit RD94 : étude des fonctions spécifiques des fibroblastes pulpaire humains. Report RG EN RA EXT-RD94/054, 2003b
3. Agence Nationale de Sécurité des Médicaments et produits de santé. Liste des dispositifs médicaux 2012 [en ligne]. 2012 [consulté le 3/11/2015]. Disponible sur : http://www.anism.sante.fr/var/anism_site/storage/original/application/6437772edb7b0bb6d1b6733c10c7bed8.xls
4. Aggarwal V, Singla M, Miglani S, Kohli S. Comparative evaluation of push-out bond strength of ProRoot MTA®, Biodentine™, and MTA Plus® in furcation perforation repair. J Conserv Dent 2013;16(5):462-465
5. American Association of Endodontists. Glossary of Endodontics Terms [en ligne]. 8^e édition. Chicago: American Association of Endodontists, 2012 [consulté le 3/11/2015]. Disponible sur <http://www.nxtbook.com/nxtbooks/aae/endodonticglossary/index.php#/0>
6. Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC. Long term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of fracture. Endod Dent Traumatol 2002;18(3):134-137
7. Archien C, Begin M, Thiepin JC, Unger F et al. Dictionnaire de prothèse odontologique. Paris : Editions SNPMD, 2004, 94p
8. Atmeh AR, Chong EZ, Richard G, Festy F, Watson TF. Dentin-cement Interfacial Interaction: Calcium Silicates and Polyalkenoates. J Dent Res 2012;91(5):454-459
9. Bachoo IK, Seymour D, Brunton P. Clinical case reports using a novel calcium-based cement. Brit Dent J 2013;214(2):61-64
10. Bakopoulou A, About I. Biodentine™, a promising bioactive material for the preservation of pulp vitality in restorative dentistry. Septodont Case Studies Collection 2013;5:4-10
11. Bakopoulou A, About I. Biodentine™: a promising bioactive material for the long-term preservation of pulp vitality in prosthetic abutments. Septodont Case Studies Collection 2014;8:4-10

12. Banchs F, Trope M. Revascularization of immature permanent teeth with apical periodontitis: new treatment protocol? J Endod 2004;30(4):196-200
13. Banerji S. Restoration of the deep carious lesion. Septodont Case Studies Collection 2014;7:22-24
14. Bègue-Kirn C, Smith AJ, Lorient M, Kupferle C, Ruch JV, Lesot H. Comparative analysis of TGF beta s, BMPs, IGF1, msxs, fibronectin, osteonectin and bone sialoprotein gene expression during normal and *in vitro*-induced odontoblast differentiation. Int J Dev Biol 1994;38(3):405-420
15. Bhat SS, Hegde SK, Adhikari F, Bhat VS. Direct pulp capping in an immature incisor using a new bioactive material. Contemp Clin Dent 2014;5(3):393-396
16. Borkar SA, Ataide I. Biodentine pulpotomy several days after pulp exposure: Four case reports. J Conserv Dent 2015;18(1):73-78
17. Bose R, Nummikoski P, Hargreaves K. A retrospective evaluation of radiographic outcomes in immature teeth with necrotic root canal systems treated with regenerative endodontic procedures. J Endod 2009;35(10):1343-1349
18. Boutsiouki C, Tolidis K, Gerasimou P. The direct application of Biodentine™ under indirect ceramic restoration. Septodont Case Studies Collection 2013;6:13-17
19. Bronnec F. Biodentine pour le traitement des perforations, l'apexification et l'obturation a retro. ID Inf Dent 2012;94(7):20-24
20. Butler WT. Dentin collagen: chemical structure and role in mineralization. In: Linde A. Dentin and dentinogenesis, vol II. Boca Raton: CRC Press, 1984, p. 37-53
21. Camillieri J, Kralj P, Veber M, Sinagra E. Characterization and analyses of acid-extractable and leached trace elements in dental cements. Int Endod J 2012;45(8):737-743
22. Carlisle EM. Silicon: a possible factor in bone calcification. Science 1970;167(3916):279-280
23. Caron G, Azérad J, Faure MO, Machtou P, Boucher Y. Use of a new retrograde filling material (Biodentine) for endodontic surgery: two case reports. Int J Oral Sci 2014;6(4):250-253
24. Cauwels R. Biodentine™ Pulp therapy of traumatized immature incisors. Septodont Case Studies Collection 2013;4:4-8
25. Cauwels R., Martens L. Apexification de la dent permanente immature. Chir Dent Fr 2014;1625-1626:33-36

26. Cauwels R, Martens L. Biodentine partie 4 : la pulpotomie sur molaires lactéales cariées vitales. Dentist News juin 2013;5:17-21
27. Cauwels R, Martens L. Biodentine partie 5 : coiffages pulpaire. Dentist News sept 2013;6:19-23
28. Cauwels R, Martens L. Biodentine partie 8 : l'apexogenèse. Dentist News fév 2014;2:5-9
29. Cauwels R, Martens L. Biodentine™ Pulp capping. Septodont Case Studies Collection 2014;9:26-28
30. Cauwels R, Martens L. Pulpotomie après trauma. Chir Dent Fr 2014;1610-1611
31. Cauwels R, Martens L. Pulpotomie sur la première molaire permanente. Chir Dent Fr 2014;1638:45-48
32. Chueh LH, Huang GTJ. Immature teeth with periradicular periodontitis or abscess undergoing apexogenesis: a paradigm shift. J Endod 2006;32(12):1205-1213.
33. Colon P, Goldberg M. Biodentine™: « Vers une dentine synthétique en capsule ? » Cercle Dentaire 2010;42:1-11
34. Colon P. Symposium Biodentine™ Inf Dent 2010;92(37):12-14
35. Cox CF, Sübay RK, Ostro E, Suzuki S, Suzuki SH. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. Oper Dent 1996;21(1):4-11
36. Cutts G. Pulp chamber floor perforation treatment with Biodentine™. Septodont Case Studies Collection 2012;3:17-18
37. Cutts G. Repair of a perforation of the floor of the pulp chamber with Biodentine™. Septodont Case Studies Collection 2013;4:14-15
38. Cutts G. Vital Pulp Therapy / Pulp Capping with Biodentine™. Septodont Case Studies Collection 2013;5:15-18
39. Dammaschke T. Biodentine™ a new bioactive cement for direct pulp capping. Septodont Case Studies Collection 2012;1:4-9
40. Dammaschke T. Biodentine™ - an Overview. Septodont Case Studies Collection 2012;3:4-9

41. Dammaschke T. Direct pulp capping with Biodentine™: Full restoration in one session. Septodont Case Studies Collection 2012;2:10-15
42. Dammaschke T. Le coiffage pulpaire direct avec Biodentine en restauration directe. Le Dentiste 2012;439:10-11
43. Decup F, Gaucher C. Approche bioconservatrice des tissus pour les restaurations indirectes. Real Clin 2014;25(4):279-287
44. Denga OV, Anisimov MV, Anisimova LV. Clinical effectiveness of acute deep caries treatment in patients with compromised allergic history using a novel calcium silicate material. Septodont Case Studies Collection 2013;4:16-20
45. Dewaele M, Asmussen E, Devaux J, Leloup G. Class II restorations: influence of a liner with rubbery qualities on the occurrence and size of cervical gaps. Eur J Oral Sci 2006;114(6):535-541
46. D'Souza RN, Happonen RP, Ritter NM, Butler WT. Temporal and spatial patterns of transforming growth factor-beta 1 expression in developing rat molars. Arch Oral Biol 1990;35(12):957-965
47. Elnaghy AM. Influence of acidic environment on properties of Biodentine and White Mineral tri Oxide Aggregate: a comparative study. J Endod 2014;40(7):953-957
48. Estrela C, Sydney GB, Bammann LL, Felipe Júnior O. Mechanism of action of calcium and hydroxyl ions of calcium hydroxide on tissue and bacteria. Braz Dent J 1995;6(2):85-90
49. Evans M, Davies JK, Sundqvist G, Figdor D. Mechanisms involved in the resistance of *Enterococcus faecalis* to calcium hydroxide. Int Endod J 2002;35(3):221-228
50. Fagette S. RD94. Etude de l'effet irritant/corrosif aigu sur l'oeil chez le lapin. Ligne directrice 405 de l'OCDE (24/04/2002). Report RD RA DEV 94-010. 2009
51. Felipe WT, Felipe MCS, Rocha MJC. The effect of mineral trioxide aggregate on the apexification and periapical healing of teeth with incomplete root formation. Int Endod J 2006;39(1):2-9
52. Firla M. Coiffage pulpaire direct avec un substitut dentinaire bioactif. Chir Dent Fr 2013;1548
53. Fitzgerald M. Cellular mechanisms of dentinal bridge repair using 3H-thymidine. J Dent Res 1979;58:2198-2206

54. Franquin JC. Etude comparative de la cytotoxicité in vitro de trois produits de restauration coronaire ou radiculaire. Report RG EN RA EXT-RD94/028, 2001
55. Gartner AH, Dorn SO. Advances in endodontic surgery. Dent Clin North Am 1992;36(2):357-378
56. Gluskin AH, Peters CI, Wong RDM, Ruddle CJ. Retreatment of Non-Healing Endodontic Therapy and Management of Mishaps. In: Ingle JI, Bakland LK, Baumgartner JC. Ingle's Endodontics. 6e edition. Hamilton, Ont : BC Decker, 2008, p. 1088-1161
57. Goldberg M, Pradelle-Plasse N, Tran X, Colon P, Laurent P, Aubut V, About I, Boukpepsi T, Septier D. Emerging trends in (bio)material researches. In: Goldberg M, editor. Biocompatibility or cytotoxic effects of dental composites. Oxford: Coxmoor Publishing 2009;181-203
58. Goldberg M, Smith AJ. Cells and extracellular matrices of dentin and pulp: a biological basis for repair and tissue engineering. Crit Rev Oral Biol Med 2004;15(1):13-27
59. Gómez-Rojas A, Jaureguizar GD, Sans FA. Biodentine™ as repair material for furcal perforation: 2 case reports. Septodont Case Studies Collection 2013;5:11-14
60. Gomond P. RD94. Essai de sensibilisation chez le cobaye - essai par maximisation - NF EN ISO 10993-10. Report RG EN RA EXT- RD94/053 2003c
61. Gomond P. RD94. Essais d'irritation de la peau chez le lapin. NF EN ISO 10993-10. Report RG EN RA EXT-RD94/052. 2003a
62. Gomond P. RD94. Evaluation de la toxicité aiguë après administration par voie orale chez le Rat. Méthode par classe de toxicité aiguë. Report RG EN RA EXT-RD94/056. 2003b
63. Goupy L. Biodentine™ a novel dentin substitute for use in paediatric conservative dentistry. Septodont Case Studies Collection 2012;1:10-16
64. Grech L, Mallia B, Camilleri J. Investigation of the physical properties of tricalcium silicate cement-based root-end filling materials. Dent Mater 2013;29(2):20-28
65. Gronthos S, Mankani M, Brahimi J, Robey PG, Shi S. Postnatal human dental pulp stem cells (DPSCs) *in vitro* and *in vivo*. Proc Natl Acad Sci U S A 2000;97(25):13625-13630
66. Gruneser MB, Akbulut MB, Eldeniz AU. Effect of Various Endodontic Irrigants on the Push-out Bond Strength of Biodentine and Conventional Root Perforation Repair Materials. J Endod 2013;39(3):380-384

67. Gutiérrez CA. Apicoectomy treated with an active biosilicate cement: Biodentine™. Septodont Case Studies Collection 2013;6:18-22
68. Han L, Okiji T. Uptake of calcium and silicon released from calcium silicate–based endodontic materials into root canal dentine. Int Endod J 2011;44(12):1081-1087
69. Hargreaves GH, Goodis HE. Seltzer and Bender's dental pulp. Hanover Park : Quintessence Publishing, 2002, 512 p
70. Harmand MF. RD94. Assessment of the genotoxicity Ames test (*Salmonella thyphimurium* and *E. Coli*). Report RG EN RA EXT- RD94/055 2003
71. Hashem DF, Foxton R, Manoharan A, Watson TF, Banerjee A. The physical characteristics of resin composite-calcium silicate interface as part of a layered/laminate adhesive restoration. Dent Mater 2014;30(3):343-349
72. Hashem D, Mannocci F, Patel S, Manoharan A, Brown JE, Watson TF, Banerjee A. Clinical and Radiographic Assessment of the Efficacy of Calcium Silicate Indirect Pulp Capping: A Randomized Controlled Clinical Trial. J Dent Res 2015;94(4):562-568
73. Huang GTJ, Sonoyama W, Liu Y, Liu H, Wang S, Shi S. The hidden treasure in apical papilla: the potential role in pulp/dentin regeneration and bioroot engineering. J Endod 2008;34(6):645-651
74. Iwaya S, Ikawa M, Kubota M. Revascularization of an immature permanent tooth with apical periodontitis and sinus tract. Dent Traumatol 2001;17(4):185-187
75. Jeevani E, Jayaprakash T, Bolla N, Vemuri S, Ram SC, Kalluru RS. Evaluation of sealing ability of MM-MTA, Endosequence, and biodentine as furcation repair materials: UV spectrophotometric analysis. J Conserv Dent 2014;17(4):340-343
76. Johns DA, Shivashankar VY, Shobha K, Johns M. An innovative approach in the management of palatogingival groove using Biodentine and platelet-rich fibrin membrane. J Conserv Dent 2014;17(1):75-79
77. Jontell M, Gunraj MN, Bergenholtz G. Immunocompetent cells in the normal dental pulp. J Dent Res 1987;66(6):1149-1153
78. Jung IJ, Lee SJ, Hargreaves KM. Biologically based treatment of immature permanent teeth with pulpal necrosis: a case series. J Endod 2008;34(7):876-887

79. Kagayama M, Akita H, Sasano Y. Immunohistochemical localization of connexin 43 in the developing tooth germ of rat. *Anat Embryol (Berl)* 1995;191(6):561-568
80. Kayahan MB, Nekoofar MH, McCann A, Sunay H, Kaptan RF, Meraji N, Dummer PMH. Effect of Acid Etching Procedures on the Compressive Strength of 4 Calcium Silicate-based Endodontic Cements. *J Endod* 2013;39(12):1646-1648
81. Keskin C, Demiryurek EO, Ozyurek T. Color Stabilities of Calcium Silicate-based Materials in Contact with Different Irrigation Solutions. *J Endod* 2015;41(3):409-411
82. Khan SIJ, Ramachandran A, Deepalakshmi M, Kumar KS. Evaluation of pH and calcium ion release of mineral trioxide aggregate and a new root-end filling material, e-J Dent 2012;2(2):166-169
83. Khetarpal A, Chaudhary S, Talwar S, Verma M. Endodontic management of open apex using Biodentine as a novel apical matrix. *Indian J Dent Res* 2014;25(4):513-516
84. Kitasako Y, Shibata S, Tagami J. Migration and particle clearance from hard-setting Ca(OH)₂ and self-etching adhesive resin following direct pulp capping. *Am J Dent* 2006;19(6):370-5
85. Koubi G, Colon P, Franquin JC, Hartmann A, Richard G, Faure MO, Lambert G. Clinical evaluation of the performance and safety of a new dentine substitute, Biodentine, in the restoration of posterior teeth - a prospective study. *Clin Oral Invest* 2013;17(1):243-249
86. Koubi G, Franquin JC, Bottéro MJ, Weisrock G, Faure MO. Restaurations esthétiques postérieures. Un nouveau substitut dentinaire. *Inf Dent* 2011;22:22-26
87. Koubi G, Weisrock G, Bottéro MJ, Franquin JC. Biodentine™ : un nouveau substitut dentinaire. *Clinic* 2011;32:497-505
88. Koubi S, Elmerini H, Koubi G, Tassery H, Camps J. Quantitative Evaluation by Glucose Diffusion of Microleakage in Aged Calcium Silicate-Based Open-Sandwich Restorations. *Int J Dent* 2012;2012:105863
89. Laurent P, Camps J, About I. Biodentine™ induces TGF-β1 release from human pulp cells and early dental pulp mineralization. *Int Endod J* 2012;45(5):439-448
90. Laurent P, Camps J, De Méo M, Dejou J, About I. Induction of specific cell responses to a Ca₃SiO₅-based posterior restorative material. *Dent Mater* 2008;24(11):1486-1494.

91. Leiendecker AP, Qi YP, Sawyer AN, Niu LN, Agee KA, Loushine RJ, Weller RN, Pashley DH, Tay FR. Effects of calcium silicate based materials on collagen matrix integrity of mineralized dentin. *J Endod* 2012;38(6):829-833
92. Lenherr P, Allgayer N, Weiger R, Filippi A, Attin T, Krastl G. Tooth discoloration induced by endodontic materials: a laboratory study. *Int Endod J* 2012;45(10):942-949
93. Levin R. A Clinical Review of 50 Pulp Capping Procedures with Biodentine™. *Septodont Case Studies Collection* 2012;3:10-13
94. Linde A, Goldberg M. Dentinogenesis. *Crit Rev Oral Biol Med* 1993;4(5):679-728
95. Lorenzo I. Solution to a pulp chamber perforation: Use of Biodentine™. *Septodont Case Studies Collection* 2014;7:25-26
96. Magloire H, Couble ML, Romeas A, Bleicher F. Odontoblast primary cilia: facts and hypotheses. *Cell Biol Int* 2004;28(2):93-99
97. Mercado Velázquez C, Gómez Martínez G, Cuahonte Sanchez A. Apexification as treatment in immature apex using Biodentine™. *Septodont Case Studies Collection* 2015;10:14-18
98. Miura M, Gronthos S, Zhao M, Lu B, Fisher LW, Robey PG, Shi S. SHED : stem cells from human exfoliated deciduous teeth. *Proc Natl Acad Sci* 2003;100(10):5807-5812
99. Mjör IA. Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 7: The exposed pulp. *Quintessence Int* 2002;33(2):113-135
100. Mjör IA, Sveen OB, Heyeraas KJ. Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 1: Normal structure and physiology. *Quintessence Int* 2001;32(6):427-446
101. Molina AC. Biodentine™ in corrective surgery: A solution to the root perforations. *Septodont Case Studies Collection* 2015;10:8-13
102. Naik M, De Ataide IN, Fernandes M, Lambor R. Treatment of combined endodontic: periodontic lesion by sealing of palato-radicular groove using biodentine. *J Conserv Dent* 2014;17(6):594-597
103. Naveed I, Sobia T, Hanna AB, Muhammad BM. Prevalence of palato gingival groove in maxillary lateral incisors. *Pakistan Oral & Dental Journal* 2011;31(2):424-426
104. Nayak G, Hasan MF. Biodentine-a novel dentinal substitute for single visit apexification. *Restor Dent Endod* 2014;39(2):120-125

105. Nomoto R, McCabe JF. A simple acid erosion test for dental water-based cements. *Dent Mater* 2001;17(1):53-59
106. Nonat A, Franquin JC. Un nouveau matériau de restauration dentaire à base minérale. *Matériaux* 2006, 13-17 novembre 2006, Dijon-France
107. Nowicka A, Lipski M, Parafiniuk M, Sporniak-Tutak K, Lichota D, Kosierkiewicz A, Kaczmarek W, Buczkowska-Radlińska J. Response of Human Dental Pulp Capped with Biodentine and Mineral Trioxide Aggregate. *J Endod* 2013;39(6):747-747
108. O'Brien WJ. *Dental Materials and their Selection*, 4th Edition. Hanover Park: Quintessence Publishing 2008, 448 p
109. Odabas ME, Bani M, Tirali RE. Shear Bond Strengths of Different Adhesive Systems to Biodentine. *Scientific World Journal* 2013;ID 626103
110. Olgart L, Bergenholtz G. The dentin-pulp complex : responses to adverse influences. In: Bergenholtz G, Horsted-Bindslev P, Reit C (eds). *Textbook of endodontology*. Oxford : Blackwell-Munksgaard, 2003, p 23
111. Parirokh M, Torabinejad M. Mineral Trioxide Aggregate: a comprehensive literature review-Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *J Endod* 2010;36(3):400-413
112. Patel N, Best SM, Bonfield W, Gibson IR, Hing KA, Damien E, Revell PA. A comparative study on the in vivo behavior of hydroxyapatite and silicon substituted hydroxyapatite granules. *J Mater Sci Mater Med* 2002;13(12):1199-1206
113. Pawar AM, Kokate SR, Shah RA. Management of a large periapical lesion using Biodentine™ as retrograde restoration with eighteen months evident follow up. *J Conserv Dent* 2013;16(6):573-575
114. Rafter M. Apexification a review. *Dent Traumatol* 2005;21(1):1-8
115. 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* 2012;14(6):535-542
116. Ree M. Vital pulp therapy with Biodentine™ in two immature, traumatized teeth. *Septodont Case Studies Collection* 2014;8:25-30

117. Ridi F, Fratini E, Alfani R, Baglioni P. Influence of acrylic superplasticizer and cellulose-ether on the kinetics of tricalcium silicate hydration reaction. *J Colloid Interface Sci* 2013;395:68-74
118. Rodd HD, Boissonade FM. Vascular status in human primary and permanent teeth in health and disease. *Eur J Oral Sci* 2005;113(2):128-134
119. Roubalikova L. Personal Clinical Experience with Biodentine™. *Septodont Case Studies Collection* 2012;2:16-19
120. Saito T, Toyooka H, Ito S, Crenshaw MA. In vitro study of remineralization of dentin: effects of ions on mineral induction by decalcified dentin matrix. *Caries Res* 2003;37(6):445-449
121. Sawyer AN, Nikonov SY, Pancio AK, Niu L, Agee KA, Loushine RJ, Weller RN, Pashley DH, Tay FR. Effects of Calcium Silicate-based Materials on the Flexural Properties of Dentin. *J Endod* 2012;38(5):680-683
122. Schröder U. Effects of calcium hydroxide-containing pulp-capping agents on pulp cell migration, proliferation, and differentiation. *J Dent Res* 1985;64:541-548
123. Septodont (laboratoire). Biodentine™ : notice d'utilisation [en ligne]. 2011 [consulté le 3/11/2015]. Disponible sur :
http://www.septodont-fr.be/sites/default/files/Biodentine_6.pdf
124. Septodont (laboratoire). Biodentine - Active Biosilicate Technology, scientific file. Saint-Maur-des-Fossés Cedex, France: Research and Development Department, Septodont, 2010.
125. Shabahang S., Torabinejad M. Treatment of teeth with open apices using mineral trioxide aggregate. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 2000;12(3):315-320
126. Shayegan A. RD 94. Etude n° PC 08-001. Etude de RD 94 comme agent pulpaire dans le cadre de pulpotomie et coiffage direct sur les dents lactéales de cochon. Report RD RA DEV 94-006. 2009
127. Shie MY, Huang TH, Kao CT, Huang CH, Ding SJ. The effect of a physiologic solution pH on properties of white mineral trioxide aggregate. *J Endod* 2009;35(1):98-101
128. Simon S, Cooper P, Smith A, Picard B, Naulin Ifi C, Berdal A. Evaluation of a new laboratory model for pulp healing : preliminary study. *Int Endod J* 2008;41(9):781-790
129. Simon S, Machtou P, Pertot WJ. *Endodontie*. Paris : Editions CdP, 2012, 544 p

130. Sinha N, Singh B, Patil S. Cone beam-computed topographic evaluation of a central incisor with an open apex and a failed root canal treatment using one-step apexification with Biodentine™: A case report. *J Conserv Dent* 2014;17(3):284-289
131. Smith AJ. Vitality of the dentin-pulp complex in health and disease: growth factors as key mediators. *J Dent Educ* 2003;67(6):678-689
132. Smith AJ, Lumley PJ, Tomson PL, Cooper PR. Dental regeneration and materials: a partnership. *Clin Oral Investig* 2008;12(2):103-108
133. Soundappan S, Latha Sundaramurthy J, Raghu S, Natanasabapathy V. Biodentine versus Mineral Trioxide Aggregate versus Intermediate Restorative Material for Retrograde Root End Filling: An Invitro Study. *J Dent* 2014;11(2):143-149
134. Spirollari M. Successful use of Biodentine™ in two deep cavity cases. *Septodont Case Studies Collection* 2012;3:14-1
135. Staquet MJ, Durand SH, Colomb E, Roméas A, Vincent C, Bleicher F, Lebecque S, Farges JC. Different roles of odontoblasts and fibroblasts in immunity. *J Dent Res* 2008;87(3):256-261
136. Tanalp J, Karapinar-Kazandag M, Dölekoglu S, Kayahan MB. Comparison of the Radiopacities of Different Root-End Filling and Repair Materials. *Scientific World Journal* 2013; ID 594950
137. Téclès O, Laurent P, Aubut V, About I. Human tooth culture: a study model for reparative dentinogenesis and direct pulp capping materials biocompatibility. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2008;85(1):180-187
138. Téclès O, Laurent P, Zygouritsas S, Burger AS, Camps J, Dejou J, About I. Activation of human dental pulp progenitor/stem cells in response to odontoblast injury. *Arch Oral Biol* 2005;50(2):103-108
139. Torabinejad M. *Mineral Trioxide Aggregate: Properties and Clinical Applications*. Ames, Iowa : John Wiley & Sons Inc., 2014, 342 p
140. Tran XV, Gorin C, Willig C, Baroukh B, Pellat B, Decup F, Opsahl Vital S, Chaussain C, Boukpepsi T. Effect of a Calcium-silicate-based Restorative Cement on Pulp Repair. *J Dent Res* 2012;91(12):1166-1171
141. Tronstad L. Root resorption - etiology, terminology and clinical manifestations. *Endod Dent Traumatol* 1988;4(6):241-252
142. Trowbridge HO. Histology of pulpal inflammation. In: Hargreaves GH, Goodis HE (eds). *Seltzer and Bender's dental pulp*. Hanover Park : Quintessence Publishing 2002;227-245

- 143.Ulloa MB, Estevanovich Delgado MF, Torres GS. Use of biodentine in the treatment of cervical idiopathic reabsorption: Clinical report. *Odontología Vital* 2014;21:27-34
- 144.Vallés M, Mercadé M, Duran-Sindreu F, Bourdelande JL, Roig M. Influence of Light and Oxygen on the Color Stability of Five Calcium Silicate-based Materials. *J Endod* 2013;39(4):525-528
- 145.Villat C, Grosogeat B, Seux D, Farge P. Conservative approach of a symptomatic carious immature permanent tooth using a tricalcium silicate cement (Biodentine): a case report. *Restor Dent Endod* 2013;38(4):258-262
- 146.Vongsavan N, Matthews B. Fluid flow through cat dentine *in vivo*. *Arch Oral Biol* 1992;37(3):175-185
- 147.Vongsavan N, Matthews RW, Matthews B. The permeability of human dentine *in vitro* and *in vivo*. *Arch Oral Biol* 2000;45(11):931-935
148. Waltimo TM, Sirén EK, Orstavik D, Haapasalo MP. Susceptibility of oral *Candida* species to calcium hydroxide *in vitro*. *Int Endod J* 1999;32(2):94-98
- 149.Wang X, Chen L, Xiang H, Ye J. Influence of anti-washout agents on the rheological properties and injectibility of a calcium phosphate cement. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2007;81(2):410-8
- 150.Yoshida S, Ohshima H. Distribution and organization of peripheral capillaries in dental pulp and their relationship to odontoblasts. *Anat Rec* 1996;245(2):313-326
- 151.Zhang CZ, Li H, Young WG, Bartold PM, Chen C, Waters MJ. Evidence for a local action of growth hormone in embryonic tooth development in the rat. *Growth Factors* 1997;14(2-3):131-143
- 152.Zhang W, Yelick PC. Vital Pulp Therapy-Current Progress of Dental Pulp Regeneration and Revascularization. *Int J Dent* 2010;ID 856087

Liste des figures :

Figure 1 : Schéma en coupe transversale de la dentine (Simon <i>et al.</i> , 2012).....	14
Figure 2 : Coupe histologique d'une première molaire de bovin (Simon <i>et al.</i> , 2012).....	17
Figure 3 : Schéma de la dentinogenèse réparatrice induite par coiffage pulpaire direct. (Simon <i>et al.</i> , 2012).....	19
Figure 4 : Conditionnement du Biodentine™ par Septodont™ et par ATO Zizine™ (Septodont™, ATO Zizine™).....	20
Figure 5 : Illustration des étapes de la prise du matériau (Biodentine™: Scientific File).	21
Figure 6 : Evolution de la rhéométrie dynamique du début à la fin du temps de prise (Biodentine™: Scientific Files).	23
Figure 7 : Temps de prise dans une solution saline (Grech <i>et al.</i> , 2013).	24
Figure 8 : Résistance électrique en fonction du temps pendant le temps de prise du Biodentine™ (Goldberg <i>et al.</i> , 2009).	25
Figure 9 : Evolution de la résistance à la compression après la prise du Biodentine™, Fuji IX® et ProRootMTA (Biodentine™: Scientific Files).	26
Figure 10 : Résistance à la compression de différents matériaux après immersion dans une solution HBSS pendant 28 jours (Grech <i>et al.</i> , 2013).	26
Figure 11 : Micro-dureté Vickers de différents matériaux après immersion dans une solution HBSS pendant 28 jours (Grech <i>et al.</i> , 2013).	27
Figure 12 : Résistance à l'immersion immédiate dans l'eau après une, deux et trois immersions (Grech <i>et al.</i> , 2013).	29
Figure 13 : Variation de la couleur en fonction du temps et de différentes expositions (Vallés <i>et al.</i> , 2013).	30
Figure 14 : Variation de la luminosité de différents matériaux exposés à différents irrigants (Keskin <i>et al.</i> , 2015).	30
Figure 15 : Erosion acide dans une solution d'acide lactique de pH 2,74 (Colon <i>et al.</i> , 2010).31	
Figure 16 : Dépôts de cristaux à la surface du Biodentine™ après exposition à une salive artificielle de pH 5,3 (Biodentine™: Scientific File).	32

Figure 17 : Evolution de la hauteur de l'échantillon en fonction de la durée d'exposition à la salive artificielle (Colon <i>et al.</i> , 2010).....	32
Figure 18 : Observation du Biodentine™ au MEB, exposée à un pH de 7,4; 6,4; 5,4; et 4,4 (Elnaghy <i>et al.</i> , 2014).....	33
Figure 19 : Pourcentage de micro-infiltration en fonction de l'adhésif et du mordantage utilisé, à 1 et 90 jours (Goldberg <i>et al.</i> , 2009).....	34
Figure 20 : Schéma de l'obturation et des interfaces (Biodentine™: Schientific Files).....	35
Figure 21 : Score de micro-infiltration lors d'une adhésion avec l'émail, la dentine et une résine composite (Z250) (Biodentine™: Scientific Files).....	35
Figure 22 : Expression de collagène (gauche) et de DSP (droite) après contact avec Biodentine™ (c, d) et MTA (e, f) (About <i>et al.</i> , 2003).....	36
Figure 23 : Libération d'éléments dans une solution acide et tampon (Camillieri <i>et al.</i> , 2012).....	39
Figure 24 : Observation au MEB et au microscope confocal laser montrant la pénétration du matériau dans les canalicules dentinaires (Atmeh <i>et al.</i> , 2012).....	42
Figure 25 : Observation au MEB de l'interface avec la dentine et au côté opposé pour Biodentine™ et le CVI (Atmeh <i>et al.</i> , 2012).....	42
Figure 26 : Interface Biodentine™/dentine observée au MEB (Goldberg <i>et al.</i> , 2009).....	43
Figure 27 : Migration des cellules progénitrices observée au microscope optique (Téclès <i>et al.</i> , 2005).....	44
Figure 28 : Observation de nodules de minéralisation au contact du Biodentine™, au microscope optique (Laurent <i>et al.</i> , 2011).....	45
Figure 29 : Observation au microscope optique de l'expression de DSP et OPN au contact des trois matériaux, à 7 et 14 jours d'exposition aux matériaux (Tran <i>et al.</i> , 2012).....	47
Figure 30 : Schéma de la stimulation de la dentinogenèse réactionnelle par Biodentine™ (About, 2013).....	48
Figure 31 : Observation au MEB de blocs de dentine déminéralisés après 3 mois d'exposition au MTA ou au Biodentine™ (Leiendecker <i>et al.</i> , 2012).....	49
Figure 32 : Schéma du test de flexion d'un échantillon de dentine exposé au Biodentine™ ou au MTA Plus™ (Sawyer <i>et al.</i> , 2012).....	50

Figure 33 : Module d'élasticité, résistance à la flexion et module de dureté de la dentine en fonction du temps et de son exposition au Biodentine™ ou au MTA Plus™ (Sawyer <i>et al.</i> , 2012).....	50
Figure 34 : Score de la forme anatomique (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	54
Figure 35 : Score de l'adaptation marginale (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	54
Figure 36 : Score de la qualité du point de contact (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	54
Figure 37 : Score de la coloration de l'interface (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	54
Figure 38 : Score de l'état de surface (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	55
Figure 39 : Nombre de cas ayant nécessité un recouvrement du Biodentine™ par Z100 en fonction des mois (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	55
Figure 40 : collage d'un inlay avec utilisation de Biodentine™ comme substitut dentinaire (Koubi <i>et al.</i> , 2012).....	56
Figure 41 : Etapes du coiffage pulpaire avec Biodentine™ d'une 11 mature, suivi d'une reconstitution à la résine composite. (Borkar <i>et al.</i> , 2015).....	59
Figure 42 : Etapes du coiffage pulpaire avec Biodentine™ d'une 11 immature. (Cauwels, Martens, 2014).....	59
Figure 43 : Etapes du coiffage pulpaire d'une 46 mature cariée (Firla, 2013).....	60
Figure 44 : Observation au microscope optique d'une obturation au formocrésol, au MTA et au Biodentine™ chez le cochon (Shayegan <i>et al.</i> , 2009).....	62
Figure 45 : Radiographies d'une pulpotomie sur 84 (Cauwels, Martens, 2013).....	63
Figure 46 : Pulpotomie suivi d'une obturation avec Biodentine™ (Cauwels, Martens, 2014).....	64
Figure 47 : Apexogenèse d'une 21 immature par apposition de Biodentine™ (Cauwels, Martens, 2013).....	66
Figure 48 : Apexogenèse d'une 12 par apposition de Biodentine™ (Cauwels, Martens, 2013).....	67
Figure 49 : Mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™ sur 11 et pulpectomie de 12 (Sinha <i>et al.</i> , 2014).....	67

Figure 50 : Mise en place d'un bouchon apical sur 11, suivie d'une obturation complète du canal, le tout avec Biodentine™ (Cauwels, Martens, 2014).....	68
Figure 51 : Obturation <i>a retro</i> de 25 avec Biodentine™ (Caron <i>et al.</i> , 2014).....	71
Figure 52 : Obturation <i>a retro</i> de 12 avec Biodentine™ (Bronnec, 2012).....	72
Figure 53 : Réparation d'une perforation du plancher pulpaire de 26 avec Biodentine™ (Bronnec, 2012).....	75
Figure 54 : Réparation d'une perforation distale de 35 avec Biodentine™ (Bachoo <i>et al.</i> , 2013).....	75
Figure 55 : Scellement d'un sillon palato-radicaire de 22 avec Biodentine™ (Naik <i>et al.</i> , 2014).....	78

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Composition du Biodentine™ (Biodentine™: Scientific Files, Colon <i>et al.</i> , 2010).	22
Tableau 2 : Comparatif de différentes propriétés entre la dentine, Biodentine™ et le MTA.	51
Tableau 3 : Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire indirect avec Biodentine™.....	57
Tableau 4 : Synthèse des cas publiés de coiffage pulpaire direct avec Biodentine™.....	61
Tableau 5 : Synthèse des cas publiés de pulpotomie avec Biodentine™.....	62
Tableau 6 : Synthèse des cas publiés d'apexogenèse avec du Biodentine™.....	68
Tableau 7 : Synthèse des cas publiés de mise en place d'un bouchon apical de Biodentine™	69
Tableau 8 : Synthèse des cas publiés d'obturations a retro avec Biodentine™.....	73
Tableau 9 : Synthèse des cas publiés de réparations de perforations iatrogènes avec Biodentine™.	76
Tableau 10 : Synthèse des cas publiés de réparations de résorptions perforantes avec Biodentine™.	77
Tableau 11 : Synthèse des cas publiés d'obturations de sillons palato-radiculaires avec Biodentine™.	79

SAINT-DENIS Paul – Biodentine™ : de la conception à l'analyse clinique

Nancy 2015 : 98p

Th. : Chir-Dent. : Nancy : 2015

Mots clefs : Biodentine™, biomatériau, coiffage pulpaire, apexogenèse, obturation *a retro*

SAINT-DENIS Paul – Biodentine™ : de la conception à l'analyse clinique

Th. : Chir-Dent. : Nancy : 2015

Le Biodentine™ est un nouveau matériau de la famille des ciments à base de silicate de calcium. Ses indications initiales s'orientent vers les soins conservateurs en contact plus ou moins étroits avec la pulpe dentaire en jouant le rôle de substitut dentinaire. Sa grande biocompatibilité et ses bonnes propriétés mécaniques permettent dans des conditions cliniques favorables de maintenir la vitalité de l'organe dentaire. Sa grande pureté et ses bonnes propriétés physico-chimiques ont progressivement incité plusieurs équipes de recherche à tester ce nouveau biomatériau pour des thérapeutiques endodontiques telles que les traitements d'apexification, les réparations de perforations ou encore les obturations *a retro*. Dans ce contexte, nous étudierons tout d'abord la physio-pathologie du complexe pulpo-dentinaire avant de décrire les différentes propriétés du Biodentine™ à travers une analyse de la littérature. Enfin une analyse critique du Biodentine™ sera développée en le comparant à d'autres biomatériaux existant présentant les mêmes indications cliniques, tel que le MTA® par exemple.

JURY : Président :	Pr P. AMBROSINI	Professeur des Universités
Directeur :	<u>Dr M. ENGELS-DEUTSCH</u>	Maître de Conférences
Co-directeur :	<u>Dr M. VINCENT</u>	Assistant Hospitalier Universitaire
Juge :	Dr R. BALTHAZARD	Maître de Conférences

SAINT-DENIS Paul

Adresse de l'auteur : 64 rue Sainte Barbe 54500 Vandoeuvre-lès-Nancy