ACADEMIE DE PARIS
UNIVERSITE RENE DESCARTES (PARIS V)
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE
2003

THESE

POUR LE DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le :
11 juin 2003

PAR
Patrick FOURNIER

ETANCHEITE APICALE EN MICROCHIRURGIE ENDODONTIQUE A RETRO

JURY

Monsieur le Professeur Michel Degrange	Président
Monsieur le Professeur Christian Knellesen	Assesseur
Monsieur le Docteur Bruno Gogly	Assesseur
Monsieur le Docteur Denis Bouter	Assesseur

UNIVERSITE RENE DESCARTES
FACULTE DE CHIRUGIE DENTAIRE

SECTION	SOUS-SECTION	PROFESSEURS des UNIVERSITES	PROFESSEURS 1ER GRADE	MAITRES DE CONFERENCES
DEVELOPPEMENT CROISSANCE PREVENTION	56.01 PEDODONTIE	Mme WOLIKOW		M. ALDIN Mme GOUVERNAIRE Mle LANDRU Mme VILETTE
	56.02 ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE	M. LAUTROU	M. GUGNY	Mme BENAHMED M. DECKER M. DUNGLAS Mme DHUMEAUX-BOEDELS M. VERMELIN
	56.03 PREVENTION EPIDEMIOLOGIE ECONOMIE DE LA SANTE ODONTOLOGIE LEGALE		M. NEJAR M. DETRUIT M. NOSSINTCHOUK	Mme DARGENT-PARE Mle FOLLIGUET M. TAVERNIER Mme GUIVANTE-NABET
SCIENCES BIOLOGIQUES CHIRURGIE	57.01 PARODONTOLOGIE	Mle BRION M. SAFFAR		M. BIGOT Mme COLOMBIER M. DANAN M. DETIENVILLE M. GUEZ
	57.02 CHIRURGIE BUCCALE PATHOLOGIE & THERAPEUTIQUE ANESTHESIOLOGIE ET REANIMATION	Mme POIDATZ	M. THIBAULT	M. HADIDA M. LESCLOUS M. MAMAN M. WIERZBA
	57.03 SCIENCES BIOLOGIQUES (BIOCHIMIE, IMMUNOLOGIE, HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE, ANATOMIE PATHOLOGIQUE, GENETIQUE, BACTERIOLOGIE, PHARMACOLOGIE)	M. GOLDBERG M. PELLAT M. GODEAU		M. ARRETO Mme CHARDIN M. GOGLY M. LE MAY
SCIENCES PHYSIQUES ET PHYSIOLOGIQUES ENDODONTIQUES PROTHETIQUES	58.01 ODONTOLOGIE CONSERVATRICE ENDODONTIE	M. LASFARGUES M. LEVY	Mme MELCER	M. BONTE M. BOUTER M. CAMUS M. LEVY M. LUSARDI M. NEBOT Mme TOUMELIN-CHEMLA
	58.02 PROTHESES	Mme BUCH	M. CHOURAQUI M. RIGNON-BRET	M. BEGIN M. DOT M. EID M. GIROT M. PIERRISNARD M. POSTAIRE M. RENAULT M. TRAMBA M. TIRLET
	58.03 SCIENCES ANATOMIQUES PHYSIOLOGIQUES OCCLUSODONTIQUES BIOMATERIAUX BIOPHYSIQUE, RADIOLOGIE	M. DEGRANGE	M. KNELLESEN	M. ATTAL M. CHARRIER M. CHERRUAU M. FLEITER M. GAUDY M. LAISON M. PELLERIN M. SADOUN

Remerciements

A Monsieur le Professeur Michel Degrange

Docteur en chirurgie dentaire
Docteur es sciences odontologiques
Professeur des universités à la faculté de chirurgie dentaire de la faculté Paris V
Praticien hospitalier

Vous me faites l'honneur de présider cette thèse. Votre engagement auprès de vos étudiants, vos compétences et votre humanité m'ont toujours impressionné. J'ai tant appris grâce à vous. Je vous témoigne ma reconnaissance et un profond respect.

A Monsieur le Professeur Christian Knellesen

Docteur en chirurgie dentaire
Docteur es sciences odontologiques
Professeur des universités à la faculté de chirurgie dentaire de la faculté Paris V
Praticien hospitalier

Vous me faites l'honneur d'être membre du jury. Je vous témoigne toute ma reconnaissance et mon admiration.

A Monsieur le Docteur Bruno Gogly

Docteur en chirurgie dentaire
Docteur es sciences odontologiques
Maître de conférences à la faculté de chirurgie dentaire de la faculté Paris V
Praticien Hospitalier
Chef du service d'odontologie de l'hôpital Albert Chenevier, Créteil

Vous me faites un très grand plaisir en étant membre du jury. Votre arrivée à la tête du service de Créteil est une chance. Vous y brillé par votre clairvoyance, votre finesse et votre gentillesse.

A Monsieur le Docteur Denis Bouter

Docteur en chirurgie dentaire
Maître de conférences à la faculté de chirurgie dentaire de la faculté Paris V
Praticien hospitalier

Vous m'avez fait l'honneur de diriger cette thèse. Apprendre à vos côtés durant mon cursus clinique a été une joie. La passion et l'engagement qui vous animent sont communicatifs. Je salue votre disponibilité et votre gentillesse durant l'élaboration de ce travail.

A Monsieur le Docteur Willy Pertot

Docteur en chirurgie dentaire

Je suis heureux de vous avoir inviter à cette soutenance. Je vous remercie d'avoir participé à l'élaboration iconographique.

A Madame le professeur Monique Brion

Elle a été chef de service de l'hôpital Albert Chenevier durant mon cursus. Je tiens à saluer cette grande Dame de la dentisterie qu'il est difficile d'appeler Mademoiselle. Elle est une vraie mère pour les promotions qu'elle a dirigé, parfois dure et trop souvent incomprise. Je lui exprime mon profond respect.

A mes parents

De m'avoir poussé et soutenu pendant 25 longues années.
De l'amour et du dévouement que vous nous donnez.

A Isabelle et à Julien

Je suis fier d'être leur grand frère.

A mes grands parents et à ma famille, nombreuse

A ces liens forts qui nous unissent.

A Papé, à Manou

J'ai une pensée émue en imaginant leur fierté ce jour de soutenance.

Aux copains d'abord :

***Aux Boiseurs** : Mij, Nak, Murray, Jiste et les guest Choune, Duke (merci): jamais le « hauban » ne pourra disparaître.*
***Aux Lillois** en particulier à Nasique et Fab si proches malgré les kilomètres.*
***Aux Dentistes** : Caro (codirectrice qui deviendra grande. merci), Katia, Johane, Ann-Clothilde, Elise, Fab, Djidj, à la petite famille de Créteil.*

A Gérard

De m'avoir montré la voie

A Nina
Son soutien et son amour
me sont si précieux.

Table des matières

INTRODUCTION **page 11**

CHAPITRE I La microchirurgie endodontique **page 13**

1. Indications……...……...…….…….....page 14

1.1 Limites de l'endodontie...……..……..……...…page 14

1.2 Accident iatrogénique……..……...……...…page 15

1.3 Lésion d'origine endodontique sous pilier de prothèse conjointe……..……page 15

1.4 Signes cliniques ou radiologiques persistants……page 15

2. Contre indications…….……....page 16

2.1 Absolues…….....page 16

2.2 Relatives……...…..…page 16

3. Critères de succès...……..…….……..page 17

3.1 Critères cliniques……...……..page 17

3.2 Critères radiologiques…….…..……page 18

3.3 Paramètres du succès…….…..……...…page 18

4. Causes d'échec……...……...……..….page 19

4.1 Endodontiques pures……..…….…..….page 19

4.1.1 Contamination bactérienne……....…….…page 19

4.1.2 Traumatisme chronique……..…..…….…..page 20

4.2 En rapport avec une chirurgie de la cavité buccale……...…….…page 21

5 Taux de succès……..…...……..page 21

5.1 Endodontie orthograde…….……...page 21

5.2 Chirurgie endodontique……..……..……page 22

5.2.1 Etudes prospectives de Rubinstein et al. en 1999 (75) et 2002 (76)...page 24

6. Protocoles chirurgicaux et origines techniques d'un manque d'étanchéité apicale....page 26

6.1 L'ostéotomie……...page 26

6.2 La résection apicale……...……page 27

6.3 Augmentation de l'acuité visuelle…….…page 29

6.3.1 Le microscope……..…....page 29

6.3.2 Le bleu de méthylène……..……..……..……page 30

6.3.3 Conditions d'obturation……...……page 30
6.4 Techniques de préparation canalaire…….……page 31
6.4.1 Technique rotative traditionnelle..…….…..page 31
6.4.2 Technique ultrasonore…….….page 32

CHAPITRE II Les matériaux d'obturation *a retro* **page 37**
1. Résection apicale sans obturation……...…….....page 39
2. L'amalgame..…….…….….…page 39
3. Les eugénates ZOE, IRM, Super EBA……...…..page 41
4. Les ciments verres ionomères…….……page 42
5. Les résines composites…….……page 42
5.1 Structure histologique de la dentine radiculaire de la dent dépulpée…….page 42
5.2 Les composites :……..…...page 43
5.3 Les copolymères PMMA-4 Meta (SuperBond ®)……..page 45
6. Le MTA (Mineral trioxide aggregate)……..page 46
7. Paramètres de sélection d'un matériau…….……page 47

CHAPITRE III Les tests d'étanchéité *in vitro* **page 49**
1. Etanchéité…….....page 50
1.1 L'étanchéité des restaurations coronaires :……page 50
1.2 L'étanchéité des obturations endodontiques……..….page 51
1.3 L'étanchéité des matériaux d'obturation *a retro*…….……...……page 52
2. Protocoles expérimentaux……page 53
2.1 Tests électrochimiques……...page 53
2.1.1 Principe……page 53
2.1.2 Avantages...…….….page 55
2.1.3 Inconvénients…..……page 55
2.2.Tests de percolation…….……...page 57
2.2.1 Principe……page 57
2.2.2 Avantages……....page 57
2.2.3 Inconvénients……...……page 57
2.2.4 Conclusion (synthèse d'études)……...……page 62
2.3.Tests par système de filtration de fluides (SFF)……...…….……page 63
2.3.1 Principe…….……..….page 63

2.3.2 Avantages…….……...page 65
2.3.3 Inconvénients…….……..……page 66
2.3.4 Discussion ……..…….....page 66
2.3.5 Protocole de Wu MK…….……...……page 68
2.3.6 Conclusion (synthèse d'études)……..……page 70
2.4. Les tests d'étanchéité aux bactéries ou à leurs sous produits…….....……page 70
2.4.1 Principe……...……..page 70
2.4.2 Avantages……..page 71
2.4.3 Inconvénients (synthèse d'études)…….…..…….page 71
2.4.4 Conclusions et ouverture sur les tests aux endotoxines...…….....page 73
3. Analyse interprotocole……...……..page 75
3.1 Intégration des résultats : tableau 13……..…….……...page 75
3.2 Facteurs supplémentaires……page 76
3.2.1 Milieu de stockage……...……..…..…..page 76
3.2.2 Milieu de conservation…….….page 77
3.2.3 Préparation des spécimens……page 77
3.2.4 Milieu expérimental…….….page 78

CONCLUSIONS **page 79**

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figures

Fig. 1 : Clichés radiographiques issus du guide clinique de Camus [13 pages 91-92]…….....page 18
Fig. 2 : Dessins anatomiques à l'encre de Chine de W. Hess en 1917 ……...…….……page 27
Fig. 3 : Effet de l'inclinaison du biseau sur l'exposition tubulaire……...……...page 28
Fig. 4 : Vue schématique des surfaces sectionnées selon 2 angulations de résections….page 29
Fig. 5 : Microscope chirurgical…….……...……page 29
Fig.6 : Préparation ultrasonore sous microscope…….…….page 29
Fig.7 : Surface radiculaire sectionnée enduite de bleu de méthylène …….…..…page 31
Fig.8 : Utilisation du système Stropko…….……page 31
Fig. 9 : Préparation rotative désaxée……page 32
Fig. 10 : Défauts de préparation par technique rotative……..…….page 32
Fig. 11 Photographie au microscope d'une obturation après préparation rotative…....page 31
Fig. 12 Comparaison d'une tête de micro-contre angle et d'un insert ……page 33
Fig. 13 : Inserts US « Carr tips »……...……...page 33
Fig. 14 : Anatomie canalaire schématique en fonction du niveau de coupe…...…..…...page 35
Fig.15 Préparation ultrasonore d'un isthme……page 35
Fig 16 Préparation des spécimens……...…page 53
Fig.17 : Circuit électrique (mesure de l'intensité ou de la tension)……...…….…page 55
Fig.18 Intensités de courant obtenues par un test électrochimique …...…….…page 56
Fig. 19 : Modèle de filtration de fluide présenté dans l'article de Greer……...……..page 64
Fig. 20 : Simulation du flux à l'intérieur d'un échantillon……...……page 66
Fig 21 : Schéma présenté dans l'article de Wu [117]……...page 69
Fig.22 : Photo (a) et schéma (b) des échantillons confectionnés par Adamo et al..…….page 71
Fig 23 : Protocole expérimental schématique présenté par Torabinejad…….…….page 74

Photos

Photo 1 : Pénétration de colorant sur coupe longitudinale de racine obturée a retro à l'amalgame en présence de sang ……page 59
Photo 2 : Pénétration de colorant sur coupe longitudinale de racine obturée a retro au MTA en milieu sec……page 59

Tableaux

tableau 1 : Contamination du traitement endodontique en cas de non étanchéité coronaire……..…page 20
Tableau 2 : Etudes de Trope[105] et Tronstad [104]……...……..…….…..page 22
Tableau 3 : Taux de succès en chirurgie endodontique présentés par 7 études…...……page 23
Tableau 4 : Avantages inconvénients de différents matériaux d'obturation a retro…....page 48
Tableau 5 : Résultats de tests électrochimiques référencés sur Pubmed…...……...…page 56
Tableau 6 : Diversité des colorants utilisés dans les études …...……page 58
Tableau 7 : Variabilité des types de mesure rencontrées dans différents tests de percolation sur des matériaux d'obturation a retro……page 61
Tableau 8 : Comparaison d'études par percolation publiées entre 1993 et 2003…….....page 63
Tableau 9 : Comparaison de résultats d'études par SFF parus entre 1993 et 2003 …...page 67
Tableau 10 : Classement des matériaux d'après l'étude de Wu……..…….……page 69
Tableau 11 : Classements de matériaux obtenus par test bactérien dans 5 études……...page 72
Tableau 12 : Classement des matériaux présenté dans l'étude de Torabinejad……....page 74
Tableau 13 : Comparatif des résultats d'études tous protocoles confondus…...……..page 75
Tableau 14 : Recensement des rangs obtenus par 4 matériaux……page 76

Les recherches bibliographiques ont été effectuées sur Medline : mots clés : « root end filling », « ultrasonic root end preparation », « endodontic surgery », « root end microleakage », « MTA », « dentin permeability », « root canal anatomy of the human permanent teeth' » puis à partir des bibliographies des articles sélectionnés et enfin sur Medline en utilisant les noms d'auteurs retenus comme mots clés.

INTRODUCTION

L'étiologie bactérienne dans la formation des lésions périapicales semble évidente à l'heure actuelle. Kakehashi[46] et Paterson[67] ont montré qu'aucune lésion apicale ne se développait chez des rats exempts de germes buccaux lorsque la pulpe dentaire était exposée. Des études similaires ont été effectuées chez le chien [44] et le singe[113] et aboutissent également à l'implication bactérienne.
L'étude histologique de Walton [75] sur des singes montre que la population bactérienne reste confinée dans le réseau canalaire du fait de la réaction inflammatoire périapicale qui aboutit à la parodontite apicale. Celle de Pitts[69] dénonçait déjà l'implication des endotoxines bactériennes dans l'amorce de l'inflammation et la destruction osseuse. Yamasaki[123] en 1992 a montré chez le rat une augmentation constante du taux d'endotoxines dans le périapex corrélée à l'extension de la lésion alors que la population bactérienne essentiellement Gram négatif augmentait pendant quelques jours puis décroissait rapidement.
Le potentiel antigénique des lipopolysaccharides bactériens semble être à l'origine de l'initiation et de l'entretien de la réponse immunitaire qui mène à la lésion périapicale [24, 69].

La technique usuelle employée pour traiter ce type de lésion est la technique endodontique orthograde. Les principes énoncés par Schilder [83] en 1974 restent d'actualité : « cleaning, chaping and filling » , c'est à dire un nettoyage chimique et mécanique approfondi du canal radiculaire par lequel la pulpe, les débris tissulaires en cas de nécrose et les microorganismes sont éliminés, une mise en forme bien pensée avec en toile de fond le respect de la structure canalaire, et enfin une obturation étanche du canal pour limiter le risque de dissémination bactérienne ou d'endotoxines du réseau canalaire vers le périapex. Ils permettent d'obtenir une cicatrisation périapicale.

La chirurgie endodontique a pour objectif de traiter les lésions apicales par voie retrograde quand la voie orthograde est impossible, compliquée ou a échoué.
Les techniques d'endodontie retrograde modernes reprennent les principes de l'endodontie orthograde. Elles comprennent un nettoyage par curetage périapical, l'élimination par résection apicale d'une partie du foyer infectieux, le nettoyage et la mise en forme canalaire *a retro*, et l'obturation des orifices canalaires préparés par la mise en place en place d'un biomatériau offrant le maximum d'étanchéité.

Un des paramètres de la réussite de cette thérapeutique est le maintien de cette étanchéité car le système canalaire ne peut être intégralement assaini. Elle devrait empêcher à long terme la recontamination du périapex. Or aucun matériau dentaire ne peut garantir une herméticité totale.

Le but de ce travail est d'analyser le niveau d'étanchéité requis et les modalités d'évaluation *in vitro*.

Dans un premier temps, nous aborderons les paramètres d'étanchéité liés à la technique chirurgicale .

Dans un deuxième temps nous ferons le point sur les matériaux d'obturation *a retro* retenus à l'heure actuelle.

Dans un troisième temps nous passerons en revue une batterie de tests d'étanchéité in vitro à partir d'articles publiés entre 1993 et 2002 afin d'étudier la variabilité des protocoles, des résultats et d'en proposer une analyse.

CHAPITRE I

LA MICROCHIRURGIE ENDODONTIQUE

La chirurgie endodontique est pratiquée depuis une trentaine d'années et a pour objectifs de traiter la zone apicale par voie chirurgicale dite retrograde, c'est à dire d'avoir accès à la surface radiculaire pathologique, de réséquer l'apex et d'effectuer en général un traitement canalaire *a retro* ainsi qu'une obturation.

Depuis ces 10 dernières années, cette discipline a subit une succession de révolutions essentiellement d'origine technologique mais les principes de base n'ont pas changé.
Le principe de base qui dit « la chirurgie endodontique est indiquée quand les dents ne répondent pas au traitement orthograde » reste d'actualité.
Un autre concept a été reconsidéré et modifié. La résection apicale seule ne suffit pas. Le scellement apical de tous les orifices canalaires est indispensable[(32)].

1. Indications

La lésion apicale est une réaction de défense de l'organisme avec mise en jeu des réponses immunitaires. Elle implique un traitement spécifique de l'endodonte.

L'endodontie orthograde est le traitement usuel. Elle présente des taux de succès importants à condition de maîtriser un certain nombre de paramètres mais les cas d'échecs à long terme sont relativement fréquents. Ils impliquent alors une reprise de traitement endodontique par voie orthograde. Cependant, cette voie présente des limites et d'autres techniques peuvent être indiquées.

Le traitement chirurgical est toujours proposé en deuxième intention en cas d'échec ou d'impossibilité de reprise de traitement endodontique orthograde après avoir mis en balance les risques et les bénéfices pour le patient.

La qualité du traitement canalaire doit être soigneusement considérée et différentes incidences radiologiques pratiquées afin de déterminer la cause de l'échec.

Il peut être dû à une **contamination bactérienne** :

Des bactéries ou des toxines bactériennes peuvent se trouver à l'intérieur du réseau canalaire et diffuser vers le périapex. De nombreux facteurs sont incriminés : désinfection canalaire incomplète, obturation incomplète, obturation coronaire non étanche…mais l'importance relative de ces paramètres demeure inconnue.

Il peut être associé à une **irritation chronique** : en cas de dépassement du matériau d'obturation, de vide canalaire, de perforation, de fissure ou de fracture radiculaire.

En cas de symptomatologie signant une implication endodontique, la chirurgie n'est indiquée que si la reprise de traitement endodontique est impossible, compliquée ou a échoué :

1.1 Limites de l'endodontie d'ordre anatomique (10% des cas selon Camus [13])

- racines courbes avec impossibilité d'atteindre la longueur de travail
- système canalaire complexe
- apex complexe
- calcifications intracanalaires
- dens in dente

1.2 Accident iatrogénique (66% des cas selon Camus[13])

- obturation incomplète. Généralement, il s'agit d'une erreur de longueur de travail ou de préparation canalaire mal conduite qui aboutit à une accumulation de bactéries dans le vide canalaire. Il peut également s'agir d'un instrument fracturé et irrécupérable dans le canal qui empêche la mise en forme aboutissant alors à un vide canalaire.
- débordement du matériau d'obturation
- perforation radiculaire

1.3 Lésion d'origine endodontique sous pilier de prothèse conjointe (24% des cas selon Camus[13])

- le traitement orthograde nécessite la dépose d'un élément prothétique satisfaisant alors que la chirurgie permet de le préserver
- le traitement orthograde nécessite le démontage d'un tenon anatomique dont la dépose a échouée ou risque de fragiliser la racine

1.4 Signes cliniques ou radiologiques persistants

Les signes cliniques (tuméfaction, douleurs, fistule) ou radiologiques (radioclarté résiduelle ou persistante) peuvent persister malgré une obturation canalaire satisfaisante.

Trois causes sont généralement citées dans les causes d'échec des reprises de traitement canalaire[3]:

- l'anatomie radiculaire avec des courbures parfois trop importantes
- l'anatomie canalaire avec des canaux en « C » ou en « S », des bifurcations canalaires, des pulpolites, des calcification canalaires.
- l'accident iatrogène : perforation, fracture instrumentale, erreur d'obturation.

Les manifestations cliniques et radiologiques de l'échec endodontique orthograde doivent être parfaitement analysées avant d'envisager une chirurgie a retro.

2. Contre indications

2.1 Absolues :

Elles sont d'ordre général. Ce sont les contre indications et réserves de la chirurgie traditionnelle auquel cas l'extraction est indiquée : patients immunodéprimés (VIH…), à risque Oslérien, personnes ayant subit des irradiations faciales, diabète mal équilibré, troubles du rythme interdisant l'utilisation de vasoconstricteurs.

2.2 **Relatives**

D'ordre **général** :

Des médications peuvent contre-indiquer l'acte chirurgical comme la prise d'anticoagulants.

Les troubles de l'hémostase et de la crase sanguine (hémophilies, leucémies) impliquent des mesures et des réserves particulières.

D'ordre **loco-régional .**

Elles comprennent les raisons anatomiques : nerf dentaire inférieur, sinus procidents, fosses nasales, artère palatine, localisation du foramen mentonnier, position et accès de la dent à traiter.

La miniaturisation des instruments et une meilleure acuité visuelle facilitent l'accès à certains sites et étendent le champ d'indications.

D'ordre **local**

Le rapport couronne clinique/racine doit être attentivement évalué notamment en cas d'atteinte parodontale car il sera modifié suite à la résection apicale.

Une fêlure non diagnostiquée peut évoluer en fracture.

L'élément prothétique jugé satisfaisant peut en réalité avoir induit une fracture radiculaire.

Des lésions parodontales sévères peuvent contre-indiquer la chirurgie endodontique : poches, mobilités, lésions endo–paro car le chirurgien par son acte a de grandes chances de provoquer une communication endo parodontale.

3. Critères de succès

Le succès de la chirurgie endodontique dépend de la complexité du système canalaire mais aussi de l'habileté et de l'expérience du praticien.
Il dépend de la sélection du cas chirurgical : la cause doit être exclusivement endodontique si l'on veut majorer les chances de succès. En cas de lésion endo-paro, le pronostic est réservé.
Les critères de succès sont les mêmes que pour un traitement orthograde. Seltzer[84] propose le terme de « fonction clinique adéquate » c'est à dire l'obtention d'une dent fonctionnelle sans signe clinique ni symptôme même si l'examen radiologique révèle une imperfection technique du traitement canalaire. Cette définition met donc en avant la notion de confort.
Mais la notion de succès endodontique demeure un sujet de controverse puisqu'il existe différentes définitions du succès comme le souligne Gutmann [40]: la définition clinique est la cessation de toute symptomatologie émanent de la dent causale, la définition radiologique est la résolution de la radioclarté apicale en contact avec l'apex radiologique, la définition histologique est le rétablissement de la structure tissulaire apicale (néoformation osseuse, cémentaire et ligamentaire) en l'absence de tout signe d'inflammation matérialisé par la présence de cellules inflammatoires ou d'œdème.

Seuls les critères cliniques et radiologiques sont reconnus pour valider un succès chirurgical.

3.1 Critères cliniques

Un silence clinique peut être en faveur d'une guérison mais l'absence de signes cliniques seule ne signifie pas forcément guérison

- absence de symptômes
- silence à la percussion
- absence de tuméfaction, fistule, atteinte sinusienne ou autre signe de processus infectieux
- fonctionnalité et confort de la dent

3.2 Critères radiologiques

- Plusieurs contrôles radiographiques sont effectués à partir de 3 mois. L'obturation canalaire et l'obturation a retro doivent être évalués en terme de condensation et de densité. On recherche une éventuelle image apicale et un épaississement ligamentaire. L'absence d'image radioclaire avec une lamina dura continue peut signer une cicatrisation. Un élargissement ligamentaire peut signer une parodontite apicale. Un ligament régulier est en faveur d'une cicatrisation. La présence de trabéculations osseuses signe un os néoformé de cicatrisation (fig 1).

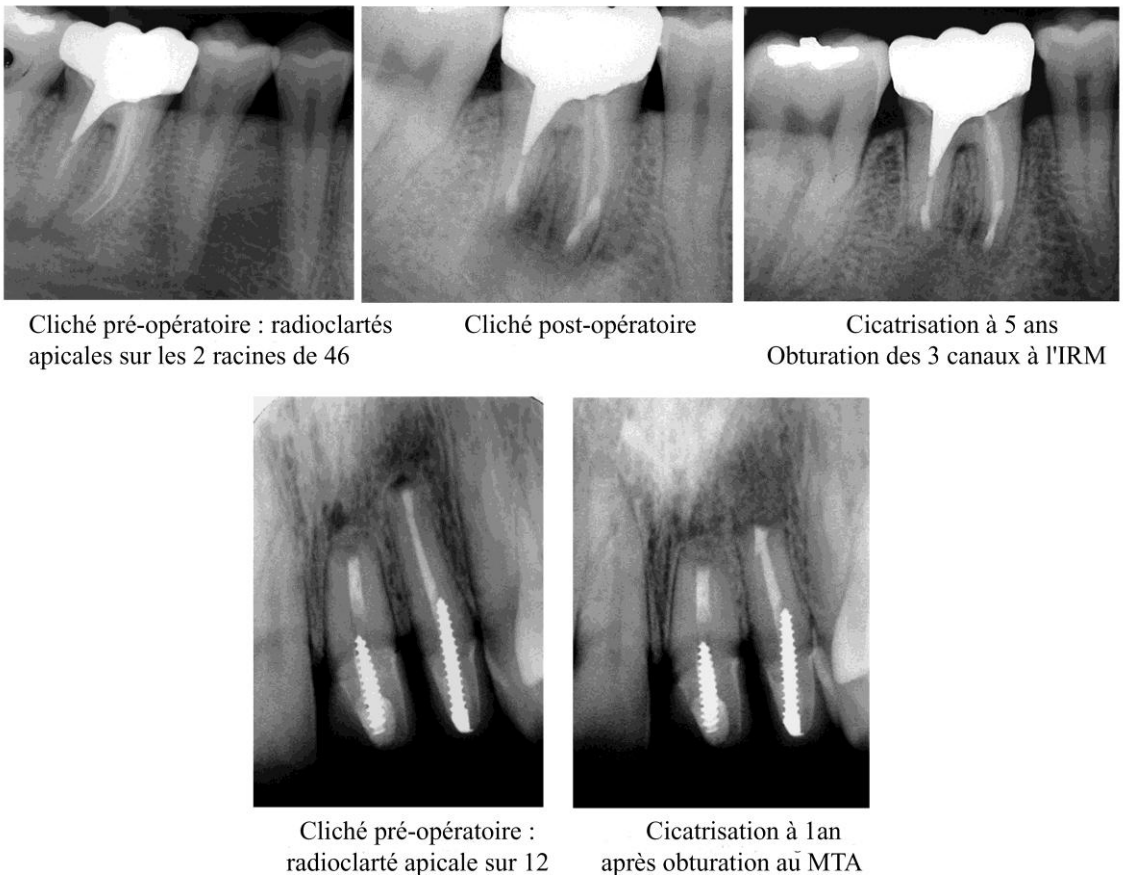

Fig 1. Clichés rétro-alvéolaires réalisés par le Dr W. Pertot

3.3 Critères du succès:

- sélection du cas : diagnostic, indication (accès au site chirurgical, mise en évidence d'une fracture, …)
- étanchéité coronaire
- localisation et préparation des canaux et isthmes canalaires
- matériau d'obturation

4. Causes d'échec

4.1 Endodontiques pures

4.1.1 Contamination bactérienne

De nombreux paramètres conditionnent le processus qui aboutit à la contamination du réseau canalaire puis à la diffusion de bactéries ou de sous produits bactériens vers le périapex induisant une réaction inflammatoire. L'importance relative de ces paramètres dans l'entretien d'une lésion apicale demeure inconnue à l'heure actuelle.

- procédure de nettoyage :

  La persistance de tissus infectés peut aboutir à un échec : curetage incomplet des tissus de granulation périapicaux, racine pathologique non traitée, canal oublié, isthme non entièrement préparé ou obturé.

- étanchéité apicale :

  La préparation et l'obturation a retro vise à stopper la dissémination d'irritants vers le périapex : mauvais protocole de mise en place du matériau d'obturation, manque ou perte d'étanchéité du matériau d'obturation, microfissures dues à la technique de retropréparation.

- étanchéité coronaire :

  L'herméticité recherchée par la mise en place d'un matériau d'obturation n'est pas complète. Parmis les paramètres qui semblent améliorer les taux de succès en chirurgie endodontique, la reconstitution coronaire est un facteur qui a été largement étudié ces dernières années dans le cadre de l'endodontie orthograde. Un certain nombre d'études récentes montrent qu'un manque d'étanchéité de la reconstitution coronaire aboutit à une contamination de l'obturation endodontique en quelques jours (tableau 1) soit à cause d'espaces canalaires non obturés soit à cause d'une dissolution du ciment de scellement[57, 58,59, 103]. Malgré le protocole de nettoyage, désinfection et obturation, ce paramètre est mis en cause en chirurgie endodontique. Sundqvist [89] rapporte des taux d'échec endodontiques inférieurs quand la reconstitution coronaire est jugée hermétique.

tableau 1. Contamination du traitement endodontique en cas de non étanchéité coronaire.

Auteurs	Milieu	temps	% dents contamiées
Alves et al 1998 [4]	souches anaérobies	70 j	**81%**
Chailervanitkul et al. 1997 [16]	S. Sanguis / P. Intermedia	90 j	**50% / 70%**
Chailervanitkul et al. 1996 [15]	Fusobacterim nucleatum	12 sem.	**100%**
Trope et al, 1995 [106]	endotoxines	21 j	**30%**
Khayat et al, 1993 [49]	salive	30 j	**100%**
Torabinejad et al. 1990 [103]	S. Epidermis	51 j	**100%**
Torabinejad et al. 1990 [103]	Proteus vulgaris	73 j	**100%**

Le tableau 1 recense des résultats d'études évaluant le pourcentage de dents entièrement contaminées au bout d'un temps donné lorsque l'extrémité coronaire de la racine est mise en contact avec une population bactérienne pendant toute la durée de l'expérience.

Les dents présentent un traitement canalaire à la gutta percha + ciment de scellement.

Quelle que soit la technique d'obturation à la gutta percha, le traitement n'est pas étanche.

- l'hôte

  Les capacités immunitaires de l'hôte interviennent dans la tolérance et l'inactivation des irritants susceptibles de diffuser vers le périapex. Nous savons que nos thérapeutiques aboutissent rarement à une désinfection totale de l'endodonte et à l'arrêt total de la diffusion de bactéries ou d'entoxines bactériennes. Pourtant dans de nombreux cas, la dent est asymptomatique et ne présente aucun signe clinique ou radiologique signant une lésion endodontique. Ce seuil de tolérance est variable. Des expérimentations sont à l'étude pour évaluer ce seuil de tolérance.

4.1.2 Traumatismes chroniques

- fêlure radiculaire
- fissure ou fracture radiculaire non visualisée durant l'acte chirurgical
- persistance d'un irritant mécanique exogène : dépassement de matériau, vide canalaire dû à un manque de matériau

4.2 En rapport avec une chirurgie de la cavité buccale

Ce sont les accidents hémorragiques immédiats ou retardés, les flambées infectieuses, les retards de cicatrisation.

Ce sont aussi les complications dues à l'accessibilité du site chirurgical qui si elles sont mal appréciées peuvent nuire au bon déroulement du protocole chirurgical.

5. Taux de succès.

5.1 Endodontie orthograde.

Le succès dépend de la complexité du réseau canalaire, des possibilités de nettoyage et de désinfection et de la reconstitution coronaire.

Les taux de succès à long terme avancés dans la littérature sont très variables : 86% [91] à 96%[87].

Le rôle majeur de l'étanchéité coronaire est mis en avant actuellement.

Trope [105] et Tronstad [104] ont étudié le rapport entre la qualité de la restauration coronaire, celle de l'obturation endodontique et la présence ou non d'image de lésion périapicale.

Trope en 1995 a monté une étude en pratiquant un examen clinique et radiologique de 1001 dents par 2 praticiens indépendants chez des patients suivis à la faculté d'Oslo.

Tronstad en 2000 a repris le même protocole. Il a étudié 1010 dents chez des patients suivis à la faculté de Philadelphie. Par contre, il a exclu les dents reconstituées avec des screw post ou des tenons.

Les 2 auteurs montrent que l'étanchéité coronaire influence significativement les taux de succès, mais tandis que Trope met en évidence le fait que l'étanchéité coronaire serait un paramètre plus important que la qualité de l'obturation, Tronstad conclut l'inverse (tableau 2).

Tableau 2 : études de Trope[105] et Tronstad [104]

succès = absence de radioclarté périapicale *Bon traitement canalaire radiologique = bonne densité du matériau d'obturation dans le tiers apical*	**Ray HA, Trope M.[105] 1995**	**Tronstad et al.[104] 2000**
Taux de succès endodontique **total**	**61%**	**67%**
Taux de succès en cas de **bonne étanchéité coronaire** et de **traitement canalaire satisfaisant** radiologiquement	**91%**	**81%**
Taux de succès en cas de **mauvaise étanchéité coronaire** et de **traitement canalaire satisfaisant** radiologiquement	**44%**	**71%**
Taux de succès en cas de **bonne étanchéité coronaire** et de **traitement canalaire non satisfaisant** radiologiquement	**68%**	**56%**
Taux de succès en cas de **mauvaise étanchéité coronaire** et de **traitement canalaire non satisfaisant** radiologiquement	**18%**	**57%**

5.2 Chirurgie endodontique

Les taux de succès après résection apicale avec ou sans obturation a retro varient de 58% à 96% selon les études [72, 38, 23, 30, 76].

Sept études récentes illustrent un large écart des taux de succès (tableau 3).

Tableau 3. Taux de succès en chirurgie endodontique.

auteurs année	recul	critères	nombre total	nombre de dents antérieures	nombre de prémolaires	nombre de molaires	matériau / technique	Taux de succès
Frank et al. 1992 [30]	10 ans	Cliniques et radiologiques	104	?	?	?	amalgame / rotative	**57,7%**
Camus 1998[13]	> 5 ans	cliniques et radiologiques	2027	1149	521	357	amalgame non γ 2 sans zinc ou IRM / rotative ou Ultrasons	**93%**
Testori et al. 1999 [93]	4,6 ans	cliniques et radiologiques	181	?	?	?	amalgame / rotative ou sEBA / ultrasons	**68%** **85%**
Rubinstein 1999 [75]	1 an et 2 mois	cliniques et radiologiques (Rud et al 1972)	94	?	?	?	sEBA / Ultrasons	**96,8%**
Von Arx 2001 [112]	1 an	cliniques et radiologiques	25	0	0	25	sEBA / ultrasons	**88%**
Rubinstein 2002 [76]	> 6 ans	cliniques et radiologiques (Rud et al 1972)	59	?	?	?	sEBA / Ultrasons	**91,5%**
Maddalone et Gagliani 2003 [56]	3 ans	cliniques et radiologiques Molven et al. (1987-1996)	120	62	30	28	sEBA / Ultrasons	**92,5%**

Les écarts importants sont dus à la variabilité des paramètres inhérents aux diverses études : sélection des cas, habileté et expérience de l'opérateur, technique chirurgicale, critères d'évaluation du succès, absence de randomisation, études prospectives ou rétrospectives, durée de l'étude.

Le succès d'une chirurgie endodontique doit être évalué à long terme.

Le simple fait d'éliminer les tissus de granulation provoque la plupart du temps une amélioration immédiate puisqu'une grosse partie du foyer infectieux est énucléé mais elle ne reflète pas l'efficacité de la préparation et de l'obturation de l'extrémité radiculaire. Les études à court terme ont donc peu de signification.

Par exemple Camus[13] rapporte des cas de succès à 2-3 ans qui évoluent vers l'échec à 10 ans par résorption du matériau d'obturation.

De nombreuses études rétrospectives tentent de comparer des taux de succès cliniques selon les matériaux utilisés. Généralement, elles s'appuient sur des reculs aléatoires. Dans l'étude de Dorn et al. [23] en 1990, un succès à 6 mois a la même valeur qu'un succès à 10 ans. Nous savons que l'échec peut se manifester à moyen terme alors que le succès peut avoir été prononcé à court terme. Or aucune donnée n'est apportée concernant le recul correspondant à chaque matériau. Nous pouvons en conclure que des matériaux récents comme l'IRM ou le sEBA ont été mis en place beaucoup plus tard que l'amalgame et qu'ils ont été réévalués à court terme contrairement à l'amalgame dont le risque d'échec est de fait majoré.
De nombreux résultats d'études accablent l'amalgame mais oublient de considérer le recul. De tels résultats sont inexploitables.
De plus, la plupart des études sont pratiquées sur dents antérieures exclusivement. Certaines incorporent des prémolaires et rares sont celles qui incluent des molaires, plus difficiles à traiter avec un risque d'échec plus important.
Certaines études présentent un autre biais très important puisqu'elles font intervenir plusieurs chirurgiens.
Enfin, très souvent, les auteurs additionnent les cas de guérison avec ceux qui montrent une tendance à la guérison. Ce procédé fait grimper les taux de succès parfois jusqu'à 20%

5.2.1 Etudes prospectives de Rubinstein et al. en 1999 [75] et 2002 [76]

Rubinstein et al. ont utilisé des critères cliniques et radiologiques évalués par plusieurs opérateurs dont une majorité extérieure à l'étude.
Le succès radiologique s'est appuyé sur des clichés radiographiques pris selon la même incidence au moyen d'angulateurs et évalués par l'endodontiste ayant réalisé la chirurgie et 2 autres endodontistes extérieurs à l'étude. Pour l'étude à court terme, chaque patient a été radiographié par un cliché préopératoire, un cliché post opératoire et des clichés réalisés à 3 mois d'intervalle. Un seul cliché de réévaluation a été pris à long terme.

Les critères de succès radiologiques étaient ceux énoncés par Rud et al. en 1972 [77]: le succès est déclaré en cas de reconstitution totale de la *lamina dura* avec disparition de la radioclarté apicale ou en cas de cicatrisation fibreuse. Cette dernière se manifeste par une radioclarté persistante qui se détache de l'apex radiologique associée à une reconstitution de la *lamina dura*. La lésion est remplacée par un tissu fibreux qui ne se minéralise pas. Elle se produit

lorsque la lésion initiale est volumineuse et intéresse les 2 corticales opposées, avec lésion périostée associée. L'appréciation de ce type de cicatrisation est plus difficile, fait appel à la superposition des différents clichés radio et doit être corrélée aux signes cliniques d'une guérison.

Deux observateurs ont évalué le succès clinique et l'on déclaré en cas d'absence de symptomatologie sur la dent traitée.

Le succès était déclaré si, au terme de l'étude, en cas de succès clinique, l'examen radiographique montrait une reconstitution totale de la lamina dura avec éventuellement à distance une image de cicatrisation fibreuse.

- Dans leur étude à court terme de 1an et 2 mois[75], ils ont obtenu des taux de succès de **96,8%** sur 94 racines (1/3 sur des incisives, 1/3 sur des prémolaires, 1/3 sur des molaires) et obtiennent une durée moyenne de cicatrisation de 7,2 mois. Ils ont noté une corrélation entre la durée de cicatrisation et la taille de la lésion initiale. Plus la lésion est volumineuse, plus la cicatrisation est retardée.
- Dans leur étude à long terme [76], ils ont réévalué les cas anciennement déclarés comme des succès. Ces patients ont été convoqués 6 à 8 ans après la chirurgie. Seules 59 racines ont pu être réexaminées et sur ces racines, 54 (**91.5%**) ont été classées parmis les succès chirurgicaux. Parmis les patients qui ne se sont pas déplacés mais qui ont pu être contactés, 10 ont subit l'extraction de la dent préalablement traitée chirurgicalement sans pour autant que la cause ait forcément été endodontique.

Cette étude donne des taux de succès relativement élevée à court terme. Elle s'appuie sur un protocole d'évaluation rigoureux et présente l'intérêt d'être prospective. Toutefois elle démontre la difficulté d'assurer un suivi à long terme et présente des lacunes quant au protocole de suivi. Les résultats encourageant à long terme doivent être nuancés et sont finalement peu significatifs.

6. Protocoles chirurgicaux et origines techniques d'un manque d'étanchéité apical.

Le protocole traditionnel initial était la résection apicale seule sans traitement particulier de l'extrémité radiculaire. La résection des 3-4 derniers millimètres apicaux était communément admis et ce principe n'est pas remis en question.

Le taux d'échecs important de cette technique[72, 38] a conduit les cliniciens à réviser leur approche chirurgicale au profit de la logique endodontique. Ils ont peu à peu admis la nécessité de traitements radiculaires a retro comprenant le nettoyage et la mise en forme du réseau canalaire terminal avec mise en place d'une obturation hermétique.

Dans les années 1980-90, la préparation terminale radiculaire était effectuée par technique rotative et l'obturation réalisée à l'amalgame à l'aide d'instruments miniaturisés comme les micro-contre-angles et les micro-miroirs. Cette révolution a permis d'augmenter les taux de succès [23, 30], mais la technique présente des limites puisque l'instrumentation demeure volumineuse, impose des délabrements important et ne permet pas une bonne visibilité.

Le développement d'inserts à ultrasons voués à la chirurgie endodontique a bouleversé la discipline qui passe désormais à l'ère microchirurgicale avec en plus l'émergence de nouveaux matériaux d'obturation.

Nous nous attellerons uniquement à développer les paramètres chirurgicaux qui peuvent influencer l'étanchéité apicale post chirurgicale.

6.1 L'ostéotomie

Elle est moins délabrante que par le passé puisque les instruments sont plus petits. La technique rotative nécessitait des ostéotomies de l'ordre du centimètre de diamètre alors qu'à présent 3 à 4 mm suffisent et permettent une cicatrisation accélérée avec des suites opératoires moins douloureuses.

La taille de l'orifice implique des exigences supplémentaires concernant la manipulation des matériaux d'obturation qui sont mis en place en vision indirecte sous microscope avec des instruments miniaturisés.

6.2 La résection apicale

Après élimination des tissus de granulation et visualisation de l'extrémité radiculaire, les 3 derniers millimètres apicaux sont réséqués perpendiculairement à l'axe radiculaire.

Résection à 3mm de l'apex:

La résection des 3 à 4 mm apicaux semble admise par tous. Les études de Gutierrez[39] en 1995 confirment que la plupart des foramina se situent généralement à moins de 3 mm de l'apex. Dans 98% des cas, les ramifications apicales se situent dans les 3 derniers millimètres apicaux. Dans 7 % des cas, il observe la présence d'orifices de canaux secondaires en amont de ces 3 mm.

Les anciennes gravures de Hess en 1917 fig.2 montrent bien cette complexité de l'anatomie canalaire en particulier dans les zones apicales.

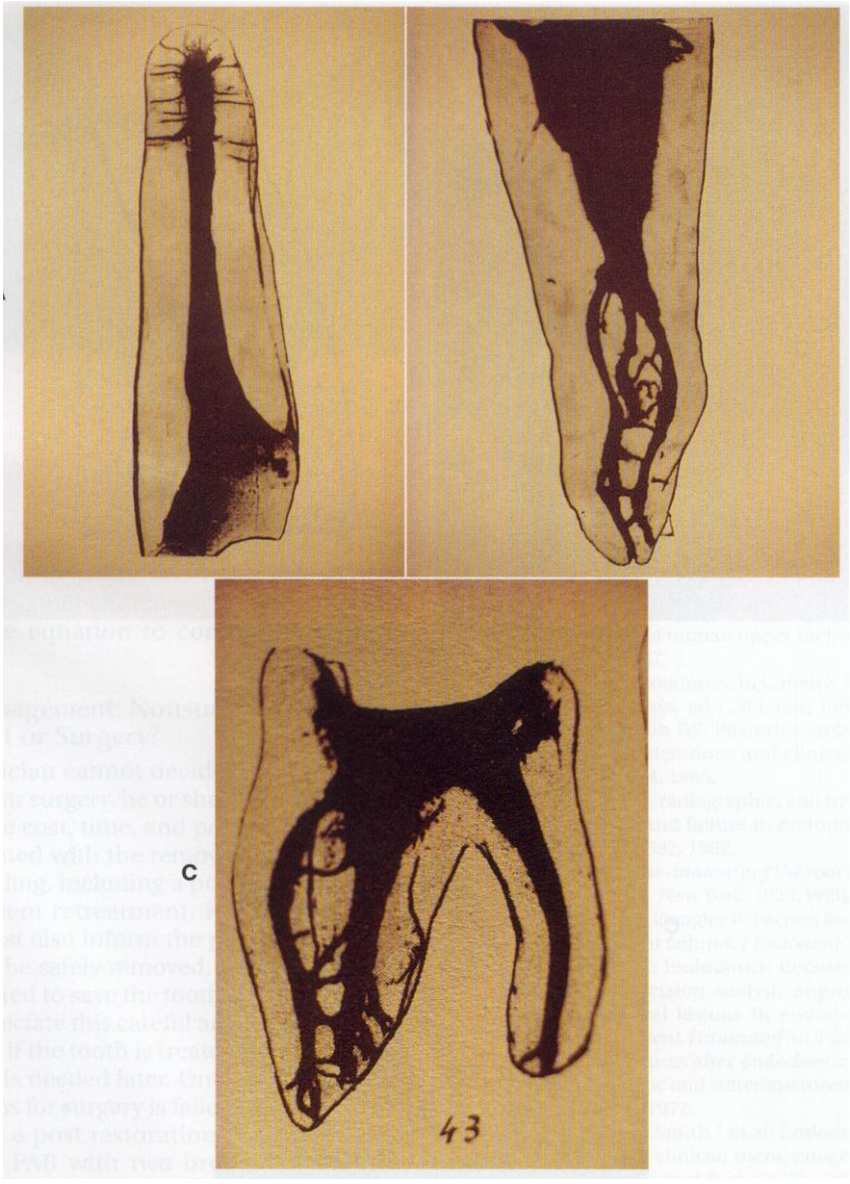

Fig.2 : Dessins anatomiques à l'encre de Chine de W. Hess en 1917 mettant en évidence les canaux principaux, accessoires, secondaires et les delta apicaux

Section perpendiculaire

Avec la technique rotative, une inclinaison importante d'environ 45° était nécessaire en raison du volume et des caractéristiques instrumentales qui gênaient la visualisation.

La section perpendiculaire présente de nombreux avantages :

- Elle permet de diminuer la surface tubulaire exposée (Fig. 3) atténuant ainsi le risque d'infiltration bactérienne depuis le système canalaire vers le périapex[94].

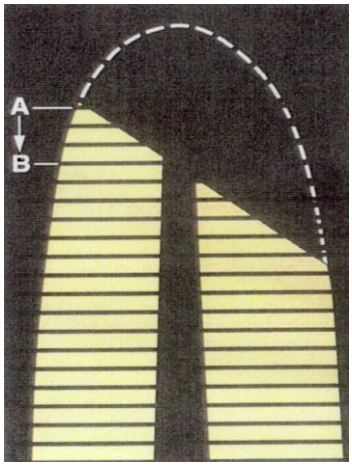

Fig.3 [7] effet de l'inclinaison du biseau sur l'exposition tubulaire

L'étude de Gilheany[33] et al. corroborée par celle de Wu[118] prouve par une technique de filtration de fluide que l'étanchéité apicale d'une surface radiculaire réséquée diminue avec l'augmentation de l'angulation du biseau apical. Trois angulations étaient testées, 0 , 30°, 45 ° et le matériau d'obturation était le CVI. Elle montre également l'importance du volume du matériau d'obturation puisque Gilheany obtient une étanchéité supérieure lorsque la cavité obturée est fine.

- De plus ce type de résection améliore la préparation radiculaire terminale. L'entrée canalaire est mieux confinée au centre du plan de coupe (fig.4) et permet de réaliser une retropréparation respectant mieux l'axe canalaire avec moins de risque de perforation.
- L'absence d'inclinaison permet d'obtenir des murs réciproques qui assurent une préparation plus profonde[63] homogène et facilitent l'obturation.
- La surface exposée du matériau d'obturation est inférieure à celle qu'implique un biseau. L'interface dent matériau est donc réduite au maximum (Fig.4).

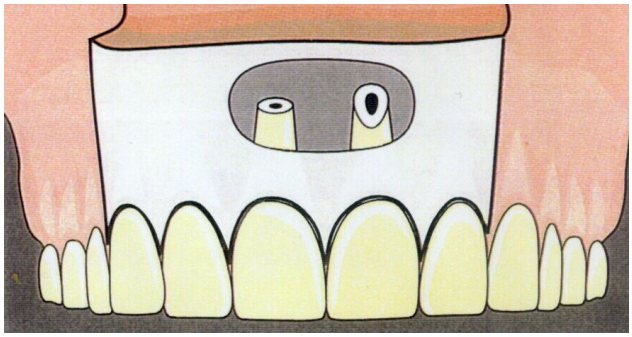

Fig. 4[(7)] vue schématique des surfaces sectionnées selon 2 angulations de résections.

6.3 Augmentation de l'acuité visuelle.

6.3.1 Le microscope

Le souci d'améliorer l'acuité visuelle en odontologie est actuellement prédominant car de nombreuses erreurs viennent d'un manque de visibilité ou d'acuité. L'emploi du microscope, ancien en médecine commence à se développer en odontologie notamment en endodontie. Il permet de détecter des entrées canalaires, des fissures, des instruments fracturés.

En chirurgie endodontique, il est essentiel pour pouvoir utiliser l'arsenal instrumental microchirurgical, contrôler visuellement des gestes de précision et analyser en détail des surfaces radiculaires sectionnées. Les microscopes utilisés (Fig.5) présentent généralement des niveaux de grossissement allant de X3 à X30. Ils comprennent une source lumineuse conduite par fibre optique, un binoculaire inclinable et sont souvent couplés à un système d'enregistrement des images.

Fig. 5 Microscope chirurgical[(50)]

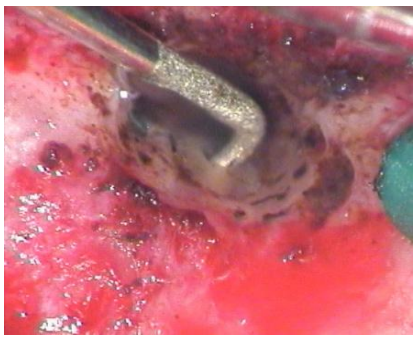

Fig. 6 Préparation ultrasonore sous microscope à moyen grossissement (Photo Dr W. Pertot)

Le positionnement de l'insert par rapport à la racine s'effectue à faible grossissement (X3 - X8), la retropréparation à moyen grossissement (X10 - X 16) et l'inspection méticuleuse de la surface radiculaire afin de rechercher des orifices canalaires, des isthmes, des fissures, à fort grossissement (X16 ; X30).

6.3.2 Le bleu de méthylène

Après résection apicale, de nombreux chirurgiens inspectent rigoureusement la surface radiculaire après l'avoir enduite de bleu de méthylène [75]. Celui-ci colore les tissus organiques mettant ainsi en évidence le système canalaire et le desmodonte qui délimite la racine (Fig.6). A fort grossissement, ce procédé améliore l'inspection de la racine et diminue le risque de préparation incomplète.

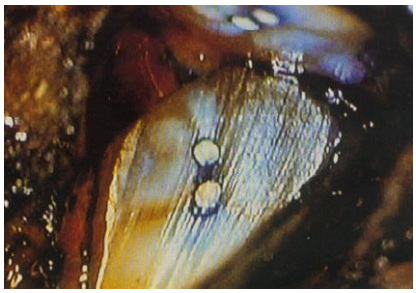

Fig.7 [50]

Surface radiculaire sectionnée enduite de bleu de méthylène qui montre des hiatus et un isthme autour des 2 obturations à la gutta percha.

6.3.3 Conditions d'obturation.

Parmi les causes d'échec lors de l'emploi des biomatériaux dentaires, les 2 principales sont les propriétés physico-chimiques du matériau et le respect par l'opérateur d'un protocole de manipulation et de mise en place rigoureux. Ce dernier point comprend en particulier le nettoyage et le séchage de la cavité.

L'utilisation de vasoconstricteurs réduit considérablement l'ampleur hémorragique.

La crypte osseuse ne permet pas d'obtenir un milieu sec. Dans tous les cas l'obturation se fait en milieu humide à 100% d'humidité.

La pollution sanguine pose un problème de visibilité et d'emploi de certains matériaux. Elle doit être contrôlée grâce à des boulettes de coton imbibées de liquide hémostatique comme le sulfate de fer ou à des cires hémostatiques qui sont plaquées au fond de la crypte (Fig.7).

Des cônes de papier permettent d'assécher la retrocavité mais le nettoyage est incomplet et l'usage difficile. Il existe des systèmes plus commodes d'injection de sérum physiologique et d'air qui nettoient et assèchent la cavité comme le système Stropko (Fig. 7) présenté dans l'atlas de Rubinstein et al. [50]. Afin d'éviter les risques d'emboles par la crypte osseuse la pression du jet doit être faible c'est à dire inférieure à $6{,}9.10^{-2}$ MPa, pression vasculaire périapicale correspondant à la pression pulpaire estimée par Trowbridge [107].

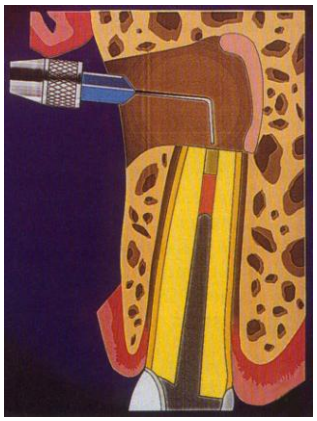

Fig.8
Utilisation du système Stropko, un matériau hémostatique est plaqué au fond de la crypte osseuse.

6.4 Techniques de préparation canalaire

6.3.1 Technique rotative traditionnelle :

Elle présente des limites :

- Impossibilité de préparer une cavité de classe I selon le grand axe radiculaire. (Fig8)

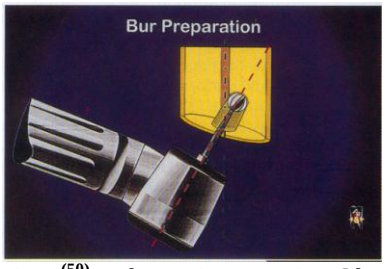

Fig. 9(50) préparation rotative désaxée

- production de boue dentinaire mais les ultrasons en produisent également.
- limitation du champ d'investigation du fait des contraintes anatomiques et de la taille de l'instrumentation.
- ostéotomie volumineuse : 10 mm de diamètre environ.
- résection apicale selon un biseau à environ 45°pour permettre une retropréparation respectant mieux l'axe canalaire.
- risque de perforation (Fig9).

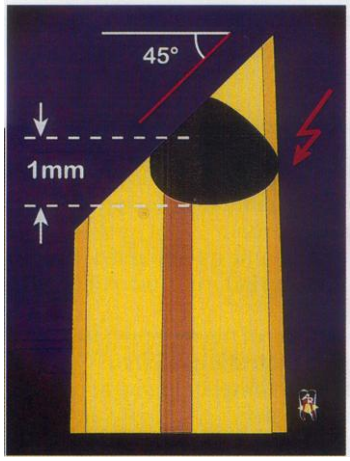

Fig. 10[50] défauts de préparation par technique rotative

Les problèmes d'axe issus des systèmes rotatifs demandent beaucoup d'habileté de la part du praticien qui en règle générale ne peut préparer l'intégralité du système canalaire terminal. L'obturation est de fait peu hermétique [(fig. 10)].

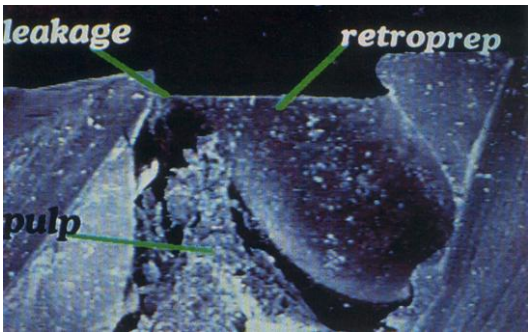

Fig. 11 [50]
Photographie au microscope électronique à balayage d'une obturation après préparation rotative.

6.3.2 Technique ultrasonore.

Elle a pour objectif d'utiliser l'énergie piézo-électrique afin d'obtenir une capacité de coupe au niveau de l'extrémité travaillante de l'insert.

Le premier insert chirurgical date du début des année 90 et fut créé par le docteur Carr (San Diego, Californie).

Les générateurs ultrasonores sont utilisés de 30 à 40 kHz. La coupe s'effectue sous irrigation abondante afin de ne pas provoquer d'échauffement des tissus dentaires qui seraient fragilisés.

La taille des inserts ainsi que leurs différentes morphologies ont modifié les principes techniques de la chirurgie endodontique rotative classique (Fig.11)

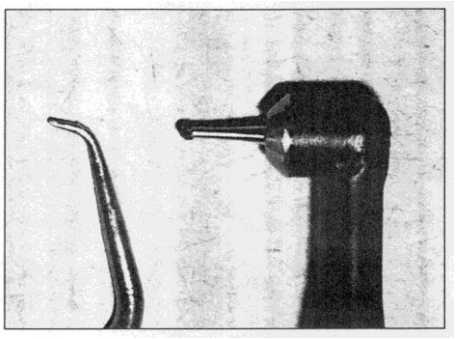

Fig. 12 comparaison d'une tête de microcontre angle avec sa microfraise (12mm) et de la partie travaillante d'un insert (3mm)

Un insert se présente en 3 parties : une partie mâle qui permet de l'insérer dans le manche ultrasonore, un bras médian pouvant présenter différentes angulations et une partie terminale travaillante dont les mensurations sont classiquement 3mm de long pour 1 mm de diamètre. La partie travaillante présente de nombreuses morphologies pour une meilleure adaptation clinique (Fig. 12)

Les retropréparations sont ainsi standardisées et répondent aux critères de rétention du matériau discutés dans la littérature.

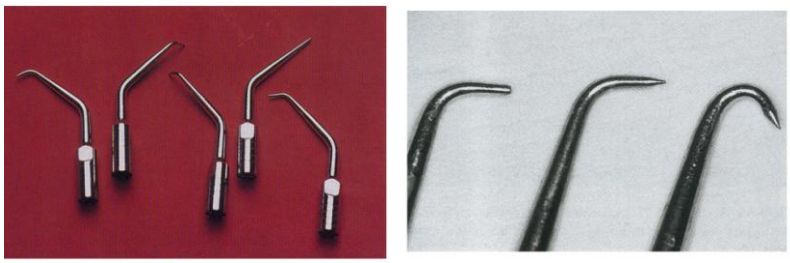

Fig 13 [50] Inserts US « Carr tips »

Photo de gauche : de gauche à droite CT1, CT2, CT3, CT3, CT4, CT4, CT5

Photo de droite : CT1, CT5, CK

Avantages par rapport à la technique rotative :

- cavité plus profonde qui respecte l'axe canalaire (Wuchenich et al. 1994[122], Mehlhaff et al. 1997 [61])
- préparation plus profonde à murs parallèles permettant une meilleure rétention du matériau (O'Connor 1999 [63])

- élimination de la boue dentinaire par débridement ultrasonore (Wuchenich et al. 1994[122], Gorman 1995[36])
- bonne visibilité
- permet une ostéotomie réduite : 3 à 4 mm de diamètre
- permet une résection perpendiculaire à l'axe radiculaire [122]
- préparation des isthmes

Les isthmes canalaires sont des structures anatomiques qu'il est désormais possible de préparer et d'obturer grâce à la microinstrumentation, à l'acuité visuelle accrue et aux inserts ultrasonores.

Ces structures font communiquer entre eux plusieurs canaux et renferment des résidus tissulaires qui ne peuvent généralement pas être éliminés par technique endodontique orthograde (Fig13.). Or de nombreuses études anatomiques du tiers apical révèlent une fréquence importante d'isthmes visibles sur surfaces radiculaires réséquées à 3 mm de l'apex lorsque ces racines présentent plusieurs canaux comme les racines mésiovestibulaires de premières molaires maxillaires, les racines mésiales de premières molaires mandibulaires ou celles des premières prémolaires maxillaires.

Ainsi les études de Weller et al.[115] sur les premières molaires maxillaires rapportent des isthmes présents dans 90% des racines mésiovestibulaires sectionnées à 3 mm de l'apex quand celles-ci possèdent au moins 2 canaux, et 100% lorsqu'elles sont sectionnées à 4 mm. Il rapporte également que ces racines présentent dans 50% des cas plusieurs canaux.

Les études de Prakashchandra[71] montrent que les racines mésiales des molaires mandibulaires sont celles qui présentent le plus souvent des isthmes. Celles de Vertucci [109] rapportent des isthmes dans 70 à 80% des racines mésiales de premières molaires mandibulaires.

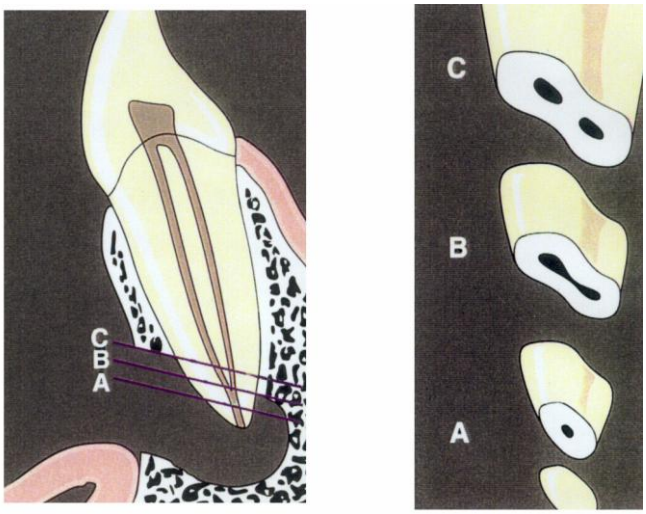

Fig 14. Anatomie canalaire schématique en fonction du niveau de coupe. [7]

L'observation méticuleuse au microscope à fort grossissement, l'usage de bleu de méthylène pour identifier les tissus organiques canalaires et la morphologie adaptée des inserts (Fig.14) rendent maintenant possibles l'élimination de la totalité des tissus nécrosés à l'origine de l'échec endodontique et le comblement de la totalité des voies de communication entre le réseau canalaire et le périapex.

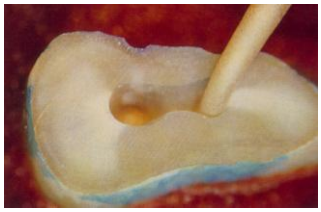

Fig.15 Isthme préparé par technique ultrasonore.[50]

Inconvénients :

En 1994, Saunders et al. [81] dénoncent le risque de provoquer des microfissures le long des retrocavités, impliquant un risque d'infiltration bactérienne.

3 études au microscope [31, 54, 114] mettent en évidence l'importance de la forme de l'insert, de l'intensité du générateur US et de la pression du praticien dans l'efficacité de coupe lors d'une retropréparation. Ils ne notent pas de fissuration significative par rapport à la technique

rotative (vitesse lente) lors d'une utilisation standard du protocole ultrasonore chirurgical c'est à dire à puissance ultrasonore moyenne.
Ces 3 études utilisent un procédé de réplication au silicone de la surface radiculaire préparée afin d'éviter les artéfacts dénoncés par Torabinejad en 1995 [100] qui ont certainement faussé les résultats de Saunders.
A puissance US maximum, elles révèlent néanmoins un taux de fissures significativement supérieur.

L'état de surface obtenu dans la retrocavité a également été étudié car il conditionne le profile de l'interface dent/matériau, une surface lisse impliquant moins de défauts d'étanchéité. Pour étudier ce paramètre, les auteurs observent au microscope la netteté des bords des préparations.
Lloyd et al. [54] ont étudié au microscope électronique à balayage la netteté des bords obtenue après préparation sonore (1500Hz) ou rotative. Ils ont évalué le système MM1500 Sonic Air avec un insert sonore Micromiga (Besançon, France) utilisé à puissance maximum et ont obtenu une netteté significativement inférieure par rapport à une préparation à la fraise. Par ailleurs, ils n'ont pas observé de différence concernant l'apparition de microfractures.
Ils ont conclu que l'état de surface dépend de la puissance des vibrations et de la forme de l'insert qui doit être étudié pour favoriser l'efficacité de coupe recherchée. Cette dernière permet d'utiliser des puissances inférieures, de réduire la durée de préparation et d'atténuer la pression exercée par l'opérateur.
Des recherches ont été effectuées dans ce sens et des inserts de plus en plus performants sont actuellement sur le marché.

CHAPITRE II

Les matériaux d'obturation a retro

Récemment, plusieurs nouveaux matériaux d'obturation a retro sont apparus en remplacement de l'amalgame, matériau de prédilection jusqu'alors.

La littérature contient énormément d'informations, parfois contradictoires, sous forme d'études cliniques, d'études in vitro , d'expérimentations animales, et de rapports de cas qui proclament la supériorité de tel ou tel matériau. Seules les études *in vivo* correctement menées présentent un niveau de preuve suffisant. Elles s'inscrivent dans la philosophie de l'evidence based dentistry.

L'objectif principal d'un matériau d'obturation apicale en chirurgie endodontique est d'effectuer un scellement étanche de la section apicale préalablement aménagée. Il doit assurer une barrière durable et une bonne intégration tissulaire empêchant la diffusion de bactéries ou d'endotoxines de l'endodonte vers le parodonte.

Garthner et Dorn en 1992[32] ont proposé les propriétés idéales que devait avoir un tel matériau d'obturation.

- simple à manipuler
- radioopaque
- stable dimensionnellement dans le temps et en milieu humide
- non résorbable
- adhésif à la dentine
- biocompatible vis à vis des cellules desmodontales directement en contact.

De ces propriétés se détachent 3 grands thèmes fondamentaux : cytotoxicité, étanchéité à long terme, manipulation.
Ce dernier point est actuellement d'autant plus important que les notions modernes de chirurgie endodontique impliquent une mise en place difficile du matériau : osteotomie de 3, 4 mm, résection apicale perpendiculaire à la racine, séquence microchirurgicale de traitement a retro en vision indirecte. De plus nous savons que malgré un parfait contrôle hémostatique, l'obturation s'effectue en atmosphère humide.

La majeure partie des matériaux utilisés en odontologie conservatrice ont été envisagés comme matériau d'obturation a retro. La liste est longue et non exhaustive : amalgame, Cavit®, résines composites, ciments verres ionomères renforcés ou non à la résine, polycarboxylates, vis en titane, feuilles d'or, ciments orthopédiques, ciments polyvinyl, différents eugénates.
Parmi tous ces matériaux, nombreux sont ceux qui présentent une ou plusieurs caractéristiques incompatibles avec celles que requièrent un biomatériau d'obturation a retro. Ceux assurant une bonne étanchéité sont mal tolérés par le parodonte. Inversement, les mieux tolérés par l'environnement cellulaire posent des problèmes d'étanchéité.
Du fait du niveau expérimental de recherche sur les nouveaux matériaux, rares sont les études cliniques prospectives répondant aux critères de l'evidence based dentistry. Les seuls critères permettant d'orienter vers tel ou tel matériau sont les tests in vitro (tests d'étanchéité, de cytotoxicité, inspections au microscope), les expérimentations animales et les études cliniques rétrospectives.
Or nous observons un manque de corrélation évident que ce soit entre les différentes études cliniques, entre les études in vitro et in vivo, ou entre études in vitro parfois même avec des protocoles similaires.

Les matériaux réellement retenus dans la littérature sont l'amalgame, les résines composites, l'IRM, le sEBA, le MTA mais aucun n'est considéré comme le matériau idéal (tableau 4 page 48).

1. Résection apicale sans obturation

Elle a été envisagée par certains auteurs [72, 38, 47, 11]. qui pratiquaient un brunissage à chaud de la gutta percha exposée après résection.
D'autres ont montré que l'efficacité du scellement est accrue par une obturation a retro[14, 109].
Les 2 approches ne sont pas incompatibles car dans certains cas, l'obturation ne paraît théoriquement pas indispensable: si la résection apicale élimine totalement la source d'irritants qui diffusaient vers le périapex et si la reconstitution coronaire est suffisamment étanche pour empêcher toute dissémination bactérienne à l'intérieur du réseau canalaire puis vers le périapex.
Dans la mesure où il est impossible de garantir l'élimination totale de la source infectieuse, il convient de placer une obturation a retro hermétique.

2. L'amalgame :

Bien que de nombreux matériaux aient été proposés, l'amalgame est le premier à avoir été suggéré et est longtemps resté le standard en la matière.
Il présente des avantages:

- disponible au cabinet
- peu coûteux
- bon recul clinique avec des taux de succès raisonnables
- bactériostatique
- bonne stabilité de l'état de surface du joint amalgame /dent

Depuis le développement des dernières techniques chirurgicales et le développement de nouveaux matériaux, de nombreux défauts sont mis en avant:

- étanchéité immédiate insuffisante

L'amalgame seul ne peut pas empêcher la diffusion de colorants à l'interface. La précipitation d'ions métalliques lui procure néanmoins des propriétés bactéricides et bactériostatiques. Pour lui conférer une meilleur étanchéité des tests ont été réalisés en le recouvrant de vernis après

obturation. Certains auteurs ont pu observer un gain d'étanchéité[85, 108], d'autres ne trouvent pas de différence significative[51, 65].

- tatouages
- cytotoxicité[125, 125]
- risque de contamination au mercure

Le développement des particules sphériques a néanmoins permis de diminuer la proportion de mercure.

- expansion de prise selon le type d'amalgame.
- sensibilité à l'humidité lors de sa manipulation[32]

L'amalgame peut être contaminé par les mains du manipulateur pendant la trituration ou parce que la cavité est mal séchée. L'amalgame contenant du zinc est connu pour être plus sensible à l'humidité durant sa condensation. Il montre une expansion de prise supérieure lorsqu'il est pollué ainsi qu'une plus grande corrodabilité. L'état de surface est rapidement altéré et peut être à l'origine d'une certaine cytotoxicité.

- Corrosion

Actuellement, l'amalgame utilisé est un amalgame non gamma 2, riche en cuivre et dépourvu de zinc pour limiter la corrosion et l'hydrolyse. Les alliages HCSC diminuent le risque de corrosion.

Il ne doit pas être utilisé en cas de tenon radiculaire en métal pour éviter tout phénomène de bimétallisme et donc de corrosion.

Malgré ses lacunes, l'amalgame est considéré comme biocompatible pour obturer une cavité a retro. Les inconvénients paraissent dérisoires si la cavité est suffisamment volumineuse pour pouvoir le fouler, avec une rétentivité adéquate.

Aucun effet toxique de l'amalgame n'a été rapporté.

Les nouveaux principes de chirurgie endodontique ont par contre tendance à contre indiquer l'utilisation de l'amalgame en raison de son protocole de mise en place. La crypte osseuse de 4 mm de diamètre et la résection perpendiculaire rendent difficile sa manipulation et sa condensation.

En Californie, Frank et al. [30] ont présenté en 1992 une réévaluation de dents obturées *a retro* à l'amalgame avant 1981 et considérées comme des succès. Ils ont obtenu un taux de succès endodontique à 10 ans très faible de 57.7%.

Les premiers matériaux sérieusement envisagés pour remplacer l'amalgame sont les eugénates modifiés qui semblent procurer une meilleure étanchéité.

3. Les eugénates ZOE, IRM, Super EBA

Dans les années 60, le **ZOE** est proposé pour remplacer amalgame. Cet eugenolate de zinc est le résultat d'une réaction acide-base entre l'eugénol et l'oxyde de Zinc mais il a une longue durée de prise et une faible résistance à la compression. Il présente une certaine solubilité et des études ont montré une perte d'étanchéité à long terme[66]. Il s'hydrolyse en Zn + eugénol. Or l'eugénol est cytotoxique puisque inhibiteur de la synthèse des prostaglandines via une inhibition de la cyclo-oxygénase[80] .

Pour augmenter les propriétés mécaniques des eugénates, Ciojan et al. en 1972 [18] ont expérimenté un mélange de 80% d'oxyde de Zinc Eugénol avec 20% de résine polyméthacrylique. Ils ont obtenu des propriétés mécaniques supérieures. La résistance à la compression passe ainsi de 14 MPa à 57 MPa.
Plus tard, le matériau a été commercialisé sous le nom d'**IRM** par la société Caulk, Milford, DE, USA.
La préparation se fait par un mélange liquide poudre.
La poudre contient 80% d'oxyde de zinc et 20 % de polyméthacrylate.
Le liquide est composée de 99% d'eugénol pour 1% d'acide acétique.
Malgré une diminution de la solubilité, l'IRM a tendance à se dissoudre dans les fluides périapicaux avec parfois des cas de dissolution totale[66].

Le **super EBA** est un eugénate modifié par l'acide orthoéthoxybenzoïque.
Une partie de l'eugénol est substituée et remplacée par de l'acide orthoéthoxybenzoïque.
Des grains de quartz ou de l'oxyde d'aluminium sont ajoutés pour renforcer le matériau.
La poudre contient 60% d'oxyde de zinc, 34% d'aluminium et 6% de résine naturelle, le liquide 37,5% d'eugénol pour 62,5% d'acide orthoéthoxybenzoïque.
Il présente un temps de prise réduit, des propriétés mécaniques accrues et une moindre sensibilité à la dissolution qui le placent au-dessus de l'IRM comme matériau d'obturation *a retro*. La prise est modifiée par la température et l'humidité.

Son pH est neutre.

Sa radio opacité est voisine de celle de la gutta, ce qui est insuffisant si l'on veut pouvoir discerner une obturation *a retro* lors d'un cliché radiographique.

IRM et sEBA induisent une légère réaction inflammatoire durant la prise en raison d'une libération d'eugénol [l19]. Cette inflammation diminue significativement une fois la prise terminée et est alors dérisoire[68,125].

Ils se comportent bien dans les tests d'étanchéité [1, 96, 102,37, 60] , les études animales[41] et les études rétrospectives sur l'homme[75, 76].

Leur manipulation est relativement aisée mais elle l'est moins pour le sEBA du fait d'une difficulté de spatulation (le matériau adhère à toutes les surfaces) et d'un temps de prise réduit. Néanmoins sa consistance est adaptée aux impératifs de mise en place sous microscope en vision indirecte dans une cavité réduite.

4. Les ciments verres ionomères

Ils ont été envisagés parce qu'ils présentent des propriétés intéressantes : adhésion aux parois dentinaires, relargage de fluor, propriétés bactéricides et bactériostatiques [10,28].

Seuls les CVI modifiés par adjonction de résine sont retenus car ils possèdent des propriétés mécaniques compatibles avec celles que requièrent un biomatériau d'obturation a retro.

Malgré tout, ces matériaux sont trop sensibles à l'humidité. Leurs propriétés mécaniques sont altérées en milieu humide et les valeurs d'adhérence chutent.

La manipulation de ces matériaux en condition chirurgicale est très difficile et contribue à les contre indiquer pour obturer *a retro*.

5. Les résines composites

5.1 Structure histologique de la dentine radiculaire de la dent dépulpée.

La microstructure dentinaire conditionne l'efficacité du collage.

Les tubuli dentinaires se projettent de la lumière canalaire vers la jonction cémentodentinaire. Leur diamètre est compris entre 0.5µm et 4µm. Dans le plan axial, les tubules présentent une

courbure de plus en plus marquée en direction apicale. La densité tubulaire diminue en s'éloignant de la lumière canalaire variant de 96000 mm^{-2} à 10000mm^{-2} [26].

La dent pulpée présente des odontoblastes actifs avec leur prolongement odontoblastique et des fluides plasmatiques intratubulaires soumis à la pression pulpaire. La dent dépulpée présente quant à elle une charge organique et hydrique inférieure sans pression pulpaire.

Les paramètres du collage sont ici très particuliers. L'absence de pression pulpaire semble le favoriser.

Ferrari et al. [26] ont étudié la surface tubulaire avant et après mordançage dans 3 régions radiculaires paracanalaires : tiers coronaire, tiers médian et tiers apical. Ils concluent que le diamètre tubulaire diminue significativement dans la zône apicale. Or plus les tubuli dentinaires sont larges, meilleur sera le collage. La qualité du mordançage a été évaluée en calculant l'augmentation de surface tubulaire correspondant à l'ouverture des tubuli. Le tiers apical montre la plus faible augmentation de surface avec 113% contre 202%. pour le tiers coronaire. Enfin, l'épaisseur de la couche hybride obtenue dans le tiers apical est significativement inférieure à celle obtenue dans les 2 autres régions. Ce dernier facteur découle des 2 autres.

De plus, nous savons que le collage sur une dentine déshydratée et hyperminéralisée est difficile il se forme moins de liaisons chimiques aux chaînes collagèniques plus rares.

Faible diamètre tubulaire, faible efficacité du mordançage et faible charge collagénique sont autant de paramètres qui semblent compromettre le collage dans le secteur apical malgré l'absence de pression pulpaire.

Par ailleurs il serait intéressant d'étudier la portée de la pollution des couches paracanalaires par les différents modes d'obturation canalaire susceptibles d'influencer le collage : ciments de scellements canalaires, gutta percha, résines, …

Malgré tout, l'évolution et la diversité des systèmes de collage pourra peut-être mener à des applications en microchirurgie endodontique : Rud et al. [78] ont utilisé un système adhésif d'obturation *a retro* constitué d'un adhésif le Gluma ® et d'un composite le Retroplast ®. Ils ont obtenu de bons résultats cliniques sur des racines de molaires réévaluées de 6 mois à 12,5 ans après chirurgie et publient un taux de succès de 92%.

5.2 Les composites :

Ils nécessitent l'utilisation d'adhésifs dentinaires. Le facteur opérateur influence beaucoup le résultat comme c'est le cas généralement en dentisterie adhésive.
D'énormes progrès ont été réalisés sur les systèmes adhésifs et les résines composites mais ils restent sensibles à l'humidité.
Dans le cas des obturations *a retro*, la cavité doit être parfaitement nettoyée et séchée mais reste humide.
Il existe une grande variabilité de composites de compositions différentes. Certains sont plus sensibles que d'autres. Vignaroli [(111)] a montré que les propriétés adhésives de certains adhésifs n'étaient pas altérées par l'humidité. Asmussen [(8)] a étudié les comportements de différents systèmes adhésifs en milieu humide et conclue que l'adhésion à l'émail n'est pas modifiée, que l'adhésion à la dentine dans certains cas est fortement réduite et que les résultats selon le degré d'humidité ne sont pas influencés par le type de solvant contenu dans le primer.

La tolérance tissulaire vis à vis de ces résines semble satisfaisante et Andreasen[(6)] rapporte une néoformation desmodontale chez l'homme au voisinage du matériau d'obturation. Mais il n'est pas prouvé que cette formation fibreuse influence le pronostic clinique.
Certains auteurs dénoncent une cytotoxicité des composites. Bruce et Mc Donald [(12)] montrent qu'elle peut persister 30 jours ou plus mais qu'elle dépend du type de composite employé. Cette cytotoxicité est imputée à la couche non polymérisée superficielle dont la polymérisation est inhibée par l'oxygène. Cette couche peut facilement être contrôlée par l'utilisation d'un gel isolant.

L'avantage de ces résines est de permettre l'obturation de toutes les anfractuosités. L'adhésif s'infiltre dans les fissures ou microfissures radiculaires. Le système adhésif/composite peut donc potentiellement avoir un rôle de renforcement radiculaire.
De plus, le recouvrement de l'intégralité de la surface réséquée peut permettre d'obturer toute voie de communication canalaire y compris les tubuli dentinaires.

Les gros inconvénients des résines composites en chirurgie endodontique sont donc leur mise en place et leur sensibilité à l'humidité mais les avantages qu'offrent cette technique adhésive sont prometteurs.

5.3 Les copolymères PMMA-4 Meta activés par le tri n butyl borane (Super Bond ®).

Depuis plus de 20 ans, des ciments à base de PMMA (polyméthylméthacrylate) sont utilisés en médecine. Ils permettent notamment de combler des espaces entre os et implant orthopédique.

Ces ciments sont composés d'une poudre de DMPT-PMMA et d'un liquide contenant du MPO-MMA. La polymérisation est initialisée par une réaction entre DMPT (N,N diméthyl-p-toluidine) lié au MMA et le MPO (benzo peroxyde) lié au PMMA.

Les propriétés adhésives et la bonne compatibilité tissulaire en font des ciments prometteurs en chirurgie endodontique.

Le problème est que la réaction de prise des résines PMMA est très exothermique provoquant une coagulation des protéines et pouvant induire des dommages osseux.

Par ailleurs la pâte obtenue est sensible à la contamination sanguine et difficile à manipuler.

Pour améliorer ces ciments, du 4-methacryloxyéthyl triméllilate anhydre (4-meta) et du tri-n-butyl borane (TBB) comme initiateur ont été ajoutés. Ils diminuent significativement l'exothermie de prise qui est désormais compatible avec une bonne intégration tissulaire.

Le 4-META possède à la fois des groupes hydrophiles et hydrophobes. Il est un promoteur de l'infiltration du monomère dans les tissus dentaires. L'adhésion du 4 META à la dent commence après polymérisation du monomère infiltré qui forme d'une couche hybride.

Les valeurs d'adhérence à la céramique, à l'hydroxyapatite et à la fluoroapatite sont supérieures à 15 MPa[(53)].

Les résines PMMA conventionnelles adhérent mal à l'os et on observe une fibrose.

In vitro les résines 4-META présentent une bonne adhésion à la dentine et à l'os

Lee et al.[(53)] ont étudié les propriétés mécaniques et pratiqué une observation histologique des résines 4-META avec ou sans adjonction de particules d'hydroxyapatite sur des chiens

L'adjonction d'hydroxyapatite semble améliorer l'adhésion à l'os.

Leur implantation dans des fémurs de lapin à été étudiée[(79)]. Aucune zone fibreuse n'a été observée mais une zone de transition d'environ 1 µm apparaît. Elle correspond à la couche hybride que l'on retrouve au contact de la dentine.

Les propriétés mécaniques et biologiques de ces colles semblent intéressantes notamment par la possibilité d'obturer l'ensemble des orifices canalaires et des microfissures apicales. Cependant leur manipulation difficile risque d'entraver leur utilisation comme matériau d'obturation *a retro*.

6. Le MTA (Mineral trioxide aggregate)

Ce matériau a été mis au point à l'université de Loma Linda en Californie
Torabinejad et al. ont étudié les propriétés physico-chimiques du MTA[98].
Il se présente sous la forme d'une poudre blanche qui doit être réhydratée. Cette poudre hydrophile est constituée de particules de silicates tricalciques, d'aluminates tricalciques, d'oxydes tricalciques et d'oxydes de silice. Parmi les autres composés, l'oxyde de Bismuth permet de rendre le matériau radio opaque.
Le rapport poudre/liquide nécessaire à l'hydratation doit être de 3/1 (équivalent en masse). Le gel colloïdal obtenu durcit en moins de 3 heures.
L'examen de structure après la prise du matériau révèle 2 phases distinctes : une phase amorphe riche en phosphates de calcium d'aspect granulaire puis une phase composée de cristaux d'oxydes de calcium.
Le pH est de 12.5, 3 heures après le mélange initial et ne semble pas évoluer même après 24h.
La résistance à la rupture en compression se situe au même niveau que celle de l'IRM avec 67 MPa après 21 jours (IRM = 57MPa, amalgame = 311MPa). Les propriétés mécaniques du MTA ne sont maximales qu'après 24 heures, le matériau ayant une prise très lente.

De nombreuses études ont été conduites pour tester l'étanchéité du MTA. Les plus nombreuses et variées sont celles de Torabinejad et al. (Californie) qui font appel de 1994 à 2002 à des observations au microscope électronique des interfaces dent/matériau, des tests de percolation, des tests bactériens et des tests utilisant des toxines bactériennes. L'ensemble des tests effectués par ce laboratoire place le MTA en tête des matériaux d'obturation *a retro* potentiels sur le plan de l'étanchéité.
Il présente une bonne tolérance tissulaire[62, 52], et les études animales[97] sont satisfaisantes avec une étude histologique de Torabinejad [101] qui révèle une formation fibreuse au contact du matériau.
Sa manipulation était initialement relativement compliquée par une texture semi-liquide granulaire mais des modifications ont été apportées pour aboutir à une masse plus compacte. Sa mise en place peut s'effectuer par apports successifs. Mais sa prise très lente empêche toute rétention immédiate et ne permet pas d'étanchéité immédiate.
Par contre le MTA ne semble pas être altéré par une contamination sanguine[96].

7. Paramètres de sélection d'un matériau

Le choix du matériau dépend de la technique chirurgicale (profondeur de la cavité, accessibilité à la surface réséquée) et de la situation clinique. Si l'on imagine un tenon situé à 3 mm de l'apex, la retropréparation sera impossible et il conviendra d'utiliser un matériau adhésif type résine composite ne nécessitant pas de cavité de rétention et qui engloberait le tenon.

Cytotoxicité, étanchéité et manipulation sont les paramètres pour l'heure décisifs dans le choix d'un biomatériau d'obturation *a retro* mais peut-être ne suffisent-ils pas à définir le meilleur matériau. D'autre propriétés comme la bioactivité (propriétés bactériostatiques, bactéricides, ostéoinduction, fibroinduction) peuvent peut-être se révéler plus importants si l'on accepte l'idée que l'étanchéité absolue durable est pour l'heure impossible.
L'étanchéité à long terme comprend : étanchéité immédiate propriétés de prise, sensibilité à l'humidité, et maintien de cette étanchéité : dissolution au contact des fluides périapicaux.

Les avantages et les inconvénients des matériaux abordés dans ce chapitre sont synthétisés Tableau 4

Tableau 4 Avantages inconvénients de différents matériaux d'obturation a retro.

	Inconvénients	*Avantages*
Amalgame	cytotoxicité, risque de contamination au mercure, tatouages étanchéité immédiate insuffisante sensibilité à l'humidité: expansion de prise corrosion	accessibilité, coût bon recul clinique bactériostatique résistance à la compression stabilité du joint amalgame/dent
IRM	faible résistance en compression solubilité cytotoxicité en cas de dissolution temps de prise réduit faible radio opacité	consistance pratique bons résultats aux tests d'étanchéité prise peu sensible à l'humidité
sEBA	faible radio opacité manipulation difficile: spatulation et temps de prise temps de prise sensible à la température et à l'humidité	résistance en compression solubilité réduite consistance pratique bons résultats aux tests d'étanchéité résultats encourageants chez l'animal et chez l'homme
CVI	propriétés mécaniques trop faibles chez les CVI peu résineux sensibilité à l'humidité: altération des propriétés mécaniques et chute des valeurs d'adhérence	adhésion aux tissus dentaires relargage de fluor propriétés bactéricides et bactériostatiques
résines composites	sensibilité à l'humidité mise en place difficile	faible cytotoxicité, potentiel de néoformation desmodontale obturation des microfissures
MTA	temps de prise : manque d'étanchéité immédiate, faibles propriétés mécaniques initiales mise en place compliquée par sa texture	bonne résistance mécanique effet bactériostatique bonne tolérance tissulaire avec formation fibreuse faible sensibilité à l'humidité bon résultats aux tests d'étanchéité résultats encourageants chez l'animal

CHAPITRE III

Les tests d'étanchéité *in vitro*

L'étanchéité procurée par un biomatériau dentaire est un paramètre fondamental dans de nombreuses applications. Si la notion d'étanchéité est facile à comprendre, sa mesure est beaucoup plus délicate. Ainsi l'impressionnante diversité des tests d'étanchéité rencontrés dans la littérature traduit en réalité la difficulté d'interprétation de ces tests et leur manque de corrélation avec la performance clinique . Faut-il utiliser des scores correspondant à un résultat clinique supposé, ou des longueurs de pénétration ? Faut-il réaliser des coupes longitudinales ou transversales ? Quels marqueurs utiliser : des colorants moléculaires, des bactéries, des colorants ioniques? Autant de questions non encore résolues que nous allons aborder au cours de ce chapitre.

1. Etanchéité.

La notion d'étanchéité est fondamentale et étudiée dans de nombreux domaines odontologiques comme la prothèse fixée ou l'odontologie conservatrice. Elle tient une place particulière dans 3 disciplines que sont la dentisterie restauratrice, l'endodontie orthograde et l'endodontie retrograde.

Dans ces 3 domaines, l'étanchéité est un paramètre clé qui est évalué pour valider un matériau ou une technique. Mais chacun d'eux se heurte à des résultats contradictoires et à une variabilité de protocole qui rend délicate toute étude méta-analytique.

Quel est le niveau d'étanchéité requis pour un biomatériau dentaire ? Les auteurs ont des avis divergents sur la question d'où une multitude de protocoles.

1.1 L'étanchéité des restaurations coronaires :

Le manque de consensus concernant la notion d'étanchéité ne touche pas que les matériaux d'obturation *a retro*.

Il s'est d'abord révélé en dentisterie restauratrice adhésive avec l'avènement des adhésifs amélo-dentinaires et les résines composites.

L'étanchéité coronaire est de loin celle qui a suscitée le plus d'investigations. De nombreux paramètres déterminent les résultats d'études comparatives de l'étanchéité marginale des restaurations. Une revue de littérature puliée dans le JAD[73] soulève le problème de comparativité de ces études en faisant le point sur les facteurs pouvant influencer les résultats. Elle tente d'effectuer une méta-analyse d'articles publiés entre 1992 et 1998 mais se heurte à l'énorme variabilité des paramètres.

Hilton[42] relève 7 paramètres :

- le matériel dentaire : type de dent, cause de l'extraction, nombre de dents dans chaque échantillon, protocole de désinfection, température du bain, milieu de conservation
- le type de cavité : forme, nature des tissus qui la composent, dimension, localisation, biseau périphérique.
- le protocole d'obturation : matériau, colle, fond de cavité, photopolymérisation, nombre de couches, degré d'humidité
- les conditions de conservation : milieu d'immersion, thermocyclage, mécanocyclage
- le type de test d'étanchéité

- la méthode d'évaluation : linéaire, volumique, paramétrique
- l'analyse statistique

Le contrôle de ces paramètres est difficile. Afin de standardiser les expérimentations, certains d'entre eux devraient être mieux maîtrisés.. Les aléas qu'ils provoquent touchent tous les tests d'étanchéité que ce soit en dentisterie adhésive, en endodontie ou en chirurgie endodontique. De nombreuses études comparatives s'intéressent à des facteurs comme le type de test, la méthode d'évaluation au sein du même type de test ou l'influence du thermocyclage.
Le paramètre le plus difficile à contrôler semble être le tissu dentaire sur lequel sont réalisées les expérimentations.

1.2 L'étanchéité des obturations endodontiques.

La notion d'étanchéité prend une place prépondérante en endodontie orthograde mais soulève d'autres problèmes notamment sur le niveau d'étanchéité recherché. Toutes les études montrent, quel que soit le type d'obturation canalaire Gutta + ciment de scellement, que celle-ci n'offre quasiment jamais d'étanchéité totale aux bactéries.
Torabinejad et coll.[103] , Madison et Swanson [57, 58, 59] ont étudié des monoradiculées obturées dont l'orifice coronaire était mis en contact avec une flore bactérienne. Les analyses microbiennes ont révélé une contamination en quelques jours de la totalité des obturations de tous les échantillons.
Kersten et Moorer [48] concluent concernant les obturations orthogrades que l'on peut espérer une étanchéité à des particules de l'ordre du micron c'est à dire comparables à des bactéries ou de très grosses protéines, mais qu'il est impossible de stopper des particules plus petites de taille équivalente aux métabolites bactériens.
Or les taux de succès de l'endodontie orthograde se situent entre 70 et 95% selon les études. Ce succès pondère l'importance de l'étanchéité que procure l'obturation endodontique seule par rapport à la désinfection canalaire et à l'étanchéité coronaire.

De nombreux protocoles sont utilisés pour évaluer l'étanchéité de ces traitements : pénétration de colorants ou d'isotopes, tests électrochimiques, filtration de fluides, pénétration de bactéries ou d'endotoxines, mais la variabilité des paramètres et les divergences de protocoles aboutissent à des résultats contradictoires.
Certaines études proposent de comparer les résultats obtenus par différent tests d'étanchéité sur les mêmes types d'obturation.

Pommel, Jacquot et Camps[70] ont comparé 3 techniques d'obturation, Thermafil, condensation verticale et obturation monocône par 3 tests d'étanchéité. Ils ont obtenu des classements différents selon le type de test utilisé. Le système de filtration de fluide a montré une étanchéité supérieure de la condensation verticale sur le Thermafil lui même supérieur à la technique monocône. Le test de percolation a mis en évidence une supériorité du Thermafil sur les 2 autres techniques et le test électrochimique n'a montré aucune différence significative entre les 3 systèmes.

Les auteurs soulignent la nécessité d'études approfondies pour mettre au point des tests concordants et donc exploitables.

De même, l'article de Wu et Wesselink[117] soulève le problème de la validité des interprétations des résultats et de la pertinence des tests. Il recommande le développement et la standardisation des tests en commençant par l'adoption d'une base protocolaire par la communauté scientifique afin d'homogénéiser les résultats et de permettre une approche méta-analytique.

1.3 L'étanchéité des matériaux d'obturation *a retro*

Ces matériaux font appel aux notions dégagées à la fois en dentisterie restauratrice et en endodontie.

Le traitement endodontique classique orthograde a pour but d'éliminer les tissus infectés par un nettoyage mécanochimique. L'approche chirurgicale ne permet pas ce nettoyage global parce que trop difficile à réaliser. Elle se contente d'éliminer les tissus de granulation périapicaux et de préparer la portion apicale afin de mettre en place un matériau d'obturation. Etant donné que cette chirurgie ne permet pas d'éliminer réellement le foyer infectieux, l'obturation *a retro* doit procurer un scellement intime empêchant la diffusion des bactéries ou de leurs produits de dégradation du système canalaire vers le périapex.

De nombreux auteurs ont mis en évidence le rôle des bactéries et de leurs exudats dans la formation d'une lésion périapicale. La mise en cause des toxines bactériennes et des LPS est plus récente. Les endotoxines et les lipopolysaccharides membranaires bactériens sont libérés lorsque la bactérie est détruite[123]. Ces molécules ont des propriétés proinflammatoires[69] et leur diffusion[24] peut donc être à l'origine d'une lésion périapicale.

Les LPS pourraient être les plus petites molécules proinflammatoires vis à vis desquelles le matériau d'obturation devrait être étanche.

Une étanchéité absolue ne paraît donc pas indispensable pour obtenir un succès clinique.

De plus en plus d'auteurs [117, 29] prônent une étanchéité supérieure. Le matériau d'obturation devrait empêcher la pénétration de molécules de la taille des nutriments situés dans le périapex afin de bloquer la croissance bactérienne. Le glucose, essentiel au développement des bactéries de la flore buccale pourrait être la molécule de référence en terme d'étanchéité.
Selon cette approche, en l'absence d'effet bactériostatique ou bactéricide à long terme, le matériau d'obturation devrait procurer une étanchéité vis à vis des molécules de la taille des LPS ou à l'extrême du glucose.

Parmis les facteurs qui régissent l'étanchéité apicale, la technique chirurgicale est certainement le plus important et celui qui a le plus influencé le gain d'étanchéité : type de résection, retropréparation, augmentation de l'acuité visuelle.
Le type de matériau d'obturation est naturellement très important mais ses critères de choix semblent plus de l'ordre du subjectif que d'une approche scientifique méta-analytique fondée.
Or il paraît nécessaire de mieux déterminer ce paramètre afin de le tester de façon fiable et reproductible. Les divergences de protocoles *in vitro* ne permettent pas de comparaison scientifiquement fondée sur les résultats rencontrés dans la littérature.
De nombreuses méthodes sont utilisées pour tester l'étanchéité des biomatériaux d'obturation *a retro* : les tests de pénétration de colorants ou d'isotopes (ces derniers ont été abandonnés), les observations d'interfaces au microscope électronique à balayage (sans pour autant qu'il soit admis qu'il y ait une corrélation entre ces observations et l'herméticité), les tests électrochimiques, la diffusion de micro organismes et de toxines bactériennes ou les tests de filtration de fluide. Elles visent à comparer entre eux les comportements des matériaux pour un protocole donné.

La validité des résultats et leur interprétation sont remises en question du fait des résultats contradictoires rencontrés. Par exemple, l'adjonction d'une couche de vernis sur l'amalgame pour améliorer son étanchéité a été envisagée. Certains auteurs [108, 85] utilisant du bleu de méthylène mettent en évidence un gain d'étanchéité grâce au vernis. D'autres, par un système de filtration de fluide [51] ou par pénétration d'India Ink [65] ne trouvent pas de différence significative. L'étude par percolation de Chong [17] semble placer le CVI devant l'amalgame. Celle de King par système de filtration de fluide[51] avec le Ketac Silver ® rapporte que ce CVI offre une moins bonne étanchéité que l'amalgame avec ou sans vernis.

Actuellement, les laboratoires de recherche s'orientent vers une standardisation. Ils l'ont partiellement obtenue en adoptant quasiment à l'unanimité la technique microchirurgicale pour préparer leurs échantillons. La plupart des tests réalisés depuis ces 10 dernières années s'appuient sur une résection apicale perpendiculaire à l'axe radiculaire ce qui comme nous l'avons vu précédemment diminue les variations issues de la perméabilité dentinaire. Ils s'appuient également sur une retropréparation ultrasonore aux mensurations plus standardisées que par le passé grâce à l'utilisation d'inserts calibrés 1 mm X 3 mm.
Certains facteurs sont déjà contrôlés mais trop demeurent aléatoires.

1. Protocoles expérimentaux

2.1. Tests électrochimiques

Ces tests ont initialement été employés pour tester des traitements canalaires orthogrades[45] mais sont beaucoup moins fréquents dans les études que les tests de percolation.

2.1.1 Principe

Le circuit est constitué d'un générateur de courant, d'un bain électrolytique (ex : KCl), d'une cathode et d'une anode située dans la racine dentaire obturée *a retro* (Fig. 15).
Certaines études utilisent un courant alternatif et évaluent l'étanchéité en mesurant l'impédance. D'autres font appel à un courant continu et à des mesures de tension ou d'intensité.
Les 2 études par test électrochimique pour évaluer des matériaux d'obturation *a retro* recensées sur Pubmed utilisent un courant continu.

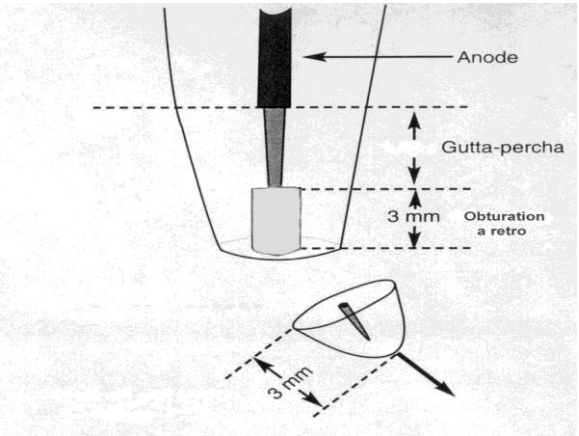

Fig 16 Préparation des spécimens

Le test vise à mesurer les variations d'intensité dans le circuit (Fig. 16) en fonction du temps. Ces variations seraient dues à un flux ionique proportionnel au manque d'étanchéité à l'interface dent/matériau.

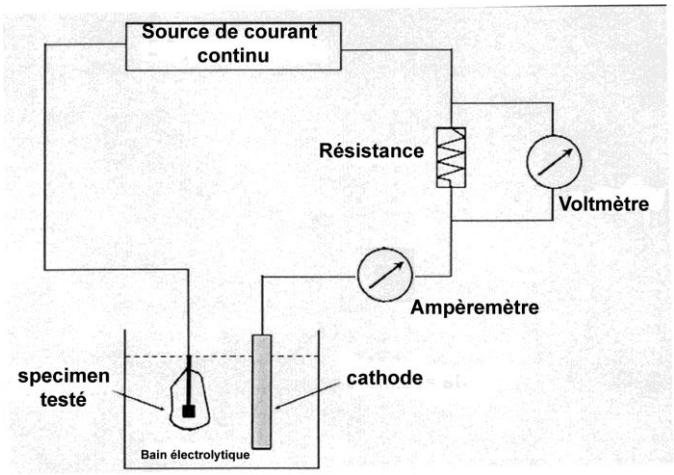

Fig.17 Circuit électrique (mesure de l'intensité ou de la tension)

2.1.2 Avantages :

La technique électrochimique permet de faire des mesures linéaires dans le temps et prend en compte l'étanchéité spatiale de l'obturation.

2.1.3 Inconvénients :

Le gros inconvénient de ces tests est que l'électrolyte doit pénétrer totalement et entrer en contact avec la cathode pour mesurer un degré d'étanchéité. En l'absence de ce contact, la perte partielle d'étanchéité ne peut pas être mesurée.

L'autre problème est la corrosion induite par ce système qui aboutit très rapidement à une diminution des valeurs d'intensité de courant. De nombreux paramètres comme le bain électrolytique, la tension appliquée et les électrodes impliquent un phénomène de corrosion à plus ou moins long terme. De plus, la nature des matériaux testés influence le processus d'apposition ionique. Ainsi, l'amalgame n'aura pas le même comportement vis à vis de la corrosion qu'un IRM par exemple. Les propriétés physico-chimiques du matériau testé modifient la variable statistique.

Delivanis et Chapman en 1982 [21] ont trouvé une bonne corrélation entre un test de percolation et un test électrochimique en début et en fin d'étude. Dans l'intervalle, les résultats étaient relativement éloignés

Une étude récente[60] compare 3 matériaux , l'IRM, le sEBA et le MTA par un test électrochimique (résultats Fig.17) et un test de percolation. Martell obtient une bonne corrélation entre les résultats des 2 protocoles avec une sensibilité accrue pour le test électrochimique puisqu'il n'observe pas de différence significative entre l'IRM et le sEBA avec le test de percolation (tableau 5).

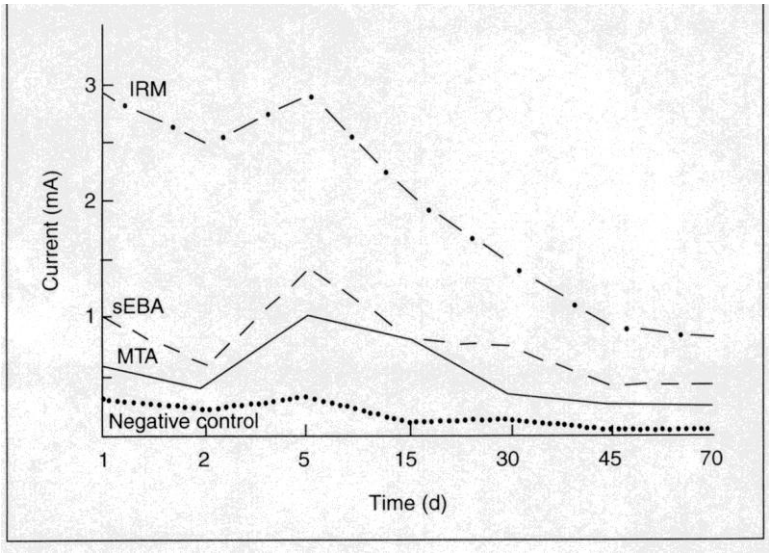

Fig.18 Intensités de courant obtenues par Martell et al. [60] par un test électrochimique avec du MTA, de l'IRM et du sEBA

Néanmoins, les intensités mesurées présentent une grande variabilité dans le temps et s'effondrent au delà de 15 jours.

Tableau 5. Résultats de tests électrochimiques référencés sur Medline.
Parmis les articles publiés entre 1993 et 2003 seules 2 études utilisent ce type de test.

Ref. année	Electrolyte	Durée d'observation	Classement de l'étanchéité relative des matériaux testés
(60) 2002	KCl 1%	70 jours	**MTA > sEBA > IRM**
(2) 1993	KCl 1%	30 jours	**CVI>Amg.>Gutta chaude = Polycarboxylate de Zn**

La validité de ce type de test est sérieusement remise en cause par les auteurs de ces 2 études.

2.2.Tests de percolation

2.2.1 Principe

Les tests de percolation sont les plus fréquents dans la littérature. Ils sont employés pour tester l'étanchéité des restaurations coronaires, des obturations endodontiques ou des obturations *a retro.*

Classiquement, les dents préparées sont placées dans un bain contenant un colorant pendant une durée déterminée. Passé ce temps, elles sont généralement sectionnées puis inspectées par un opérateur qui évalue la profondeur de pénétration. Cette longueur serait inversement proportionnelle à l'étanchéité procurée par le matériau vis à vis des particules contenues dans le colorant.

De nombreuses variations sont à signaler selon les protocoles et expliqueraient les résultats parfois très différents et mêmes contradictoires que fournissent ces tests.

2.2.2 Avantages

- tests faciles à mettre en place et peu coûteux.
- choix de la taille des particules de colorant correspondant au niveau d'étanchéité voulu.
- test le plus répandu et le mieux connu.

2.2.3 Inconvénients :

- destruction des spécimens

  Des coupes sont réalisées à un temps t impliquant la destruction des échantillons. Des études longitudinales permettant de suivre le comportement du matériau dans le temps sont impossibles.

- nature du colorant.

Différents colorants sont utilisés dans les études : bleu de méthylène, Pelican INK, India INK, Nitrate d'argent…(tableau 6).

Tableau 6. Diversité des colorants utilisés dans les études .

Auteurs	colorant
Martell B, Chandler NP. [53]	bleu de méthylène 1%
Roy CO, Jeansonne BG, Gerrets TF. [68]	Pelikan INK
Sutimuntanakul S, Worayoskowit W, Mangkornkarn C. [85]	India INK
Holt GM, Dumsha TC. [39]	Nitrate d'argent
O'Connor RP, Hutter JW, Roahen JO. [56]	bleu de méthylène 1%
Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford TR. [90]	bleu de méthylène 1%
Aqrabawi. [4]	bleu de méthylène 1%

(articles publiés entre 1993 et 2003 recherchés sur Medline)

La variabilité des colorants utilisés complique toute étude comparative car ils possèdent des propriétés différentes :

_les propriétés physiques :

La taille des molécules de colorant définit le niveau d'étanchéité testé. Le Nitrate d'argent est constitué d'ions Ag^{2+} dont le diamètre est d'environ 0.059nm.

D'après Kersten et Moorer [48], le bleu de méthylène est constitué de molécules dont la taille est comparable à l'acide butyrique, produit de relargage bactérien.

L'India INK possède des molécules plus volumineuses de taille comparable aux bactéries [116].

_les propriétés chimiques

Deux processus participent à la pénétration du colorant : capillarité et diffusion.

Certains colorants restent en suspension dans l'eau comme l'India ink, d'autres se dissolvent comme le bleu de méthylène ou le nitrate d'argent.

L'étude de Wu et Wesselink [120] montre que le bleu de méthylène pénètre plus par diffusion que par capillarité à l'intérieur des spécimens maintenus humides.

Caque colorant présente une hydrophobicité propre qui influence son affinité pour le tissu dentinaire.

Il existe des interactions entre les matériaux testés et le colorant. Leur pH est susceptible de modifier les propriétés physicochimiques du matériau d'obturation. Un contrôle de neutralité paraît indispensable avant l'expérimentation. Le colorant peut être modifié par le matériau d'obturation : Wu et coll.[121] ont comparé le comportement du bleu de méthylène au contact d'obturations standardisées de 2.5 mm X 3 mm sur 24, 48 et 72 heures et concluent à une décoloration significative lorsqu'il est mis en contact avec du MTA en raison de l'instabilité

du bleu de méthylène en milieu alcalin. Ils mettent ainsi en évidence la nécessité d'étudier préalablement les interactions potentielles des matériaux testés avec le colorant.

- moyen d'observation

Mesures selon 2 dimensions :

La plupart de ces tests aboutissent à une lecture de la pénétration linéaire du colorant sur une coupe en 2 dimensions. Le plus souvent dans les études, les spécimens sont sectionnés longitudinalement selon leur grand axe, puis étudiés à la loupe binoculaire ou au microscope afin d'enregistrer une mesure linéaire du maximum de pénétration. Or la pénétration de colorant n'est pas homogène et le maximum de pénétration de colorant ne se situe pas forcément dans le plan de coupe sélectionné (photos 1 et 2).

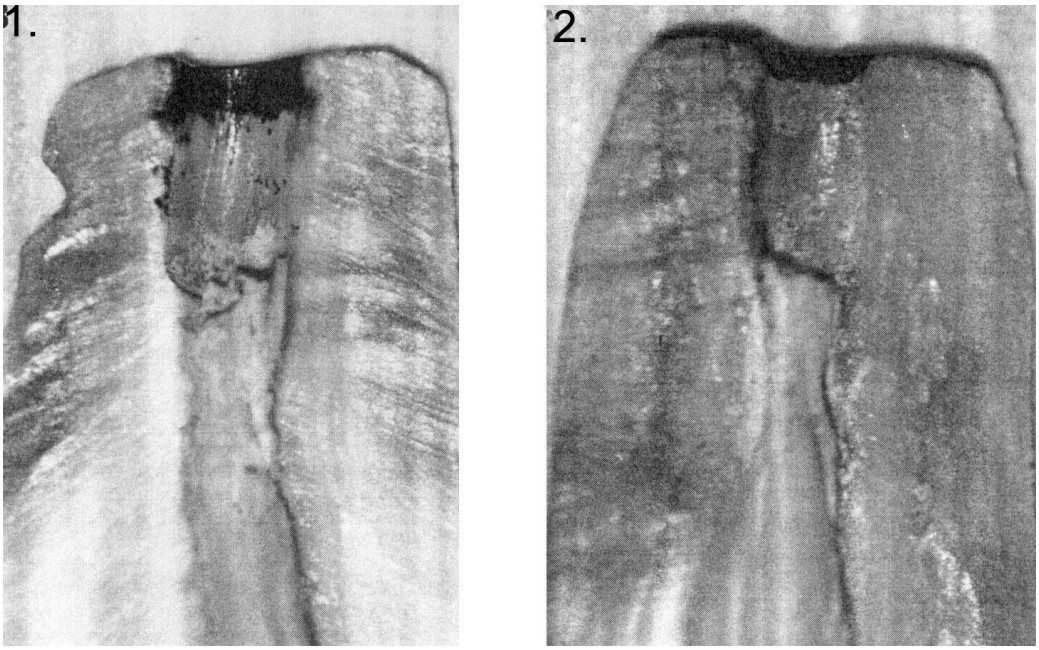

Photo 1 :pénétration de colorant sur coupe longitudinale de racine obturée a retro à l'amalgame en présence de sang

Photo 2 : pénétration de colorant sur coupe longitudinale de racine obturée a retro au MTA en milieu sec. Photos issues de l'article de Torabinejad [(96)] visant à étudier l'influence de la contamination sanguine sur les propriétés d'étanchéité de différent matériaux.

Mesures selon 3 dimensions :

Deux schémas principaux sont utilisés pour obtenir des mesures de pénétration volumétriques et s'affranchir des inconvénients que présentent les mesures bidimensionnelles:

_ le premier fait appel à un protocole complexe de transparisation des spécimens à une mesure du maximum de percolation. Tagger et coll. [(92)]ont publié en 1983 un procédé de

transparisation par trempage des spécimens dans de l'acide nitrique pendant 5 jours suivi d'un rinçage, d'une déshydratation au méthanol pur, puis d'un bain d'acide méthyl-salicylique.
Les expérimentations de Sutimuntanakul [90] et de Roy[74] utilisent cette technique.

_ le deuxième consiste à effectuer des coupes rapprochées et à effectuer des mesures sur chaque coupe pour en sortir une analyse volumétrique. Lyroudia et coll [55] de l'US Army sont allés plus loin en proposant une reconstitution informatique du volume de colorant (India ink) dans le cadre de tests sur les obturations orthogrades. Ils effectuent des coupes très fines (0,75mm) des spécimens, les photographient au microscope puis les scannent. Un logiciel peut alors reconstruire en 3 dimensions le volume dentaire et le volume de colorant présent.

- critères d'évaluation

Dejou et coll.[20] ont publié une étude visant à évaluer différents adhésifs amélo-dentinaires et à comparer différents systèmes de mesure de pénétration du colorant afin de voir dans quelle mesure il pouvait influencer les résultats. 260 dents ont été sélectionnées et 5 critères d'évaluation testés : moyenne, médiane, score, maximum de pénétration, % de dents sans pénétration.
Sur des coupes identiques, selon le critère choisi, les ordres de rang varient.
Les auteurs concluent que la sélection d'un critère d'évaluation influence 2 paramètres fondamentaux des études : la puissance et les ordres de rang.

Nous avons recensé les critères d'évaluation utilisés dans des études parues entre 1993 et 2003 et référencées sur Medline (tableau 7)
Leur pertinence est remise en question.

Tableau 7. Variabilité des types de mesure rencontrées dans différents tests de percolation sur des matériaux d'obturation a retro.

Auteurs	ref. année	type de mesure
Martell B, Chandler NP.	(53) 2002	coupes longitudinales puis mesure du % de pénétration par rapport à la longueur de l'échantillon.
O'Connor RP, Hutter JW, Roahen JO.	(56) 1995	coupes longitudinales puis mesure du % de pénétration par rapport à la longueur de l'échantillon.
Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford .	(90) 1994	coupes longitudinales puis mesure du % de pénétration par rapport à la longueur de l'échantillon.
Sutimuntanakul S,Worayoskowit W, Mangkornkarn	(85) 2000	coupes longitudinales puis mesure de L max (mm) de pénétration linéaire
Holt GM, Dumsha TC.	(39) 2000	coupes longitudinales puis mesure de L max (mm) de pénétration linéaire
Aqrabawi.	(4) 2000	coupes longitudinales et calcul du % de spécimens présentant une étanchéité acceptable ou non
Roy CO, Jeansonne BG, Gerrets TF.	(68) 2001	déminéralisation puis moyenne de 4 mesures de la pénétration linéaire (mm)

- « entrapped air » ou air emprisonné dans la dentine

Cette polémique est très active concernant l'endodontie orthograde et l'étanchéité des obturations. Alors que nous savons qu'une obturation directement au contact d'une flore bactérienne est contaminée intégralement en quelques jours, la plupart des tests de percolation aboutissent en moyenne à la pénétration du colorant sur la moitié de la longueur canalaire. Une différence évidente se manifeste entre la percolation passive et le comportement bactérien.

L'influence de l'air présent dans la dentine fut d'abord évoqué par Spradling et Senia [(88)] dans le cadre des obturations endodontiques orthogrades. Ils pensaient que l'air emprisonné dans les spécimens immergés dans le colorant pouvait empêcher la pénétration de colorant. Goldman et coll. en 1989 [(35)] ont proposé un système de percolation après immersion des échantillons dans une cuve sous pression afin de chasser l'air des spécimens. Ils ont observé que des colorants comme le bleu de méthylène ne pouvaient pas pénétrer par percolation passive l'intégralité d'un vide aménagé volontairement dans des obturations canalaires alors que la percolation sous pression induisait une pénétration totale des obturations.

Wimonchit et coll.[116] ont effectué une expérience similaire en comparant trois systèmes de tests d'étanchéité : percolation passive, percolation sous pression et percolation après filtration de fluide. Ils obtiennent une pénétration d'India ink supérieure après avoir placé les spécimens 30 min à 0,1 cm de Hg. Toutefois, Oliver et Abbott [64].dénoncent les limites de ce procédé en montrant qu'une pression faible de l'ordre de 0,1 cm Hg parvient à chasser l'air de capillaires artificiels de l'ordre du mm de diamètre mais que des pressions très importantes sont nécessaires pour chasser l'air des capillaires plus fin de l'ordre du µm. Or de telles pression risquent de dénaturer les obturations.
Wu et Wesselink[120] ont mis au point une étude visant à valider la préparation des spécimens par filtration de fluide. L'air est progressivement remplacé par de l'eau (cf. système de filtration de fluide SFF). Ils testent des obturations orthogrades présentant délibérément une faible étanchéité. Les colorants hydrosolubles comme le bleu de méthylène utilisé dans cette expérience peuvent ainsi diffuser dans les spécimens sans être perturbés par des résidus d'air toujours présents dans les micro-capillarités. Ils obtiennent des différences significatives entre percolation passive et percolation après préparation par SFF. La SFF favorise la pénétration du bleu de méthylène. Celui-ci semble d'ailleurs plus pénétrer par diffusion que par capillarité comme le montrent les faibles pénétrations obtenues durant la même étude sur des spécimens insérés dans un système de filtration d'air qui chasse toute l'eau présente dans les spécimens.

L'air présent dans la dentine radiculaire modifie indéniablement les valeurs de pénétration de colorant pour les tests de percolation sur obturations endodontiques orthogrades.
Les tests d'étanchéité sur les matériaux d'obturation *a retro* sont certainement moins influencés par ce phénomène mais ses répercutions sur les résultats peut exister et nécessite des études comparatives.

Nous avons entrepris d'étudier des résultats de tests de percolation (tableau 8).
Sept études ont été recensées sur Medline.

Tableau 8. Comparaison d'études par percolation publiées entre 1993 et 2003.

Auteur ref. année	Colorant	Durée d'immersion	Classement d'étanchéité des matériaux
Martellet al (50) 2002	bleu de méthylène 1%	72 heures	**MTA > sEBA = IRM**
Roy et al (64) 2001	Pelikan INK	5 jours 8 jours	**MTA = sEBA = CVI modifié >amg.seul** **MTA = sEBA > CVI modifié >amg. seul**
Sutimuntanakul et al (80) 2000	India INK	7 jours	**sEBA > CVI modifié > Gutta + ciment > amg + vernis**
Holt.et al (36) 2000	Nitrate d'argent	7jours	**amg.vernis>ciment ortho>résine PMMA>ciment ortho+ etching>sEBA**
O Connor et al. (52) 1995	bleu de méthylène 1%	4 mois	**sEBA > amg + vernis**
Torabinejad et al. (85) 1994	bleu de méthylène 1%	72 heures	**MTA > IRM = sEBA = amg.seul**
Aqrabawi et al. (4) 1999	bleu de méthylène 1%	72 heures	**MTA > sEBA >Amg. seul**

Toutes ces études placent le MTA devant l'amalgame et aboutissent à des comportements équivalents du sEBA et de l'IRM.

En revanche elles divergent concernant le sEBA et l'amalgame :

Roy [74], Aqrabawi [5] placent le sEBA devant l'amalgame seul, alors que Torabinejad [96] ne trouve pas de différence.

Holt [43] et O Connor [63] placent l'amalgame + vernis devant le sEBA alors que Sutimuntanakul [90] montre l'inverse.

2.2.4 Conclusions

Les tests de percolation sont les plus rencontrés dans la littérature car très simples à mettre en place.

Ils souffrent de nombreuses divergences de protocole : principalement les colorants utilisés, les modes d'observation et les types de type de mesures.

Les résultats sont relativement homogènes en ce concerne le MTA qui serait le matériau offrant la meilleure étanchéité. Cependant les contradictions rencontrées autour des eugénates et de l'amalgame rendent caduques ces résultats.

2.3.Test par système de filtration de fluide (SFF).

Le système de filtration de fluide a été développé par Derkson et Pashley en 1984 [22] pour tester l'étanchéité de restaurations coronaires. Le procédé a été repris en 1990 pour évaluer l'étanchéité des obturations *a retro* (King et Col. [51] et Yoshimura [124]). Wu, Wesselink et Coll ont également repris ce système pour tester des obturations endodontiques orthogrades[119,120] et des obturations *a retro* [117].

2.3.1 Principe

Il consiste a faire passer un fluide sous pression dans une racine préparée.

Classiquement le système est constitué d'un côté par une cuve maintenant sous pression un liquide, par une bulle d'air située dans la canalisation dont le mouvement est suivi grâce à des graduations et de l'autre côté par le spécimen relié à la canalisation (fig.18). Selon les protocoles, le spécimen est connecté par l'orifice apical ou par l'orifice coronaire, l'autre orifice étant laissé à l'air ou relié à une autre canalisation contenant le même liquide

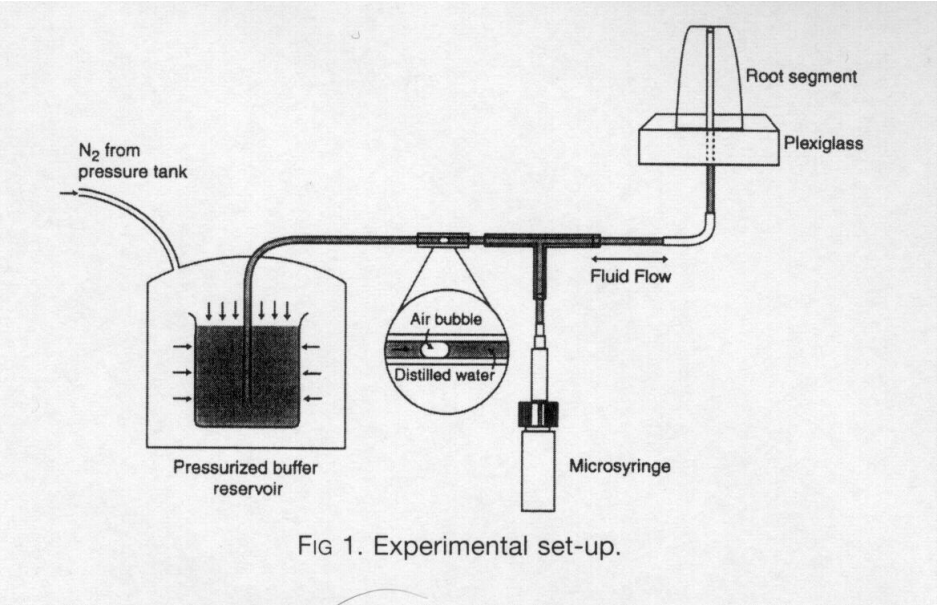

Fig.19 Modèle de filtration de fluide présenté dans l'article de Greer [37].

Le mouvement de la bulle d'air est mesuré, puis converti en débit µL/min par une formule simple faisant intervenir le diamètre du tube. Une micro-seringue située à proximité de la bulle permet de la positionner sur les graduations avant le lancement de la mesure.

Le débit de ce flux est mesuré en µL/min/cmH_2O et correspond à l'espace dans lequel a pu s'infiltrer le liquide. Ce volume infiltré peut être évalué en appliquant la loi de Poiseuille :

$$\mathbf{Q = \pi \Delta P r^4 / 8 L \eta}$$

Q = débit mesuré, ΔP : différence de pression aux 2 extrémités du système, r : rayon du capillaire théorique, L : longueur du capillaire théorique, η:viscosité du fluide

Le débit mesuré permet de déterminer le rayon d'un capillaire théorique unique dans lequel passe le liquide de filtration. Ce flux pénètre en réalité en empruntant des « vides » [120] multiples correspondant au manque d'étanchéité du matériau.
A débit égal, si l'on se place dans une situation plus réaliste avec plusieurs capillaires, l'équation aboutit à un rayon théorique égal à la racine 4ème de la somme des rayons individuels chacun au carré. Autrement dit, le rayon théorique est toujours supérieur à la somme des rayons individuels. Un diamètre théorique de 1 µm serait donc le seuil garantissant une étanchéité bactérienne.

2.3.2 Avantages

- données quantitatives volumétriques
- pression positive qui permet d'éviter le problème des bulles d'air emprisonnées dans les tubuli dentinaires (cf. Tests de percolation).
- études longitudinales
- préservation des spécimens
- modulation de la sensibilité du système en jouant sur la pression de fluide ou sur le diamètre de la canalisation.
- couplage possible avec un test de percolation par ajout de colorant. Le problème de l'air emprisonné est ainsi évité.

2.3.3 Inconvénients

- variance élevée dans un même échantillon
- interférences induites par la variabilité du diamètre canalaire.
- dans la plupart des études, les contrôles négatifs ne sont pas nuls du fait essentiellement de la perméabilité dentinaire (fig.19).
- interférences induites par la perméabilité dentinaire (canaux accessoires, tubuli, smear layer) et cémentaire (fig.19)

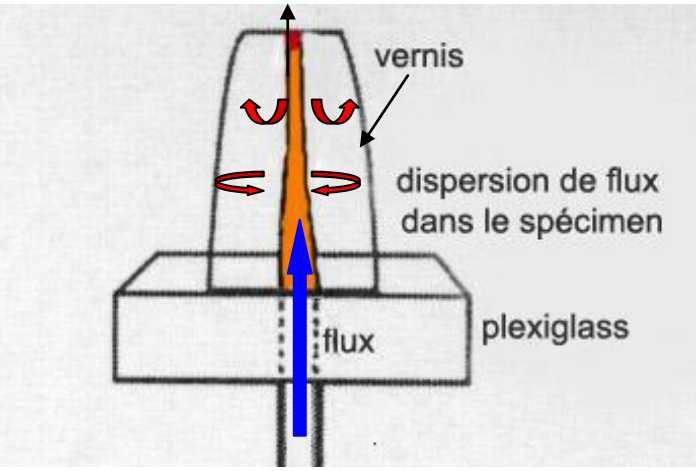

Fig 20 simulation du flux à l'intérieur d'un échantillon.

2.3.4 Discussion

Pour atténuer la variance des résultats, Wu et coll. [119] préconisent de contrôler la longueur des spécimens, l'anatomie canalaire et le volume dentinaire pour homogénéiser le facteur perméabilité dentinaire. Ils prônent une solution isotonique neutre contrôlée pour les raisons évoquées en percolation.

Certains auteurs ont soulevé le problème posé par l'intensité de la pression exercée. Cette pression modifie la sensibilité du test d'une part et modifie le comportement du matériau d'obturation d'autre part. Les premières études ont utilisé des pressions importantes qui ne reflétaient pas les conditions cliniques. Des études plus récentes emploient une pression de 0,1 atm = 76mmHg correspondant à la situation clinique. Trowbridge [107] a estimé que la pression dans les artérioles pulpaires est d'environ 43,35mm Hg. La pression supposée dans le périapex est égale ou légèrement supérieure lorsque la dent subit des contraintes de mastication.

Le niveau d'étanchéité peut être défini grâce à la loi de Poiseuille. Il est possible de définir le diamètre minimal au dessus duquel le matériau peut être jugé non étanche.
Ce peut être un diamètre de type bactérien, LPS ou glucose.

Comparaison de résultats d'études par SFF Tableau 9.

Tableau 9. Comparaison de résultats d'études par SFF parus entre 1993 et 2003: Articles référencés sur Pubmed,

Ref. année	Type de fluide	t mesure	Classement des matériaux
Fogel et al. [25] 2001	eau déminéralisée	1 sem	MTA = sEBA = résine PMMA > IRM > amg. seul
Greer et al. [33] 2001	eau déminéralisée	1 jour	résine PMMA > IRM = CVI modifié > sEBA
	eau déminéralisée	7 jours	résine PMMA = IRM = CVI modifié = sEBA
	eau déminéralisée	1 mois	résine PMMA = CVI modifié = sEBA > IRM
	eau déminéralisée	6 mois	sEBA = résine PMMA > CVI modifié > IRM
Wu et al. (107) 1998	eau déminéralisée	1 jour	CVI modifiés > sEBA = amg. seul > MTA
	eau déminéralisée	3mois	MTA = CVI modifiés > sEBA > amg.seul
	eau déminéralisée	6mois	MTA = CVI modifiés > sEBA > amg.seul
	eau déminéralisée	12mois	MTA > CVI modifiés > sEBA > amg.seul
Bates et al. (8) 1996	serum physio. + colorant	24 heures	MTA = sEBA > amg. + vernis
	serum physio. + colorant	72 heures	MTA = sEBA > amg. + vernis
	serum physio. + colorant	2 semaines	MTA = sEBA > amg. + vernis
	serum physio. + colorant	4 semaines	MTA = sEBA = amg. + vernis
	serum physio. + colorant	8 semaines	MTA = sEBA = amg. + vernis
	serum physio. + colorant	12 semaines	MTA = sEBA = amg. + vernis

* Hi dense, Fugi II

- Les classements à l'intérieur d'une même étude varient selon le temps de mesure :

Elles peuvent témoigner des modifications que subissent les matériaux dans le temps.
Elles montrent aussi les voisinages de comportement de ces matériaux vis à vis de ce type de test.
La variance importante dans chaque échantillon peut également expliquer la promiscuité des moyennes et ces aléas de classement.
Dans l'étude de Wu [117], à 1 jour, le MTA présente une étanchéité inférieure à tous les matériaux testés. C'est l'inverse dans celle de Bates [9].

- De nombreuses contradictions sont observées entre les études (tableau 9).

Greer [37] et Wu obtiennent des résultats totalement opposés concernant les comportements relatifs du sEBA et des CVI modifiés. Au début de l'étude Greer place le Geristore devant le sEBA alors que Wu obtient l'inverse. En fin d'étude, le classement est inversé pour les 2 études : sEBA > CVI à 6 mois pour Greer, CVI > sEBA à 6 et 12 mois pour Wu.

Bates et Bates ne montrent pas de différence quel que soit le temps d'observation entre le MTA et le sEBA alors que Wu aboutit à une supériorité significative du MTA. Ces divergences sont certainement dues à une différence de sensibilité des tests employés. La définition et la standardisation d'un niveau de sensibilité paraît indispensable.

2.3.5 Protocole de Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR. [117]

Long-term seal provided by some root-end filling materials. 1998

Wu modifie le protocole qu'il avait utilisé en 1993[119] et 1994[120] pour tester des obturations orthogrades. Alors que les études de matériaux d'obturation *a retro* par SFF utilisent des racines quasi complètes de longueur standardisée, Wu utilise des cylindres de racines de 3mm d'épaisseur correspondant à la longueur de l'obturation. Il s'affranchit des interférences issus de l'anatomie canalaire radiculaire. Chaque cylindre est recouvert de 2 couches de vernis puis préparé de part en part par insert ultrasonore standard. Le volume dentinaire est donc constant ainsi que le volume de matériau d'obturation.

Dans cette étude, une centaine de cylindres issus de racines de bovins sont préparés.
Chaque cylindre présente un diamètre de 5 mm et un diamètre de préparation canalaire de 2,6 mm pour une épaisseur de 3 mm.
Cinq échantillons contenant chacun 20 spécimens sont étudiés: MTA, sEBA, 2 CVI modifiés par adjonction de résine (Fugi II et Hi Dense), et un amalgame sans zinc sans application de vernis. Deux lots servent de contrôle positifs et négatifs pour valider le système.

Le cylindre est placé entre 2 tubes de filtration solidarisés par une bague en acier qui garantit l'étanchéité du système (fig.20). Le fluide est injecté sous une pression faible de 10 Mpa = 75mmHg.

Pour les contrôles positifs, le mouvement de la bulle d'air est trop rapide pour enregistrer une mesure de flux.

Pour les contrôles négatifs, aucun mouvement de fluide n'est décelé.

Les mesures sont données en µL/jour. Les classements figurent tableau 10

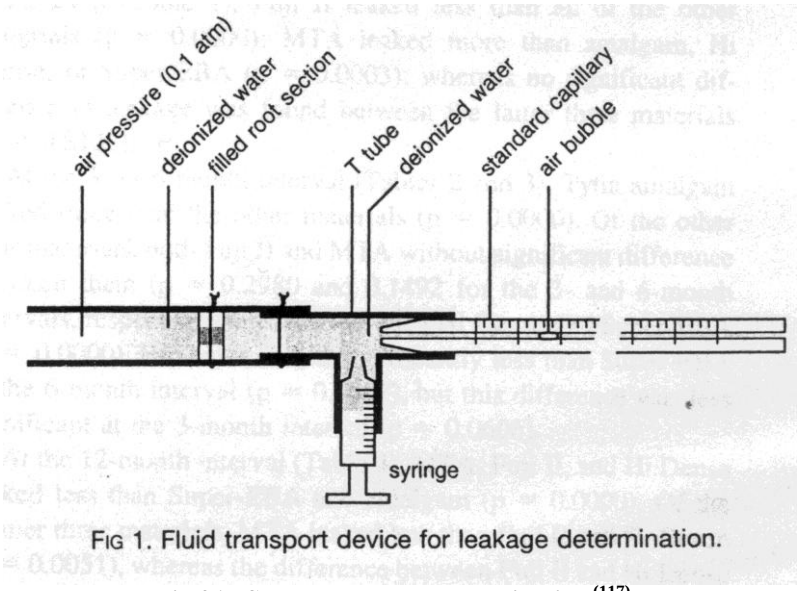

Fig 21 Schéma présenté dans l'article[117]

Tableau 10 : classement des matériaux d'après l'étude de Wu [117]

1 jour	CVI modifiés > sEBA = amg. seul > MTA
3mois	MTA = CVI modifiés > sEBA > amg.seul
6mois	MTA = CVI modifiés > sEBA > amg.seul
12mois	MTA > CVI modifiés > sEBA > amg.seul

Le MTA offre les meilleurs valeurs d'étanchéité qui diminuent au fur et à mesure de l'étude. Les valeurs pour l'amalgame et le sEBA augmentent pendant les 3 premiers mois puis diminuent.

Wu tire 4 avantages de ce protocole : il isole le paramètre qu'il cherche à étudier à savoir l'interface dent matériau, atténue l'effet de la perméabilité dentinaire, diminue la variance intra échantillon et affine la sensibilité du test.

2.3.6 Conclusions

Le système de filtration de fluides présente l'énorme intérêt de fournir des mesures quantitatives volumétriques précises et semble être en mesure de définir et quantifier l'étanchéité.

Il semble en mesure de permettre une standardisation des protocoles de filtration de fluides.

Les études de Wu cherchent à améliorer la reproductibilité des résultats désormais comparables en diminuant la variance dans les échantillons.

Les résultats demeurent néanmoins très confus et ne permettent pas de distinguer tel ou tel matériau.

2.4 Les tests d'étanchéité aux bactéries ou à leurs sous produits.

Du fait du manque de corrélation entre les études de percolation utilisant des colorants ou des isotopes et les études de filtration de fluide, il paraît plus intéressant d'étudier la perméabilité vis à vis des bactéries puisque l'objectif principal est d'empêcher leur diffusion.

2.4.1 Principe :

Les tests actuels reprennent le modèle de Gish et al. (1994) [34].

Ils consistent à inoculer une suspension bactérienne dans la lumière canalaire coronaire de la dent préparée, la partie apicale baignant dans un milieu de culture (Fig.21). Ce bain apical contient un colorant réagissant le plus souvent à des produits de relargage spécifique de la bactérie utilisée pour le test. En cas de dissémination bactérienne, le milieu se colore mais le risque de faux positifs est relativement important. Une mise en évidence par microscope est ensuite nécessaire.

Tous ces tests permettent de recueillir des données quantitatives correspondant au moment d'apparition de la coloration.

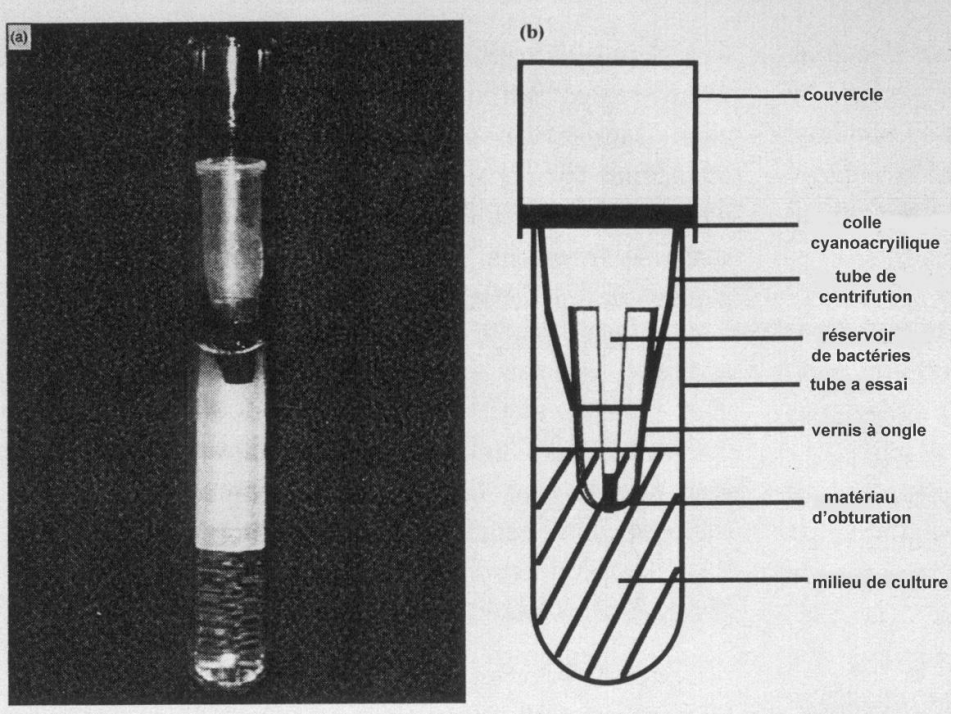

Fig.22 photo (a) et schema(b) des échantillons confectionnés par Adamo et al. [1]

2.4.2 Avantages:

L'objectif d'une obturation *a retro* est de former une barrière étanche vis à vis des bactéries toujours présentes dans le canal et qui sont responsables de la lésion périapicale. Ces tests s'inscrivent donc dans une logique d'évaluation d'efficacité clinique des matériaux alors que les autres tests se heurtent au problème du niveau d'étanchéité recherché.

2.4.3 Inconvénients :

- Ces tests sont très complexes à réaliser et nécessitent un arsenal expérimental dense et coûteux (protocoles de stérilisation, tests bactériens, chambres d'incubation).
- Ils nécessitent une phase de stérilisation de chaque petit système expérimental afin d'éviter toute pollution des bactéries extérieures. Or cette phase de stérilisation peut dénaturer l'échantillon radiculaire ou le matériau d'obturation.
- Le milieu acide induit par la présence de bactéries dans le milieu de culture est mis en évidence par le test de coloration. La variable statistique est le jour d'apparition de la coloration qui ne donne aucune information sur la quantité de bactéries présentes.

La validité de ce test dépend de la rapidité d'acidification du milieu et de la précision avec laquelle le teste signe la présence de la bactérie indépendamment de sa quantité. Or cette quantité à une importance fondamental *in vivo* puisqu'elle conditionne la réponse de l'hôte.

- Ces tests font appel à des souches généralement anaérobies présentes dans la cavité buccale susceptibles de contribuer à la formation d'une lésion péiapicale. Mais il s'agit le plus souvent de sélections monoclonales très éloignée de la synergie bactérienne complexe trouvée *in vivo*.

Fabricius et al. [25] ont contaminé des chambres pulpaires de singes avec 11 espèces de bactéries différentes et refermé la cavité d'accès pendant 6 mois. Ils ont montré que cette sélection polyclonale provoquait des lésions apicales plus rapides et plus importantes que lors d'une contamination monoclonale. De plus l'étude bactériologique révèle que certaines espèces bactériennes ne peuvent pas survivre seules dans le réseau canalaire. Ainsi une sélection monoclonale de bactéroïdes disparaît rapidement et les streptocoques facultatifs induisent des petites lésions. Par contre les entérocoques survivent bien lorsqu'ils sont inoculés seuls.

Comparaison de résultats d'études de tests bactériens : Tableau 11

Tableau 11 Classements de matériaux obtenus par test bactérien dans 5 études publiées entre 1993 et 2003 recherchées sur Pubmed.

Prevotella nigricans	(82) 2001	47 jours	MTA = sEBA = CVI modifié
Sreptococcus salivarius	(1) 1999	90 jours	MTA = sEBA = résine PMMA = CVI modifié = amg. + vernis
Serratia marcescens	(27) 1998	120 jours	sEBA > IRM > MTA = amg.seul
Staphylococcus epidermis	(99) 1995	90 jours	MTA > IRM = sEBA = amg. seul
Salive humaine	(86) 2001	60 jours	sealer26 > Fugi II = IRM
			MTA ? sEBA ? CVI ? Amg

La plupart des études ne mettent pas en évidence de différence significative entre les matériaux. Des expérimentations à très long terme qui pourraient montrer ces différences sont

difficiles à mettre en place car le protocole est exigeant et le risque de contamination extérieur non négligeable.
Par ailleurs, les études de Fischer [27] et Torabinejad [99] sont contradictoires concernant le MTA, le sEBA et l'IRM.

2.4.4 Conclusions et ouverture sur les tests aux endotoxines

Les tests bactériens présentés semblent se placer au plus près de la réalité clinique mais ils présentent de nombreux inconvénients : ils ne semblent pas montrer de différences majeures de comportement des matériaux et leur interprétation est délicate.
Ils présentent par contre l'intérêt d'aller au-delà de la notion d'étanchéité puisqu'ils font intervenir l'activité antibactérienne des matériaux.

L'étanchéité aux seules bactéries est remise en question et l'on cherche maintenant à empêcher la diffusion d'endotoxines ou lipopolysaccharides bactériens. Une recherche sur Medline nous a conduit à une unique étude présentée par Torabinejad en 2002 **[102]**.
Elle utilise un test mettant en évidence des endotoxines issues d'Escherichia Coli, le lymulus amebocyte lysate (LAL) test modifié. La présence d'endotoxines est signée par l'apparition d'une coloration de la solution.
Le dispositif est constitué de 2 tubes à essai qui jouent les rôles de réservoirs supérieur et inférieur, la dent étant maintenue entre les 2 par de la cire collante (fig.22).
4 matériaux sont comparés : MTA, IRM, super EBA et amalgame. Cent quatre dents monoradiculées sont préparées pour l'expérimentation

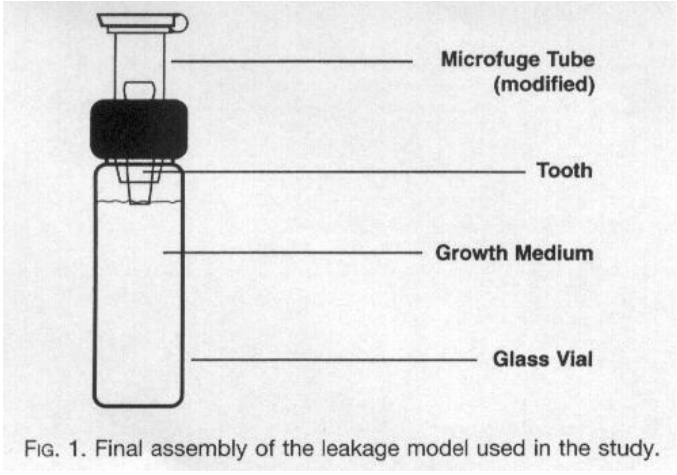

FIG. 1. Final assembly of the leakage model used in the study.

Fig 23. Protocole expérimental schématique présenté par Torabinejad [(102)]

A différents temps d'observation, un certain nombre de réservoirs présente la coloration. Le pourcentage de réservoirs coloré au sein de chaque échantillon est enregistré à chaque temps.

Ce système présente globalement les mêmes inconvénients que les tests bactériens en terme de complexité de protocole et de coût. Néanmoins, Torabinejad obtient des différences significatives entre les échantillons (tableau 12) : la pénétration des LPS est plus rapide et contribue à augmenter la sensibilité du test.
Cependant cette étude pose des questions intéressantes quant au degré d'étanchéité espéré. L'étanchéité absolue aux endotoxines est ici illusoire : toutes les obturations sont contaminées au bout d'un 1 mois. Un seuil de tolérance aux endotoxines pourrait être évalué cliniquement et pourrait servir de référence à condition de pouvoir évaluer le débit d'endotoxines diffusées.

Tableau 12 : classement des matériaux présenté dans l'étude de Torabinejad.

Auteur - année	type d'agent	t mesure	classement des matériaux
Torabinejad et al.[(96)-2002]	Lysate de Limulus Amébocyte	1 sem	MTA = sEBA > IRM = amg. seul
		2 sem	MTA = sEBA > amg. seul > IRM
		6 sem	MTA = sEBA > amg. Seul > IRM
		12 sem	MTA > sEBA > IRM > amg. Seul

3. .Analyse interprotocole.

Nous avons montré les difficultés d'interprétation de résultats pour chaque type de test. L'élargissement de ces données, tous protocoles confondus, semble nous mener vers une confusion plus importante encore.

L'analyse de ces protocoles nous a également permis de faire un inventaire des facteurs qui, outre le type de test, participent à cette confusion .

3.1 Intégration des résultats : tableau 13

Tableau 13 : comparatif des résultats d'études tous protocoles confondus.

Type de test	Agent de diffusion	Auteurs et année de parution	Temps d'observation	Classement de l'étanchéité relative des matériaux testés
Electrochimique	courant coutinu / KCl 1 %	(2) 1993	30 jours	CVI > Amg. > Gutta chaude = Polycarboxylate de Zn
Electrochimique	courant continu 20 mV / KCl 1 %	(60) 2002	70 jours	MTA >sEBA > IRM
percolation	bleu de méthylène 1%	(60) 2002	72 heures	MTA > sEBA = IRM
percolation	Pelikan INK	(64) 2001	8 jours	MTA = sEBA > CVI modifié >amg. seul
percolation	India INK	(80) 2000	7 jours	sEBA > CVI modifié > Gutta + ciment > amg + vernis
percolation	Nitrate d'argent	(36) 2000	7jours	amg. + vernis > ciment à os > résine PMMA > ciment à os + mordançage >sEBA
percolation	bleu de méthylène 1%	(52) 1995	4 mois	sEBA > amg + vernis
percolation	bleu de méthylène 1%	(85) 1994	72 heures	MTA > IRM = sEBA = amg.seul
percolation	bleu de méthylène 1%	(4) 1999	72 heures	MTA > sEBA >Amg. seul
bactérien	Prevotella nigricans	(82) 2001	47 jours	MTA = sEBA = CVI modifié
bactérien	Sreptococcus salivarius	(1) 1999	90 jours	MTA = sEBA = résine PMMA = CVI modifié = amg. + vernis
bactérien	Serratia marcescens	(27) 1998	120 jours	sEBA > IRM > MTA = amg.seul
bactérien	Staphylococcus epidermis	(99) 1995	90 jours	MTA > IRM = sEBA = amg. seul
bactérien	salive humaine	(86) 2001	60 jours	sealer26 > Fugi II = IRM
bactérien	Lysate de Limulus Amébocyte	(96)-2002	1 sem	MTA = sEBA > IRM = amg. seul
Endotoxine	Lysate de Limulus Amébocyte	,,,,,,	2 sem	MTA = sEBA > amg. seul > IRM
Endotoxine	Lysate de Limulus Amébocyte	,,,,,,	6 sem	MTA = sEBA > amg. Seul > IRM
Endotoxine	Lysate de Limulus Amébocyte	,,,,,,	12 sem	MTA > sEBA > IRM > amg. Seul
système de filtration de fluide	eau distillée	(25) 2001	1 sem	MTA = sEBA = résine PMMA > IRM > amg. seul
système de filtration de fluide	eau distillée	(33) 2001	6 mois	sEBA = résine PMMA > CVI modifié > IRM
système de filtration de fluide	eau distillée	(107) 1998	3mois	MTA = CVI modifié > sEBA = résine PMMA > amg.seul
système de filtration de fluide	eau distillée	,,,,,,	6mois	MTA = CVI modifié > résine PMMA > sEBA > amg.seul
système de filtration de fluide	eau distillée	,,,,,,	12mois	MTA > CVI modifié = résine PMMA > sEBA > amg.seul
système de filtration de fluide	serum physio. + colorant	(8) 1996	24 heures	MTA = sEBA > amg. + vernis
système de filtration de fluide	serum physio. + colorant	,,,,,,	72 heures	MTA = sEBA > amg. + vernis
système de filtration de fluide	serum physio. + colorant	,,,,,,	2 semaines	MTA = sEBA > amg. + vernis
système de filtration de fluide	serum physio. + colorant	,,,,,,	12 semaines	MTA = sEBA = amg. + vernis

A partir du tableau 13, nous avons pratiquer un classement arbitraire des 4 matériaux les plus fréquemment testés dans les études (Tableau 14).

Tableau 14 : Recensement des rangs obtenus avec 4 matériaux

	nombre de fois 1er	nombre de fois 2ème	nombre de fois 3ème	nombre de fois 4ème
MTA	17	0	1	0
sEBA	11	9	0	0
IRM	0	7	5	0
Amalgame seul	0	5	6	3

La majorité des études confère à l'amalgame avec ou sans vernis le plus faible potentiel d'étanchéité en tant qu'obturation *a retro*.

Certains tests par filtration de fluide placent le MTA à égalité avec le sEBA devant les CVI modifiés, puis l'amalgame + vernis, d'autres le placent devant les CVI suivi du sEBA.

Globalement, les tests par SFF montrent une supériorité d'étanchéité du MTA.

Par ailleurs, ils montrent une supériorité du sEBA sur l'IRM alors que les tests de percolation la mettent rarement en évidence.

Les tests de percolation mènent à des classements variables du MTA, du sEBA, de l'IRM et des CVI. Il semblerait que le MTA soit supérieur au sEBA, lui même supérieur à l'IRM, mais souvent aucune différence significative n'est perçue entre MTA et sEBA ou entre sEBA et IRM.

Les CVI ont des comportements voisins de ceux des eugénates prise rapide mais les résultats varient beaucoup selon le protocole. Les tests de percolation placent parfois les CVI modifiés devant le sEBA, parfois l'inverse.

Les résines composites ont été peu testées et leurs propriétés d'étanchéité en tant que matériau d'obturation *a retro* restent floues.

Les CVI et les résines composites souffrent en réalité du large panel de produits du commerce employés dans les études qui complique les interprétations. La composition chimique est de fait très variable selon le fabriquant et induit des comportement différents : le rapport charge minérale/charge organique conditionne le comportement des CVI et des résines composites, le type de solvant utilisé conditionne celui des adhésifs amélo-dentinaires.

3.2 Facteurs supplémentaires.

De nombreux facteurs moins apparents peuvent perturber les résultats.

Nous avons répertorié 4 catégories de facteurs à partir des descriptions des protocoles de tests présentés dans les études recensées tableau 13 : milieu de stockage, milieu de conservation, préparation des spécimens et milieu expérimental.

3.2.1 Milieu de stockage

Le milieu d'immersion des dents après extraction varie selon les études recensées (tableau 13). La moitié du temps, il s'agit de formol 10%, l'autre moitié d'hypochlorite de sodium diluée à 5%.

La nature du bain et la durée d'immersion jouent certainement un rôle sur la structure dentinaire.

3.2.2 Milieu de conservation

Les dents sont ensuite conservées dans un milieu particulier pouvant être variable en pH, en température, en osmolarité et en durée d'immersion.

Les études recensées (tableau 13) utilisent du sang, du serum physiologique, de l'eau distillée, des mélanges 0,9 sérum physiologique / 0,1 thymol ou des chambres humides. Le pH et la température sont rarement contrôlés.

Certaines études [63, 82] passent également par une phase de stérilisation à 120 – 135 °C qui désorganise la structure collagènique de la dentine.

3.2.3 Préparation des spécimens

Les caractéristiques anatomiques des spécimens sont les paramètres les plus difficiles à contrôler. Elles proviennent de différentes catégories de facteurs :

_Choix des dents :

Mono ou pluriradiculées, courbure radiculaire, cause de l'extraction (lésion carieuse, parodontale, endodontique, fracture radiculaire…), âge du patient…

_Mensurations :

4 études [1,60, 74, 102] pratiquent un contrôle de la longueur des spécimens. Celle de Wu [117] va jusqu'à contrôler tous les volumes (longueur, épaisseur, diamètre, préparation canalaire) garantissant des volumes de dentine et de matériau constants pour tous les spécimens.

_Préparation canalaire :

Le traitement endodontique préalable réalisé pour simuler les conditions cliniques est variable d'une étude à l'autre.

La technique de parage canalaire est manuelle ou mécanique avec néanmoins l'effort d'obtenir des préparations normalisées. L'utilisation d'hypochlorite de sodium n'est pas constante.

Le mode d'obturation est le facteur qui présente le plus de variabilité. La gutta est le matériau employé dans toutes les études recensées mais certaines études recommandent de ne pas obturer le canal, d'autres de ne pas utiliser de ciment de scellement, afin que l'étanchéité qu'il procure n'interfère pas avec celle du matériau d'obturation *a retro*.

_Retropréparation :

La plupart des études emploie la technique de préparation ultrasonore par inserts calibrés.

_Conditions d'obturation :

L'influence de l'humidité varie selon les matériaux utilisés mais ce paramètre devrait être mieux détaillé dans les études et se rapprocher au mieux des conditions cliniques.

3.2.4 Milieu expérimental

Aucune étude présentée n'a recours à un vieillissement des échantillons par mécano ou thermocyclage.

La température expérimentale est de 37°C dans la moitié des études et ambiante dans les autres cas.

Dans ces études, le nombre de spécimens dans chaque échantillon varie de 11 à 33 et la durée expérimentale est comprise entre 3 jours et 1 an.

La multitude des facteurs incontrôlés perturbe certainement les résultats. Certaines études soulignent la nécessité de contrôler rigoureusement certains d'entre eux mais aucun consensus n'existe à l'heure actuelle. Nous ne connaissons pas l'influence relative de ces paramètres, mais nous pouvons conclure qu'une multitude de facteurs peuvent modifier les propriétés physico-chimiques de la dentine radiculaire. Or celle-ci conditionne les propriétés d'étanchéité des matériaux d'obturation et la diffusion des vecteurs utilisés dans les tests.

Il paraît utile malgré la complexité de la tâche de mieux cerner ces paramètres.

CONCLUSIONS

Nous observons une augmentation des taux de succès de la chirurgie endodontique depuis ces 10 dernières années. Les innovations technologiques avec notamment l'apparition des inserts ultrasonores chirurgicaux, les modifications des techniques chirurgicales avec une acuité visuelle plus fine, et une meilleure connaissance des paramètres du succès endodontique sont autant de facteurs à l'origine d'une amélioration dans ce domaine.

Le développement de nouveaux matériaux d'obturation peuvent également expliquer ce succès mais son niveau d'implication reste inconnu. L'étanchéité coronaire et l'étanchéité apicale semblent jouer un rôle important dans le succès à long terme d'une chirurgie endodontique. Cependant aucun matériau d'obturation *a retro* n'est capable de garantir une étanchéité totale à long terme. Le lien entre l'étanchéité apicale et la résolution d'une lésion apicale n'est pas établie de façon formelle. Le rôle de la résection apicale, du débridement et de la désinfection par préparation ultrasonore peut prévaloir sur l'importance du paramètre étanchéité.

Nous avons vu que la mesure de l'étanchéité était difficile et aboutissait à des résultats confus parfois contradictoires. Aucun protocole ne peut à l'heure actuelle reproduire le processus complexe qui mène à l'infection périapicale. Tous les protocoles présentent des inconvénients majeurs qui posent des problèmes d'interprétation.

Il semble nécessaire de pouvoir quantifier le degré d'étanchéité requis par des systèmes normalisés afin de s'éloigner de la simple démarche comparative employée dans les tests actuels. Définir l'étanchéité d'un biomatériau dentaire est un défit qui passe par la mise au point d'une unité de mesure de l'étanchéité à l'interface dent matériau. Ceci permettrait d'uniformiser les protocoles, d'avoir une approche meta-analytique et de fournir une référence aux laboratoires qui fabriquent ces matériaux.

La notion d'étanchéité est importante en chirurgie dentaire que ce soit en dentisterie adhésive, en endodontie orthograde ou en chirurgie endodontique. Des recherches sur les biomatériaux d'obturation *a retro* peuvent peut-être permettre d'éclaircir cette notion car l'uniformisation des préparations par inserts ultrasonores calibrés a fait prendre conscience de la nécessité de standardiser certains paramètres comme le volume dentinaire et le volume de matériau pour limiter les biais dus notamment à la perméabilité dentinaire. Elles pourraient donc peut-être avoir des répercutions dépassant le seul cadre de la chirurgie endodontique.

BIBLIOGRAPHIE

1. Adamo HL, Buruiana R, Schertzer L, Boylan RJ.
A comparison of MTA, Super-EBA, composite and amalgam as root-end filling materials using a bacterial microleakage model.
Int Endod J. 1999 May;32(3):197-203.

2. Alhadainy HA, Elsaed HY, Elbaghdady YM.
An electrochemical study of the sealing ability of different retrofilling materials.
J Endod. 1993 Oct;19(10):508-11.

3. Allen RK, Newton CW, Brown CE Jr.
A statistical analysis of surgical and nonsurgical endodontic retreatment cases.
J Endod. 1989 Jun;15(6):261-6.

4. Alves J, Walton R, Drake D.
Coronal leakage: endotoxin penetration from mixed bacterial communities through obturated, post-prepared root canals.
J Endod. 1998 Sep;24(9):587-91.

5. Aqrabawi J.
Sealing ability of amalgam, super EBA cement, and MTA when used as retrograde filling materials.
Br Dent J. 2000 Mar 11;188(5):266-8.

6. Andreasen JO, Munksgaard EC, Fredebo L, Rud J.
Periodontal tissue regeneration including cementogenesis adjacent to dentin-bonded retrograde composite fillings in humans.
J Endod. 1993 Mar;19(3):151-3.

7. Arens (Donald E)
Practical lessons in endodontic surgery
Quintessence Pub. Co : Chicago, 1998, 224 p

8. Asmussen E, Peutzfeldt A.
The influence of relative humidity on the effect of dentin bonding systems.
J Adhes Dent. 2001 Summer;3(2):123-7.

9. Bates CF, Carnes DL, del Rio CE.
Longitudinal sealing ability of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material.
J Endod. 1996 Nov;22(11):575-8.

10. Barkhordar RA, Pelzner RB, Stark MM.
Use of glass ionomers as retrofilling materials.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1989 Jun;67(6):734-9.

11. Bramwell JD, Hicks ML.
Sealing ability of four retrofilling techniques.
J Endod. 1986 Mar;12(3):95-100.

12. Bruce GR, McDonald NJ, Sydiskis RJ.
Cytotoxicity of retrofill materials.
J Endod. 1993 Jun;19(6):288-92.

13. Camus (Jean-Pierre)
Endodontie chirurgicale
Vélizy-Villacoublay : Éd. CdP, collection guide clinique, 1998 - 108 p

14. Carr GB, Bentkover SB.
Surgical endodontics
Pathways of the pulp. St Louis: CV Mosby Co; 1998 - p. 608.

15. Chailertvanitkul P., Saunders W. P., MacKenzie D., Weetman D.A.
An in vitro study of the coronal leakage of two root canal sealers using an obligate anaerobe microbial marker.
int endod j, 1996 29 (4), 249-255.

16. Chailertvanitkul P., Saunders W. P., MacKenzie D.
Coronal leakage of obturated root canals after long-term storage using a polymicrobial marker.
J Endod, 1997 23 (10), 610-613.

17. Chong BS, Pitt Ford TR, Watson TF.
The adaptation and sealing ability of light-cured glass ionomer retrograde root fillings.
Int Endod J. 1991 Sep;24(5):223-32.

18. Civjan S, Huget EF, Wolfhard G, Waddell LS.
Characterization of zinc oxide-eugenol cements reinforced with acrylic resin.
J Dent Res. 1972 Jan-Feb;51(1):107-14.

19. Cook DJ, Taylor PP.
Tissue reactions to improved zinc oxide-eugenol cements.
ASDC J Dent Child. 1973 May-Jun;40(3):199-207.

20. Dejou J, Sindres V, Camps J.
Influence of criteria on the results of in vitro evaluation of microleakage.
Dent Mater. 1996 Nov;12(6):342-9.

21. Delivanis PD, Chapman KA.
Comparison and reliability of techniques for measuring leakage and marginal penetration.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1982 Apr;53(4):410-6.

22. Derkson GD, Pashley DH, Derkson ME.
Microleakage measurement of selected restorative materials: a new in vitro method.
J Prosthet Dent. 1986 Oct;56(4):435-40.

23. Dorn SO, Gartner AH
Retrograde filling materials: a retrospective success-failure study of amalgam, EBA, and IRM.
J Endod. 1990 Aug;16(8):391-3.

24. Dwyer TG, Torabinejad M.
Radiographic and histologic evaluation of the effect of endotoxin on the periapical tissues of the cat.
J Endod. 1980 Jan;7(1):31-5.

25. Fabricius L, Dahlen G, Holm SE, Moller AJ.
Influence of combinations of oral bacteria on periapical tissues of monkeys.
Scand J Dent Res. 1982 Jun;90(3):200-6.

26. Ferrari M, Mannocci F, Vichi A, Cagidiaco MC, Mjor IA.
Bonding to root canal: structural characteristics of the substrate.
Am J Dent. 2000 Oct;13(5):255-60.

27. Fischer EJ, Arens DE, Miller CH.
Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as compared with zinc-free amalgam, intermediate restorative material, and Super-EBA as a root-end filling material.
J Endod. 1998 Mar;24(3):176-9.

28. Fraga RC, Siqueira Junior JF, de Uzeda M.
In vitro evaluation of antibacterial effects of photo-cured glass ionomer liners and dentin bonding agents during setting.
J Prosthet Dent. 1996 Nov;76(5):483-6.

29. Fogel HM, Peikoff MD.
Microleakage of root-end filling materials.
J Endod. 2001 Jul;27(7):456-8.

30. Frank AL, Glick DH, Patterson SS, Weine FS.
Long-term evaluation of surgically placed amalgam fillings.
J Endod. 1992 Aug;18(8):391-8.

31. Frank RJ, Antrim DD, Bakland LK.
Effect of retrograde cavity preparations on root apexes.
Endod Dent Traumatol. 1996 Apr;12(2):100-3.

32. Garthner AH, Dorm SO.
Advances in endodontic surgery.
Dent Clin North Am, 1992 Apr;36(2):357-78.

33. Gilheany PA, Figdor D, Tyas MJ.
Apical dentin permeability and microleakage associated with root end resection and retrograde filling.
J Endod. 1994 Jan;20(1):22-6.

34. Gish SP, Drake DR, Walton RE, Wilcox L.
Coronal leakage: bacterial penetration through obturated canals following post preparation.
J Am Dent Assoc. 1994 Oct;125(10):1369-72.

35. Goldman M, Simmonds S, Rush R.
The usefulness of dye-penetration studies reexamined.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1989 Mar;67(3):327-32.

36. Gorman MC, Steiman HR, Gartner AH
Scanning electron microscopic evaluation of root-end preparations.
J Endod. 1995 Mar;21(3):113-7.

37. Greer BD, West LA, Liewehr FR, Pashley DH.
Sealing ability of Dyract, Geristore, IRM, and super-EBA as root-end filling materials.
J Endod. 2001 Jul;27(7):441-3.

38. Grung B, Molven O, Halse A.
Periapical surgery in a Norwegian county hospital: follow-up findings of 477 teeth.
J Endod. 1990 Sep;16(9):411-7.

39. Gutierrez JH, Aguayo P.
Apical foraminal openings in human teeth. Number and location.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1995 Jun;79(6):769-77.

40. Gutmann JL.
Principles of endodontic surgery for the general practitioner.
Dent Clin North Am. 1984 Oct;28(4):895-908.

41. Harrison JW, Johnson SA.
Excisional wound healing following the use of IRM as a root-end filling material.
J Endod. 1997 Jan;23(1):19-27.

42. Hilton TJ.
Can modern restorative procedures and materials reliably seal cavities? In vitro investigations. Part 1.
Am J Dent. 2002 Jun;15(3):198-210.

43. Holt GM, Dumsha TC.
Leakage of amalgam, composite, and Super-EBA, compared with a new retrofill material: bone cement.
J Endod. 2000 Jan;26(1):29-31.

44. Isermann GT, Kaminski EJ.
Pulpal response to bacteria in the dog.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1979 Oct;48(4):353-7.

45. Jacobson SM, von Fraunhofer JA.
The investigation of microleakage in root canal therapy. An electrochemical technique.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1976 Dec;42(6):817-23.

46. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ.
The effects of surgical exposures of dental pulps in germfree and conventional laboratory rats.
J South Calif Dent Assoc. 1966 Sep;34(9):449-51.

47. Kaplan SD, Tanzilli JP, Raphael D, Moodnik RM.
A comparison of the marginal leakage of retrograde techniques.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1982 Nov;54(5):583-5.

48. Kersten HW, Moorer WR.
Particles and molecules in endodontic leakage.
Int Endod J. 1989 May;22(3):118-24.

49. Khayat A., Lee S. J., Torabinejad M.
Human saliva penetration of coronally unsealed obturated root canals.
J Endod, 1993 19 (9), 458-461..

50. Kim (Syngkuk)
Color atlas of microsurgery in endodontics
Philadelphia : WB. Saunders company, 2001 - 172 p

51. King KT, Anderson RW, Pashley DH, Pantera EA Jr.
Longitudinal evaluation of the seal of endodontic retrofillings.
J Endod. 1990 Jul;16(7):307-10.

52. Koh ET, McDonald F, Pitt Ford TR, Torabinejad M.
Cellular response to Mineral Trioxide Aggregate.
J Endod. 1998 Aug;24(8):543-7.

53. Lee RR, Ogiso M, Watanabe A, Ishihara K.
Examination of hydroxyapatite filled 4-META/MMA-TBB adhesive bone cement in vitro and in vivo environment.
J Biomed Mater Res. 1997 Spring;38(1):11-6.

54. Lloyd A, Jaunberzins A, Dummer PM, Bryant S.
Root-end cavity preparation using the MicroMega Sonic Retro-prep Tip. SEM analysis.
Int Endod J. 1996 Sep;29(5):295-301.

55. Lyroudia K, Pantelidou O, Mikrogeorgis G, Nikopoulos N, Pitas I.
Three-dimensional reconstruction: a new method for the evaluation of apical microleakage.
J Endod. 2000 Jan;26(1):36-8.

56. Maddalone M, Gagliani M.
Periapical endodontic surgery: a 3-year follow-up study.
Int Endod J. 2003 Mar;36(3):193-8.

57. Madison S, Swanson K
An evaluation of coronal microleakage in endodontically treated teeth. Part I. Time periods.
J Endod. 1987 Feb;13(2):56-9

58. Madison S, Swanson K
Chiles SA.An evaluation of coronal microleakage in endodontically treated teeth. Part II. Sealer types.
J Endod. 1987 Mar;13(3):109-12.

59. Madison S, Wilcox LR.
An evaluation of coronal microleakage in endodontically treated teeth. Part III. In vivo study.
J Endod. 1988 Sep;14(9):455-8.

60. Martell B, Chandler NP.
Electrical and dye leakage comparison of three root-end restorative materials.
Quintessence Int. 2002 Jan;33(1):30-4.

61. Mehlhaff DS, Marshall JG, Baumgartner JC.
Comparison of ultrasonic and high-speed-bur root-end preparations using bilaterally matched teeth.
J Endod. 1997 Jul;23(7):448-52.

62. Mitchell PJ, Pitt Ford TR, Torabinejad M, McDonald F.
Osteoblast biocompatibility of mineral trioxide aggregate.
Biomaterials. 1999 Jan;20(2):167-73.

63. O'Connor RP, Hutter JW, Roahen JO.
Leakage of amalgam and Super-EBA root-end fillings using two preparation techniques and surgical microscopy.
J Endod. 1995 Feb;21(2):74-8.

64. Oliver CM, Abbott PV.
Entrapped air and its effects on dye penetration of voids.
Endod Dent Traumatol. 1991 Jun;7(3):135-8.

65. Olson AK, MacPherson MG, Hartwell GR, Weller RN, Kulild JC.
An in vitro evaluation of injectable thermoplasticized gutta-percha, glass ionomer, and amalgam when used as retrofilling materials.
J Endod. 1990 Aug;16(8):361-4.

66. Oynick J, Oynick T
A study of a new material for retrograde fillings.
J Endod. 1978 Jul;4(7):203-6.

67. Paterson RC.
Bacterial contamination and the exposed pulp.
Br Dent J. 1976 Apr;140(7):231-6.

68. Pitt Ford TR, Andreasen JO, Dorn SO, Kariyawasam SP.
Effect of various zinc oxide materials as root-end fillings on healing after replantation.
Int Endod J. 1995 Nov;28(6):273-8.

69. Pitts DL, Williams BL, Morton TH Jr.
Investigation of the role of endotoxin in periapical inflammation.
J Endod. 1982 Jan;8(1):10-8.

70. Pommel L, Jacquot B, Camps J.
Lack of correlation among three methods for evaluation of apical leakage.
J Endod. 2001 May;27(5):347-50.

71. Prakashchandra, Reddy VV.
Configuration of root canals in permanent mandibular first molars--an in vitro study.
J Indian Soc Pedod Prev Dent. 1996 Mar;14(1):14-6.

72. Rapp EL, Brown CE Jr, Newton CW
An analysis of success and failure of apicoectomies.
J Endod. 1991 Oct;17(10):508-12.

73. Raskin A, D'Hoore W, Gonthier S, Degrange M, Dejou J.
Reliability of in vitro microleakage tests: a literature review.
J Adhes Dent. 2001 Winter;3(4):295-308.

74. Roy CO, Jeansonne BG, Gerrets TF.
Effect of an acid environment on leakage of root-end filling materials.
J Endod. 2001 Jan;27(1):7-8.

75. Rubinstein R, Kim S.
Short term observation of the results of endodontic surgery with the use of a surgical operation microscope and super EBA as root-end filling material.
J Endod 1999;25:43-48.

76. Rubinstein RA, Kim S.
Long-term follow-up of cases considered healed one year after apical microsurgery.
J Endod. 2002 May;28(5):378-83.

77. Rud J, Andreasen JO, Jensen JE.
A follow-up study of 1,000 cases treated by endodontic surgery.
Int J Oral Surg. 1972;1(4):215-28.

78. Rud J, Rud V, Munksgaard EC.
Periapical healing of mandibular molars after root-end sealing with dentine-bonded composite.
Int Endod J. 2001 Jun;34(4):285-92.

79. Sakai T, Morita S, Shinomiya K, Watanabe A, Nakabayashi N, Ishihara K.
Prevention of fibrous layer formation between bone and adhesive bone cement: in vivo evaluation of bone impregnation with 4-META/MMA-TBB cement.
J Biomed Mater Res. 2000 Oct;52(1):24-9.

80. Satoh K, Ida Y, Sakagami H, Tanaka T, Fujisawa S
Effect of antioxidants on radical intensity and cytotoxic activity of eugenol.
Anticancer Res. 1998 May-Jun;18(3A):1549-52.

81. Saunders WP, Saunders EM, Gutmann JL.
Ultrasonic root-end preparation, Part 2. Microleakage of EBA root-end fillings.
Int Endod J. 1994 Nov;27(6):325-9.

82. Scheerer
A comparative evaluation of three root-end filling materials: an in vitro leakage study using Prevotella nigrescens.
J Endod. 2001 Jan;27(1):40-2.SQ, Steiman HR, Cohen J.

83. Schilder H.
Cleaning and shaping the root canal.
Dent Clin North Am. 1974 Apr;18(2):269-96.

84. Seltzer S, Bender IB, Smith J, Freedman I
Nazimov H.Endodontic failures--an analysis based on clinical, roentgenographic, and histologic findings. II.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1967 Apr;23(4):517-30.

85. Shaw CS, BeGole EA, Jacobsen EL.
Apical sealing efficacy of two reverse filling techniques versus cold-burnished Gutta-percha.
J Endod. 1989 Aug;15(8):350-4.

86. . Siqueira JF Jr, Rocas IN, Abad EC, Castro AJ, Gahyva SM, Favieri A.
Ability of three root-end filling materials to prevent bacterial leakage.
J Endod. 2001 Nov;27(11):673-5.

87. Sjogren U, Hagglund B, Sundqvist G, Wing K
Factors affecting the long-term results of endodontic treatment.
J Endod. 1990 Oct;16(10):498-504.

88. Spradling PM, Senia ES.
The relative sealing ability of paste-type filling materials.
J Endod. 1982 Dec;8(12):543-9.

89. Sundqvist G, Figdor D, Persson S, Sjogren U.
Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1998 Jan;85(1):86-93.

90. Sutimuntanakul S, Worayoskowit W, Mangkornkarn C.
Retrograde seal in ultrasonically prepared canals.
J Endod. 2000 Aug;26(8):444-6.

91. Swartz DB, Skidmore AE, Griffin JA Jr
Twenty years of endodontic success and failure.
J Endod. 1983 May;9(5):198-202.

92. Tagger M, Tamse A, Katz A, Tagger E.
An improved method of three-dimensional study of apical leakage.
Quintessence Int. 1983 Oct;14(10):981-98.

93. Testori T, Capelli M, Milani S, Weinstein RL.
Success and failure in periradicular surgery: a longitudinal retrospective analysis.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1999 Apr;87(4):493-8.

94. Tidmarsh BG, Arrowsmith MG.
Dentinal tubules at the root ends of apicected teeth: a scanning electron microscopic study.
Int Endod J. 1989 Jul;22(4):184-9.

95. Torabinejad M , Higa RK, McKendry DJ, McMillan PJ.
The effect of storage time on the degree of dye leakage of root-end filling materials.
Int Endod J. 1994 Sep;27(5):252-6.

96. Torabinejad M, Higa RK, McKendry DJ, Pitt Ford TR.
Dye leakage of four root end filling materials: effects of blood contamination.
J Endod. 1994 Apr;20(4):159-63.

97. Torabinejad M, Ford TR, Abedi HR, Kariyawasam SP, Tang HM.
Tissue reaction to implanted root-end filling materials in the tibia and mandible of guinea pigs.
J Endod. 1998 Jul;24(7):468-71.

98. Torabinejad M, Hong CU, McDonald F, Pitt Ford TR.
Physical and chemical properties of a new root-end filling material.
J Endod. 1995 Jul;21(7):349-53.

99. Torabinejad M, Rastegar AF, Kettering JD, Pitt Ford TR.
Bacterial leakage of mineral trioxide aggregate as a root-end filling material.
J Endod. 1995 Mar;21(3):109-12.

100.Torabinejad M, Smith PW, Kettering JD, Pitt Ford TR
Comparative investigation of marginal adaptation of mineral trioxide aggregate and other commonly used root-end filling materials.
J Endod. 1995 Jun;21(6):295-9.

101.Torabinejad M, Pitt Ford TR, McKendry DJ, Abedi HR, Miller DA, Kariyawasam SP.
Histologic assessment of mineral trioxide aggregate as a root-end filling in monkeys.
J Endod. 1997 Apr;23(4):225-8.

102.Torabinejad M, Tang HM, Kettering JD.
Leakage evaluation of root end filling materials using endotoxin.
J Endod. 2002 Jan;28(1):5-7.

103.Torabinejad M, Ung B, Kettering JD.
In vitro bacterial penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth.
J Endod. 1990 Dec;16(12):566-9.

104.Tronstad L, Asbjornsen K, Doving L, Pedersen I, Eriksen HM.
Influence of coronal restorations on the periapical health of endodontically treated teeth.
Endod Dent Traumatol 2000 Oct;16(5):218-21

105.Trope M, Ray HA,.
Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration.
Int Endod J 1995 Jan;28(1):12-8

106.Trope M, Chow E, Nissan R.
In vitro endotoxin penetration of coronally unsealed endodontically treated teeth.
Endod Dent Traumatol. 1995 Apr;11(2):90-4.

107.Trowbridge HO, Kim S Bergenholtz G, Mjor IA, Cotton WR, Hanks CT, , Torneck CD,
The biology of dentin and pulp. Consensus report.
J Dent Res. 1985 Apr;64 Spec No:631-3

108.Tuggle ST, Anderson RW, Pantera EA Jr, Neaverth EJ.
A dye penetration study of retrofilling materials.
J Endod. 1989 Mar;15(3):122-4.

109.Vertucci FJ.
Root canal anatomy of the human permanent teeth.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1984 Nov;58(5):589-99.

110.Vertucci FJ, Beatty RG.
Apical leakage associated with retrofilling techniques: a dye study.
J Endod. 1986 Aug;12(8):331-6.

111.Vignaroli PA, Anderson RW, Pashley DH.
Longitudinal evaluation of the microleakage of dentin bonding agents used to seal resected root apices.
J Endod. 1995 Oct;21(10):509-12.

112.Von Arx T, Gerber C, Hardt N.
Periradicular surgery of molars: a prospective clinical study with a one-year follow-up.
Int Endod J. 2001 Oct;34(7):520-5.

113.Walton RE, Ardjmand K.
Histological evaluation of the presence of bacteria in induced periapical lesions in monkeys.
J Endod. 1992 May;18(5):216-27.

114.Waplington M, Lumley PJ, Walmsley AD.
Incidence of root face alteration after ultrasonic retrograde cavity preparation.
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1997 Mar;83(3):387-92.

115.Weller RN, Niemczyk SP, Kim S.
Incidence and position of the canal isthmus. Part 1. Mesiobuccal root of the maxillary first molar.
J Endod. 1995 Jul;21(7):380-3.

116.Wimonchit S, Timpawat S, Vongsavan N.
A comparison of techniques for assessment of coronal dye leakage.
J Endod. 2002 Jan;28(1):1-4.

117.Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR.
Long-term seal provided by some root-end filling materials.
J Endod. 1998 Aug;24(8):557-60.

118.Wu MK, de Gee AJ, Wesselink PR.
Effect of tubule orientation in the cavity wall on the seal of dental filling materials: an in vitro study.
Int Endod J. 1998 Sep;31(5):326-32.

119.Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR, Moorer WR.
Fluid transport and bacterial penetration along root canal fillings.
Int Endod J. 1993 Jul;26(4):203-8.

120.Wu MK, De Gee AJ, Wesselink PR.
Fluid transport and dye penetration along root canal fillings.
Int Endod J. 1994 Sep;27(5):233-8.

121.Wu MK, Kontakiotis EG, Wesselink PR.
Decoloration of 1% methylene blue solution in contact with dental filling materials.
J Dent. 1998 Sep;26(7):585-9.

122.Wuchenich G, Meadows D, Torabinejad M.
A comparison between two root end preparation techniques in human cadavers.
J Endod. 1994 Jun;20(6):279-82.

123.Yamasaki M, Nakane A, Kumazawa M, Hashioka K, Horiba N, Nakamura H.
Endotoxin and gram-negative bacteria in the rat periapical lesions.
J Endod. 1992 Oct;18(10):501-4.

124.Yoshimura M, Marshall FJ, Tinkle JS.
In vitro quantification of the apical sealing ability of retrograde amalgam fillings.
J Endod. 1990 Jan;16(1):5-12.

125.Zhu Q, Safati KE, Spanberg SW.
Cytotoxic evaluation of root end filling material in cultures of human osteoblast-like cells and periodontal ligament cells.
J Endod. 1999 ;6 :410-12

Vu, le président du jury
Professeur Michel DEGRANGE

Vu, le Doyen de la faculté de chirurgie dentaire
de l'université René Descartes
Professeur Bernard PELLAT

Vu, le président de l'université René Descartes
de Paris V
Professeur Pierre DAUMARD
Pour le président et par délégation
Le Doyen Bernard PELLAT