



HAL
open science

Efficacité comparée de 3 techniques d'activation laser des solutions d'irrigation endodontiques

Samantha Piétri

► **To cite this version:**

Samantha Piétri. Efficacité comparée de 3 techniques d'activation laser des solutions d'irrigation endodontiques. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-03598025

HAL Id: dumas-03598025

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03598025>

Submitted on 4 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ NICE-SOPHIA ANTIPOLIS
FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE
24 Avenue des Diables Bleus,
06357 Nice Cedex 04

EFFICACITÉ COMPARÉE DE 3 TECHNIQUES D'ACTIVATION LASER DES SOLUTIONS D'IRRIGATION ENDODONTIQUES

Année 2018

Thèse n° 42 57 18 17

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement devant
la Faculté de Chirurgie-Dentaire de Nice

Le **Lundi 23 Juillet 2018** par

Madame Samantha PIETRI

Née le 11 Février 1992 à Saint-Raphaël

Pour obtenir le grade de :

DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

(Diplôme d'État)

EXAMINATEURS :

Monsieur le Professeur
Madame le Docteur
Madame le Docteur
Madame le Docteur
Monsieur le Docteur

Étienne MEDIONI
Nathalie BRULAT-BOUCHARD
Élodie EHRMANN
Catherine RICCI
Mathieu DURAND

Président du jury
Directeur de thèse
Assesseur
Assesseur
Invité

CORPS ENSEIGNANT

56^{ème} section : DEVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PREVENTION

Sous-section 01 : ODONTOLOGIE PEDIATRIQUE ET ORTHOPEDIE DENTO-FACIALE

Professeur des Universités : Mme MANIERE-EZVAN Armelle

Professeur des Universités : Mme MULLER-BOLLA Michèle

Maître de Conférences des Universités : Mme JOSEPH Clara

Assistant Hospitalier Universitaire : M. BUSSON Floriant

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme PIERRE Audrey

Assistante Associée-Praticien Associé : Mme OUEISS Arlette

Sous-section 02 : PREVENTION, EPIDEMIOLOGIE, ECONOMIE DE LA SANTE, ODONTOLOGIE LEGALE

Professeur des Universités : Mme LUPI-PEGURIER Laurence

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme SOSTHE Anne Laure

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme BORSA Leslie

57^{ème} section : CHIRURGIE ORALE ; PARODONTOLOGIE ; BIOLOGIE ORALE

Sous-section 01 : CHIRURGIE ORALE ; PARODONTOLOGIE ; BIOLOGIE ORALE

Professeur des Universités : Mme PRECHEUR-SABLAYROLLES Isabelle

Professeur Associé des Universités : Mme MERIGO Elisabetta

Maître de Conférences des Universités : M. COCHAIS Patrice

Maître de Conférences des Universités : Mme DRIDI Sophie Myriam

Maître de Conférences des Universités : Mme RAYBAUD Hélène

Maître de Conférences des Universités : M. SAVOLDELLI Charles

Maître de Conférences des Universités : Mme VINCENT-BUGNAS Séverine

Maître de Conférences des Universités : Mme VOHA Christine

Assistant Hospitalier Universitaire : M. BORIE Gwenaél

Assistant Hospitalier Universitaire : M. CHARBIT Mathieu

58^{ème} section : REHABILITATION ORALE

Sous-section 01 : REHABILITATION ORALE

Professeur des Universités : Mme BERTRAND Marie-France

Professeur des Universités : M. BOLLA Marc

Professeur des Universités : Mme LASSAUZAY Claire

Professeur des Universités : M. MAHLER Patrick

Professeur des Universités : M. MEDIONI Etienne

Professeur Emérite : M. ROCCA Jean-Paul

Maître de Conférences des Universités : M. ALLARD Yves

Maître de Conférences des Universités : Mme BRULAT-BOUCHARD Nathalie

Maître de Conférences Associé des Universités : M. CEINOS Romain

Maître de Conférences des Universités : Mme EHRMANN Elodie

Maître de Conférences des Universités : M. LAPLANCHE Olivier

Maître de Conférences des Universités : M. LEFORESTIER Eric

Maître de Conférences des Universités : Mme POUYSSEGUR-ROUGIER Valérie

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme AZAN Cindy

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme CERETTI Léonor

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme DEMARTY Laure

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme DUVERNEUIL Laura

Assistant Hospitalier Universitaire : M. GANDJIZADEH GHOUCHANI Mir-Payam

Assistant Hospitalier Universitaire : M. MORKOWSKI-GEMMI Thomas

Assistant Hospitalier Universitaire : M. PARNOT Maximilien

Assistant Hospitalier Universitaire : Mme PETITTI-MASSIERA Marine

REMERCIEMENTS

Au Président du Jury,

Monsieur le Professeur Étienne MEDIONI,

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Professeur des Universités – Praticien Hospitalier,
Sous-section Odontologie Conservatrice – Endodontie
Chef du Pôle d’Odontologie du C.H.U de Nice

Vous m’avez fait l’honneur de présider ce jury de thèse et je vous exprime ici toute ma gratitude ainsi que mon respect pour votre expertise dans le domaine de l’endodontie.

Je vous suis aussi reconnaissante pour votre enseignement d’excellence tout au long de mon cursus.

Vous avez consacré énormément de temps à la qualité de nos études. Veuillez trouver ici le témoignage de mon profond respect et l’expression de tous mes remerciements.

Votre investissement et votre disponibilité ont été indispensables à l’aboutissement de ce travail. Toutes les heures passées sur ces travaux de recherche étaient très enrichissantes.

Je vous remercie enfin pour votre contribution personnelle dans mon travail de thèse et pour avoir su suscité ma curiosité et me motiver à apprécier l’immense intérêt et les perspectives de recherches qui me passionnent aujourd’hui.

À ma Directrice de Thèse,

Madame le Docteur Nathalie BRULAT-BOUCHARD,

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Maitre de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier,
Sous-section Odontologie Conservatrice – Endodontie

Je vous remercie d'avoir accepté de diriger ce travail.

Vous avez détecté chez moi, dès ma 4^{ème} année, un possible intérêt pour l'endodontie, auquel j'ai tout de suite adhéré. Vous m'avez fait découvrir l'endodontie et orienté à mes débuts. Je vous suis reconnaissante pour la confiance que vous m'avez accordée en me présentant le Docteur Catherine RICCI.

Votre gentillesse et l'application que vous avez employée pour me faire participer en clinique comme à la faculté, a éveillé ma curiosité. Je vous remercie pour vos encouragements tout au long de ces années.

Je peux dire que vous avez été à l'origine de mon orientation de carrière et je vous en suis très reconnaissante. Soyez assuré de ma sincère amitié.

Aux membres du Jury,

Madame le Docteur Élodie EHRMANN,

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Maitre de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier,
Sous-section Réhabilitation Orale, Fonction - Dysfonction

Je vous remercie d'avoir accepté si spontanément de juger ce travail.

Même si l'occlusodontie ne m'a pas permis de passer autant de temps avec vous qu'avec les autres membres du Jury, sachez que votre bienveillance, votre sympathie, le soutien et l'intérêt que vous m'avez témoigné aux moments clés et tout au long de mes études m'ont énormément touché.

Veillez trouver ici le témoignage de ma reconnaissance et de mes chaleureux remerciements.

Madame le Docteur Catherine RICCI,

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Praticien Hospitalier
Activité libérale limitée à l'Endodontie

L'excellence et la rigueur que vous recherchez et dont vous faites preuve dans votre pratique quotidienne font de vous un exemple à suivre pour moi.

La richesse de l'enseignement que vous m'avez apporté tout au long de ses années à vos côtés est inestimable.

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

Je vous remercie pour la confiance que vous m'avez accordée en m'ouvrant les portes des congrès d'endodontie et en me faisant récemment l'honneur de travailler avec vous.

Merci aussi de m'avoir soutenu dans les moments importants de mes études et de ma vie professionnelle et personnelle, en me faisant profiter de votre expérience et de votre vision du monde de l'endodontie.

Votre caractère a été pour moi une source d'énergie et de volonté pour ancrer ma voie dans les pas de la pionnière que vous êtes dans le domaine.

Enfin, veuillez recevoir ici l'expression de toute l'affection que je vous porte.

Monsieur le Docteur Mathieu DURAND,

Docteur en Chirurgie Dentaire,
Attaché des Hospices Civiles de Lyon
Activité libérale limitée à l'Endodontie

C'est avec un grand plaisir que je vous compte parmi les membres de ce jury.

Votre présence en ce jour ci symbolique me tenait à cœur car j'admire le pédagogue, le clinicien et le chef d'équipe que vous êtes. Entrepreneur en perpétuelle recherche d'amélioration et d'optimisation, vous m'avez toujours encouragé à devenir la personne que je souhaite être.

Votre soutien en toute circonstance se vérifie encore aujourd'hui en me faisant l'honneur et le plaisir de venir de Lyon.

Veillez être assuré de ma profonde amitié et trouver ici le témoignage de toute mon estime.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

I.	INTRODUCTION	10
II.	RAPPELS SUR L'IRRIGATION : LES GOLD STANDARDS	11
A.	LA SOLUTION D'IRRIGATION IDEALE	11
B.	LES SOLUTIONS D'IRRIGATION ACTUELLES ET EFFICACES	11
1.	HYPOCHLORITE DE SODIUM – NaOCl	11
2.	ACIDE ETHYLENE DIAMINE TETRA-ACETIQUE : EDTA	17
3.	CONCLUSION :	18
C.	REVUE DE LITTERATURE SUR LES MOYENS DE DISTRIBUTION	19
1.	L'IRRIGATION A PRESSION POSITIVE (SERINGUE + AIGUILLE)	20
2.	L'IRRIGATION A PRESSION NEGATIVE : LE SYSTEME ENDOVAC® (SYBRON ENDO™)	22
D.	REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES MOYENS D'ACTIVATION	24
1.	ACTIVATION MANUELLE : TECHNIQUE DU MAITRE CONE	24
2.	ACTIVATION THERMIQUE	24
3.	ACTIVATION SONIQUE : ENDOACTIVATOR® (DENTSPLY MAILLEFER)	25
4.	L'IRRIGATION PASSIVE ULTRASONORE : IRRISAFE™ (SATELEC)	26
5.	ACTIVATION LASER	27
E.	REVUE DE LITTERATURE SUR LA CLINIQUE DE L'IRRIGATION : RECOMMANDATIONS HAS	28
III.	LES DIFFERENTS LASERS EN ENDODONTIE	29
A.	SPECTRE D'EMISSION DES LASERS	30
B.	EFFET DE CAVITATION (DEFINITION)	31
C.	LES DIFFERENTS LASERS	32
1.	LASER DIODE	32
2.	LASER Nd:YAG	32
3.	LASER Er:YAG ET Er;Cr:YSGG	32
D.	EFFETS INDESIRABLES DES LASERS Er : YAG EN ENDODONTIE	34
IV.	ACTIVATION LASER DES SOLUTIONS D'IRRIGATION	35
A.	PDT : PHOTODYNAMIC THERAPY	35
B.	LAI : LASER ACTIVATED IRRIGATION	35
C.	PIPS : PHOTON INDUCED PHOTOACOUSTIC STREAMING	37
D.	SWEEPS : SHOCK WAVE ENHANCED EMISSION PHOTOACOUSTIC STREAMING	40
E.	TABLEAU RECAPITULATIF DES DIFFERENTES TECHNIQUES D'ACTIVATION LASER DES SOLUTIONS D'IRRIGATION	41
V.	BUT DE L'ETUDE	42
VI.	MATERIEL ET METHODES	42
A.	SELECTION DES DENTS	42
B.	SYSTEME DE MISE EN FORME : TF ADAPTIVE™ (KAVO-KERR® FRANCE)	42
C.	PROTOCOLE DE MISE EN FORME CANALAIRE	45
D.	PROTOCOLE D'IRRIGATION FINALE SELON LES GROUPES (PHOTOACOUSTIQUE SYNERON® – PIPS FOTONA® – SWEEPS FOTONA® – TEMOIN+ ENDOACTIVATOR® – TEMOIN- SERINGUE)	47

E.	PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR LEUR EXAMEN AU MEB	52
F.	METHODE D'OBSERVATION : LE MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE	53
G.	EVALUATION DE LA PROPRETE DES SURFACES	53
H.	ANALYSE DES RESULTATS	55
I.	L'ANALYSE STATISTIQUE	55
VII.	RESULTATS	56
VIII.	DISCUSSION	68
A.	DISCUSSION DES RESULTATS	68
B.	COMPARAISON DES RESULTATS OBSERVES AVEC CEUX DE LA LITTERATURE	68
1.	EFFICACITE COMPAREE DES 3 LASERS ER : YAG : EXPLICATIONS DES RESULTATS ET DE LEURS VARIATIONS	68
2.	VARIATIONS ENTRE LES EVALUATEURS	69
C.	DISCUSSION DU PROTOCOLE	69
1.	CHOIX DES DENTS	69
2.	CHOIX DES NiTi ET DU SYSTEME TF ADAPTIVE™	70
3.	CHOIX DES LASERS	70
4.	OBSERVATION AU MEB : CHOIX DU GROSSISSEMENT ET CHOIX DES ZONES D'OBSERVATION	71
5.	CHOIX DE L'OPERATEUR	72
6.	CHOIX DE LA SEQUENCE D'IRRIGATION	72
7.	CHOIX DE LA METHODE DES SCORES	72
IX.	APPLICATION CLINIQUE, INTERET ET FIABILITE	73
X.	CONCLUSION	74
XI.	BIBLIOGRAPHIE	75
XII.	SERMENT D'HIPPOCRATE	81
XIII.	APPROBATION	82

I. INTRODUCTION

Les objectifs premiers d'un traitement endodontique sont la mise en forme, la désinfection et l'obturation du réseau canalaire. L'instrumentation manuelle et mécanisée va permettre cette mise en forme nécessaire à la désinfection et à l'obturation mais également générer une quantité importante de débris organiques et minéraux, formant la **boue dentinaire**, qui va colmater et obturer les tubuli dentinaires et s'accumuler dans les complexités anatomiques (l'apex, les isthmes, les canaux latéraux ...).

La couche de boue dentinaire a habituellement une épaisseur de 1 à 5 μm (1). Elle se compose de tissus organiques (résidus pulpaux et nécrotiques, de cellules et de microorganismes) et de débris dentinaires minéraux. (2)

Les boues dentinaires peuvent empêcher les solutions d'irrigations d'atteindre toute la **complexité de l'anatomie canalaire**, et peuvent compromettre l'étanchéité de l'obturation et la pénétration des matériaux d'obturation endodontiques dans les tubuli.

Cette boue dentinaire est habituellement éliminée par une combinaison de deux solutions d'irrigation : l'hypochlorite de sodium (NaOCl) et l'EDTA. NaOCl dissout la partie organique de la boue dentinaire, tandis que l'EDTA est censée agir sur la partie inorganique. Cependant, l'irrigation combinant NaOCl et EDTA n'a qu'une faible efficacité sur l'élimination de la boue dentinaire du tiers apical, bien qu'elle élimine efficacement cet enduit au niveau du tiers coronaire et moyen.

La lime de perméabilité permet d'amener la solution d'irrigation au niveau apical, de perméabiliser l'apex et d'éviter la formation d'un bouchon apical lors de la mise en forme mais elle ne suffit pas à nettoyer cette zone, ni à éliminer l'interposition de bulles de gaz à l'origine de l'effet Vapor Lock. (3)

Plusieurs moyens d'activation des solutions d'irrigation ont été décrits pour améliorer l'élimination de la boue dentinaire, tel que l'irrigation passive ultrasonique (PUI), l'activation sonore (EndoActivator®), ou l'irrigation à pression négative (Système EndoVac®). Toutefois, aucune de ces techniques ne permettent l'élimination totale des boues dentinaires au tiers apical. D'autant plus dans les canaux ayant une courbure prononcée ou avec une anatomie canalaire complexe. (4)

Les lasers ont été proposés comme adjuvant aux protocoles chimio-mécaniques conventionnels d'irrigation pour améliorer le débridement et la désinfection. (5) Les **lasers Er : YAG** permettraient d'atteindre une plus grande partie de la complexité de l'anatomie canalaire habituellement inaccessible lors de la désinfection (isthmes, canaux latéraux et accessoires ...). (6)(7)

L'objectif de cette étude est de comparer l'efficacité de 3 techniques d'activation laser Er:YAG des solutions d'irrigation : la PIPS de Fotona®, la SWEEPS de Fotona® et l'effet Photoacoustique de Syneron® par l'évaluation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de l'élimination des boues dentinaires au tiers apical de racines courbes.

II. RAPPELS SUR L'IRRIGATION : LES GOLD STANDARDS

A. La solution d'irrigation idéale

En 1941, Grossman décrit la solution d'irrigation idéale. Elle doit posséder certains critères :

- Etre **désinfectante, bactéricide, bactériostatique** sur un spectre le plus large possible ;
- Etre **solvant**, c'est à dire être capable de dissoudre et d'éliminer les tissus organiques (vivants ou nécrotiques) et les débris minéraux (boue dentinaire) ;
- Etre **lubrifiante** pour faciliter le travail des instruments ;
- Avoir une **tension de surface basse** pour permettre la pénétration des agents antimicrobiens dans la complexité de l'anatomie canalaire et les tubuli dentinaires ;
- Etre **biocompatible** et **sans toxicité** sur les tissus parodontaux ;
- Etre **blanchissante** et ne pas colorer les tissus dentaires.

D'autres propriétés sont également souhaitables : un faible coût, une facilité d'utilisation et de stockage ainsi que l'absence d'effets nuisibles sur l'étanchéité des matériaux d'obturation. (8)

Malheureusement, aucune solution d'irrigation ne possède actuellement tous ces critères. Les solutions d'irrigation utilisées sont soit des agents antimicrobiens, soit des agents chélatants. Le praticien devra donc utiliser au moins deux solutions d'irrigations différentes pour répondre à ces objectifs. Les plus couramment utilisées sont l'hypochlorite de sodium et EDTA.

B. Les solutions d'irrigation actuelles et efficaces

1. Hypochlorite de sodium – NaOCl

A ce jour, l'hypochlorite de sodium (NaOCl) est la solution d'irrigation de choix. Elle est utilisée dans des concentrations allant de 0,5% à 6% selon les pays. (9)

Elle présente les propriétés suivantes :

- Bactéricide, bactériostatique avec un large spectre antibactérien,
- Protéolytique,
- Inactivation des endotoxines, (10)
- Dissolution des tissus organiques (tissus pulpaire vivants et nécrotiques, et du collagène) (11)
- Peu coûteuse
- Lubrifiante (amplifie le pouvoir de coupe des instruments manuels et réduit les contraintes de torsion exercées sur les instruments NiTi)

a) *Mode d'action*

Au contact de l'eau, le NaOCl s'hydrolyse spontanément et se dissocie en hydroxyde de sodium NaOH (soude caustique) et en acide hypochloreux HOCl.

Puis l'hydroxyde de sodium se dissocie en ions sodium Na^+ et en ions hydroxyde OH^- ; l'acide hypochloreux se dissocie en ions hydrogènes H^+ et en ions hypochloreux OCl^- .

Cette réaction d'hydrolyse de l'hypochlorite de sodium est la suivante :



Figure 1 : Equation d'hydrolyse de l'hypochlorite de sodium, d'après Kandaswamy et coll. (12)

Les deux formes HOCl et OCl^- sont en équilibre et déterminent la concentration du produit exprimée en « Chlore actif » ou « Chlore disponible ». Le niveau de chlore disponible dépend du pH de la solution.

La forme OCl^- prédomine en pH basique. En pH acide, c'est la forme HOCl qui prédomine. En endodontie, l'hypochlorite de sodium utilisée a une valeur de pH comprise entre 6 et 7,5 pour optimiser la concentration de chlore disponible et par conséquent l'effet antibactérien. (13)

Les deux formes HOCl et OCl^- sont des agents oxydants extrêmement puissants, néanmoins à niveau de chlore égal, l'acide hypochloreux HOCl a une capacité oxydante et une action antibactérienne bien plus importante que l'ion hypochloreux OCl^- . Il est responsable des réactions d'oxydation et de chloramination sur les bactéries et les tissus.

A pH inférieur à 5, la forme HOCl diminue ce qui entraîne l'apparition de gaz Chlore Cl_2 à l'odeur particulièrement reconnaissable. Ce gaz est toxique et irritant pour les muqueuses oculaires et respiratoires. (13)

b) Mécanismes d'action

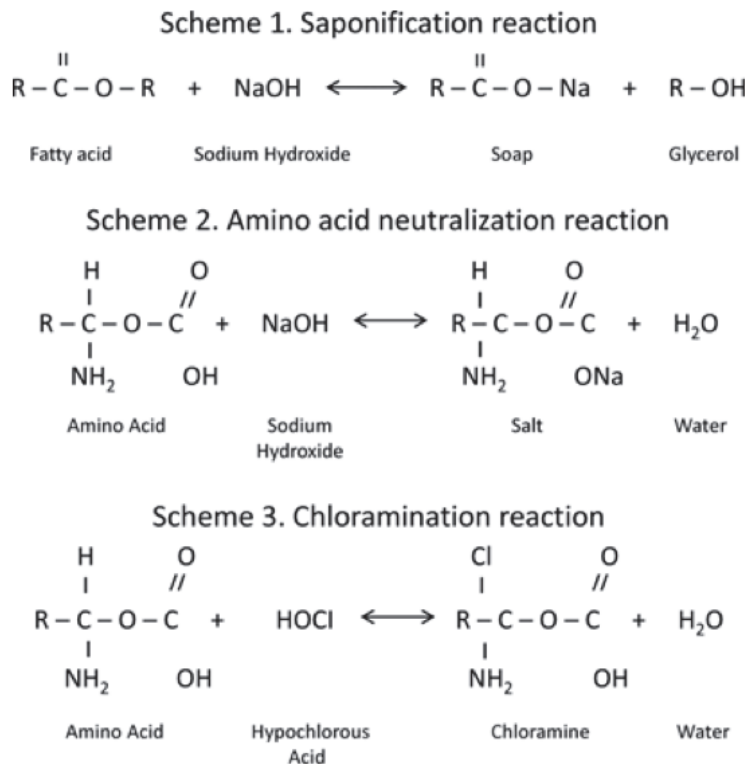


Figure 2 : Mécanismes d'action de NaOCl : un équilibre dynamique. (14)

➤ **Réaction de Saponification**

L'hypochlorite de sodium NaOCl agit comme un solvant des graisses et des matières organiques en dégradant les acides gras en savon (sels d'acides gras) et en alcool (glycérol). Cela a pour conséquence de réduire la tension superficielle de la solution, conduisant à une **action lubrifiante**.

➤ **Réaction de neutralisation des acides aminés**

La libération d'ions hydroxydes OH⁻ diminue le pH de la solution ce qui neutralise les acides aminés en eau et en sels. (9)(15)

La formation d'acide hypochloreux : quand le chlore se dissout dans l'eau et qu'il entre en contact avec la matière organique, il forme l'acide hypochloreux (HOCl). C'est un acide faible qui agit comme un oxydant. L'acide hypochloreux (HOCl) et les ions hypochloreux (OCl⁻) entraînent la dégradation et l'hydrolyse des acides aminés. (14)

➤ **Réaction de Chloramination : effet anti-bactérien**

L'hypochlorite de sodium agit également comme un solvant, libérant du chlore qui se combine aux groupes amino-protéiques (NH) pour former des chloramines : c'est la Réaction de Chloramination. Les chloramines entravent le métabolisme cellulaire ; le chlore est un puissant oxydant qui inhibe les principales enzymes bactériennes par une oxydation irréversible des groupes SH (groupe sulfhydrile). (14)

L'hypochlorite de sodium est une base forte (pH > 11). L'efficacité antimicrobienne de l'hypochlorite de sodium, basée sur son pH élevé (action des ions hydroxydes), est similaire au mécanisme d'action de l'hydroxyde de calcium. Le pH élevé interfère dans l'intégrité de la membrane cytoplasmique par une inhibition enzymatique irréversible, des altérations biosynthétiques dans le métabolisme cellulaire, et la dégradation des phospholipides observée dans la peroxydation lipidique. (14)

Lors du contact de l'hypochlorite de sodium avec les tissus organiques et les microorganismes, ces trois réactions (Saponification, neutralisation des acides aminés et Chloramination) entraînent la **dissolution tissulaire** et l'**effet antibactérien**. (12)

c) *Action antibactérienne :*

Le NaOCl combine une excellente action bactéricide non spécifique avec un large spectre (bactéries, spores, virus tels que le HIV ; hépatites A et B, levures, champignons tel que *Candida albicans*) à un pouvoir solvant sur la matière organique. (8) (13)

C'est pourquoi NaOCl est utilisé dès l'ouverture de la chambre pulpaire pour solubiliser les tissus organiques.

La présence de tissus inflammatoires et/ou nécrotiques consomme davantage de chlore, affaiblissant le pouvoir antibactérien de l'hypochlorite de sodium. Après 2 minutes d'action, la majorité du chlore est consommé. (16)

Le renouvellement régulier de la solution d'irrigation permet donc le maintien du pouvoir antibactérien. (13)

Plus la concentration de chlore est élevée, plus la solution est efficace, mais plus elle devient toxique également, par la formation de Cl₂. En France, la concentration habituellement utilisée est de 2,5 %, alors que les praticiens américains utilisent une solution à 5,25 %. Des études in vitro ont montré qu'une solution à 1% d'hypochlorite de sodium suffisait à dissoudre la totalité du tissu pulpaire. (8)

D'après l'étude de Zou et coll (2010), la profondeur de pénétration de l'hypochlorite de sodium varie de 77 µm à 300 µm, et dépend de la concentration, du temps, et de la température. Or les bactéries telles que *E. faecalis* colonisent les tubuli dentinaires à une profondeur de 150 µm à 1000 µm (1mm). (Figure 3) (16)(17)

Donc le potentiel à ce que certaines bactéries ne soient pas atteintes par l'action du NaOCl est forte, pour de simples raisons topologiques.

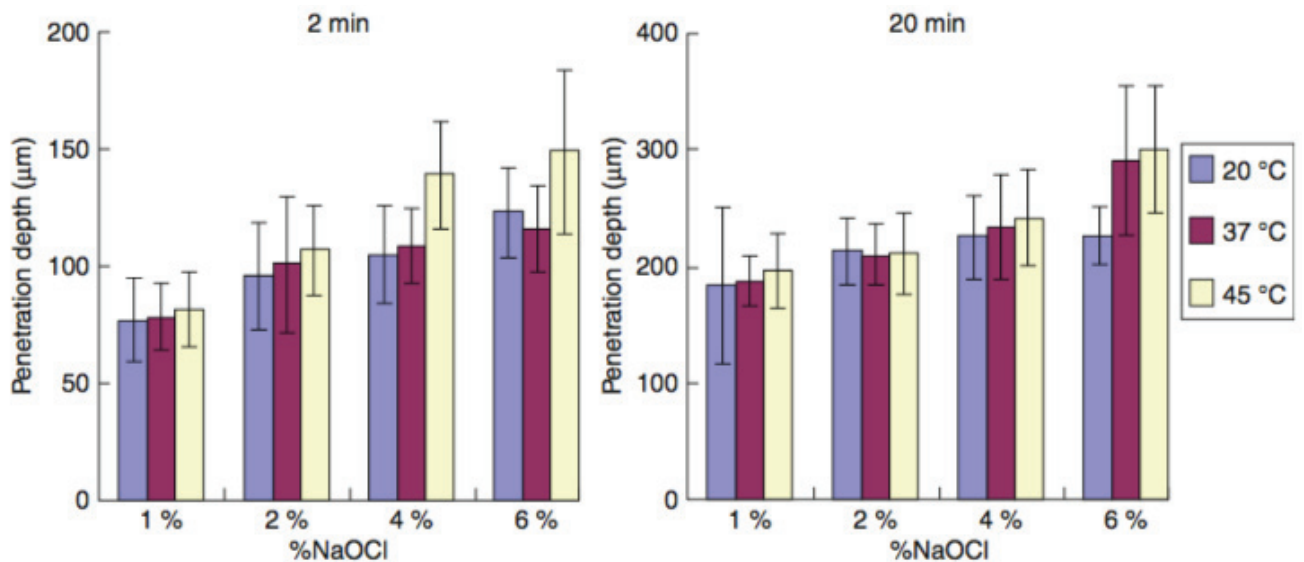


Figure 3 : Profondeur de pénétration (in vitro) de l'hypochlorite de sodium selon différentes concentrations et à différentes températures dans les tubuli dentinaires à 2 min et à 20 min. (9)

De nombreux facteurs peuvent donc améliorer les **propriétés antibactériennes** de l'hypochlorite de sodium tel que le volume occupé, la concentration, la température, et le temps d'exposition. (16)

d) *Pouvoir dissolvant du NaOCl sur le biofilm et la boue dentinaire :*

Le NaOCl dissout de manière bien plus efficace les tissus nécrosés que les tissus vivants. (8)(13)(18)

De nombreux facteurs améliorent les **propriétés dissolvantes** de l'hypochlorite de sodium : la concentration de chlore, le pH, le temps d'exposition, le renouvellement de la solution mais aussi la surface de tissu exposé. (13)(19)(20)(15)

Garcia et coll. ont montré, grâce au microscope électronique à balayage, l'incapacité de l'hypochlorite de sodium à déminéraliser et éliminer la boue dentinaire. (21)

Ainsi le recours à l'utilisation d'un chélatant reste indispensable pour éliminer la boue dentinaire. (13)

Une augmentation de la **température** améliore de manière importante la dissolution tissulaire, l'élimination des débris organiques et l'efficacité antibactérienne. Elle permet de conserver l'efficacité en réduisant la toxicité.

Ainsi, on peut utiliser une solution de NaOCl de faible concentration en la chauffant : elle conservera ses propriétés dissolvantes et antibactériennes en diminuant sa toxicité. (8)(16)

L'agitation ultrasonique de la solution d'hypochlorite de sodium améliore aussi son pouvoir de dissolution tissulaire. (8) La formation de bulles permet une évacuation « mécanique » des débris.

e) Biocompatibilité :

Son extrême toxicité vient de l'action caustique et protéolytique du chlore entraînant l'oxydation des protéines et lipides membranaires des tissus vivants.

Attention à l'extrusion de NaOCl au-delà de la constriction apicale, dans le peri-apex qui entraîne immédiatement après l'incident une hémolyse, des ulcérations, des nécroses des tissus vivants. Environ 1 mois est nécessaire à la résolution de l'emphysème, des ecchymoses et des hématomes engendrés par l'expulsion de NaOCl dans le péri-apex. (22)

Plusieurs causes peuvent être responsables de ces accidents : une longueur de travail incorrecte, une ouverture du foramen apical iatrogène, une perforation, ou une extrusion de l'aiguille d'irrigation. (22)

Pour minimiser ce risque, on utilise une aiguille à ouverture latérale placée à LT-2mm en faisant des mouvements de haut en bas sans bloquer l'aiguille dans le canal et en injectant doucement en un flux constant.

Le traitement d'un accident à l'hypochlorite de sodium consiste en un rinçage abondant au sérum physiologique, une prescription d'antibiotiques et d'antalgiques, et une surveillance des tissus.

Les points faibles de l'hypochlorite de sodium sont sa cytotoxicité potentielle, son incapacité à retirer la boue dentinaire, son goût et son odeur, accessoirement sa capacité à blanchir les vêtements et à corroder les instruments métalliques. L'utilisation de NaOCl en rinçage final peut altérer le collage.

2. Acide Ethylène Diamine Tétra-acétique : EDTA

L'acide éthylène diamine tétra-acétique ou EDTA est un chélatant.

La **chélation** est un processus physico-chimique au cours duquel est formé un complexe, le chélate, entre un ligand, dit chélateur, et un cation (ou un atome) métallique, alors complexé, dit chélaté. (23)

L'EDTA est un chélatant fort, qui forme des complexes extrêmement stables et inertes, caractérisés par des constantes de dissociation inférieures à 10^{-7} , c'est à dire, la forme complexée est beaucoup plus stable que la forme dissociée.

Ainsi, l'EDTA en se liant au calcium de l'hydroxyapatite (principal constituant de l'émail et de la dentine) va nous permettre d'éliminer la boue dentinaire tapissant les parois canalaire générée par l'instrumentation rotative des canaux lors de la mise en forme.

(Figure 4)

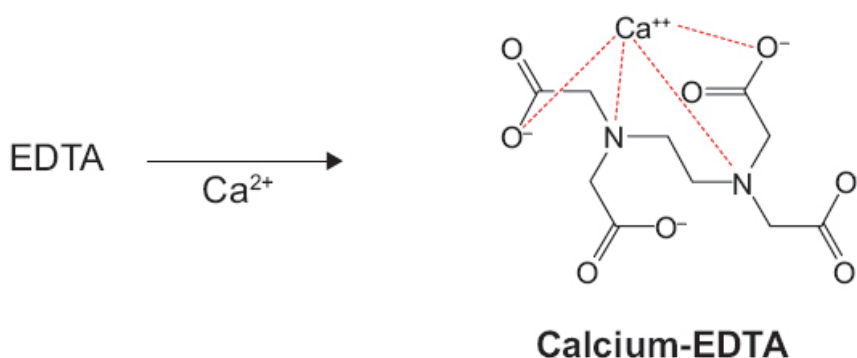


Figure 4 : Réaction chimique entre l'EDTA et le calcium générant un soluté de calcium chélaté, permettant une élimination de la boue dentinaire.

Il est recommandé d'utiliser l'EDTA 17% lors de l'irrigation finale : une irrigation avec de l'EDTA pendant 1 minutes, puis agitation pendant 1 minute suivie d'un rinçage final avec du NaOCl 2,5%. (24) Il en résulte une large ouverture des tubuli dentinaires. (Figure 5)

L'EDTA peut pénétrer et déminéraliser jusqu'à 50 μm dans les tubuli dentinaires. (9)

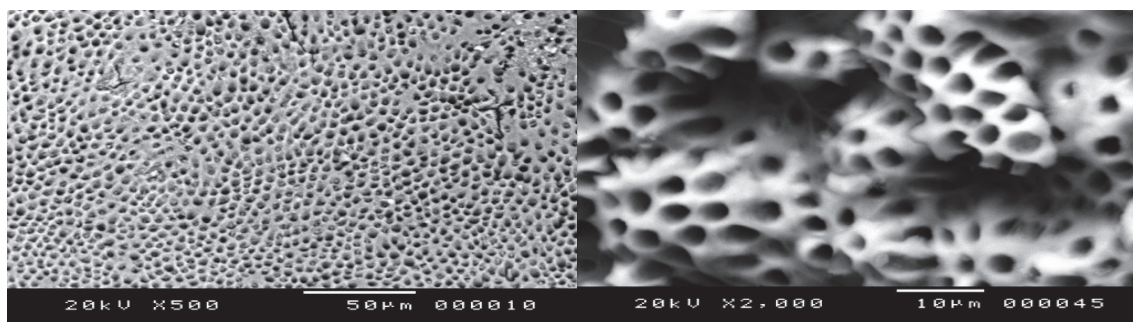


Figure 5 : Tubuli largement ouverts suite à l'action chélatante de l'EDTA à grossissement 500 (gauche) et 2000 (droite).

Il n'existe pas de différence d'efficacité dans l'élimination de la boue dentinaire après une, deux ou trois minutes d'utilisation de l'EDTA, par conséquent il est préférable de limiter son utilisation à une minute afin d'éviter une érosion et une dissolution excessive de la dentine péri-tubulaire et intra-tubulaire et une diminution de la microdureté dentinaire. (25)(26)(27)(28)

Dans le tiers apical, les tubuli sont plus petits, moins nombreux et souvent sclérosés. La sclérose de la dentine diminue l'efficacité de l'EDTA. (29)

Une augmentation de la température favorise la diffusion de l'EDTA en réduisant la tension superficielle. (30)

L'EDTA n'agit que sur la phase minérale et n'a pas d'action antibactérienne propre mais il contribue à désintégrer les biofilms polymicrobiens grâce à sa capacité de diffusion. (31)(32)(30)

L'EDTA est irritant pour les tissus péri-apicaux à forte concentration. (28)

L'EDTA élimine le chlore disponible du NaOCl. L'hypochlorite de sodium perd donc son action solvante et antibactérienne lorsqu'elle est mélangée à l'EDTA. C'est pourquoi il faut faire un rinçage au sérum physiologique entre l'EDTA et le NaOCl. (33)

3. Conclusion :

Nous savons qu'il est nécessaire d'associer une solution antibactérienne à un chélatant pour obtenir une irrigation efficace.

- **Les antibactériens :**

L'hypochlorite de sodium constitue un bel optimum. Son atout majeur réside dans ses propriétés de dissolution tissulaire permettant l'élimination de la matrice organique, accroissant le pouvoir déminéralisant des chélatants utilisés alternativement. (9)(34)(35)

- **Les chélatants :**

L'utilisation alternative de NaOCl et EDTA est recommandée car il s'agit du protocole le plus efficace pour nettoyer le système canalaire. (8)(9)

Les solutions doivent être efficacement délivrées dans le système canalaire : nous allons énumérer les différentes techniques et les appareils disponibles pour améliorer l'efficacité des solutions d'irrigations.

C. Revue de littérature sur les moyens de distribution

De grandes quantités d'irrigant doivent être utilisées pour disposer d'une réserve constante de chlore actif disponible (36), son renouvellement sera régulier avec 1 à 2 ml entre chaque passage d'instruments (37) et distribuée au contact des tissus (38). Une activation augmentera l'efficacité des solutions d'irrigation.

Une préparation apicale à un diamètre de 35/100 est nécessaire pour amener la solution d'irrigation jusqu'au dernier millimètre apical. (39)

C'est principalement le diamètre apical qui va permettre une bonne désinfection. En élargissant le diamètre apical, on augmente l'élimination de la boue dentinaire par les solutions d'irrigations. (Figure 6) (39)

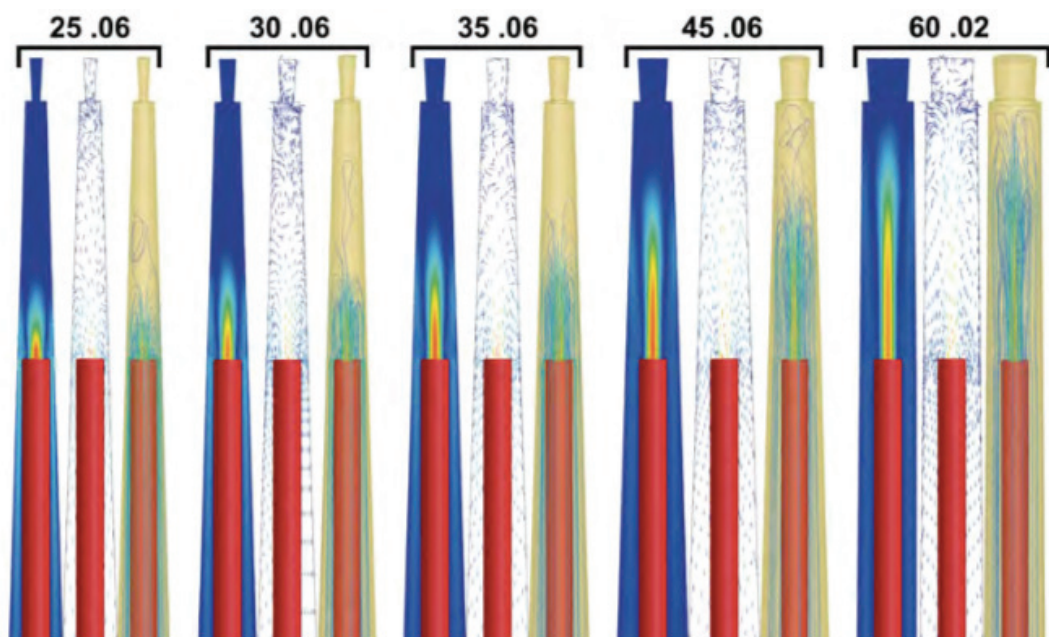


Figure 6 : Dynamique des irrigants selon le diamètre apical. (39)

1. L'irrigation à pression positive (seringue + aiguille)

Une seringue de 3 à 5 ml « Luer lock » avec une aiguille fine de 25 à 30 gauge à ouverture latérale pour réduire le risque d'expulsion apicale, est la manière la plus courante d'irrigation canalaire. (Figure 7) Le volume connu est injecté avec contrôle, en pression positive.



Figure 7 : Aiguille fine PRORINSE™ Dentsply Sirona de 25 gauge à ouverture latérale.

L'hypochlorite de sodium sera utilisé dès l'ouverture de la chambre, 1 à 2 ml entre chaque passage instrumental. L'instrumentation mécanique se fera dans un réservoir rempli d'hypochlorite, d'où l'importance de l'étanchéité et d'une reconstitution pré-endodontique de qualité. L'aiguille délivrera l'hypochlorite par un mouvement de va et vient pour générer un flux de distribution et une agitation de la solution pour une meilleure évacuation des débris. L'aiguille doit comporter un repère à LT-1mm pour éliminer le risque d'injection d'hypochlorite dans le péri-apex. Il est démontré que l'insertion de l'aiguille d'irrigation à LT-1mm est trois fois plus efficace que si l'aiguille reste à LT-5mm. (40)

L'EDTA sera utilisé en rinçage final pendant 2 minutes pour éliminer la fraction minérale de la boue dentinaire générée par l'instrumentation.

Un rinçage au sérum physiologique est nécessaire pour éliminer l'EDTA qui inhibe l'hypochlorite de sodium. (41)

Un dernier rinçage avec l'hypochlorite de sodium permettra de nettoyer les tubuli préalablement ouverts et débarrassés de la boue dentinaire par l'EDTA.

Une lime de perméabilité utilisée tout au long du traitement permettra une diffusion la plus large possible des solutions d'irrigation, évitera la formation de bouchons apicaux et l'interposition de bulles de gaz. (3)

Malgré leur inefficacité dans le tiers apical, les seringues demeurent la procédure standard en pratique quotidienne. (42) Encore plus si le canal est courbe. (43)(44)

L'apport d'irrigant dans le tiers apical dépend directement de la profondeur de pénétration de l'aiguille. (45)

Indépendamment de la profondeur de pénétration de l'aiguille, l'augmentation du volume injecté et le temps d'exposition réduisent la charge bactérienne. (46)(47)

L'augmentation du diamètre de préparation apicale et du volume injecté améliore l'accès de l'irrigant au canal. (45)

Cette irrigation est la plus couramment utilisée, néanmoins avec cette méthode le tiers apical reste la portion la plus difficile à nettoyer. (8) Les solutions d'irrigation stagnent dans le dernier millimètre apical où le renouvellement y est difficile.

L'aiguille placée à LT-2mm propulse la solution d'irrigation devant mais n'a pas d'action au niveau des isthmes et des canaux latéraux. (39)

Les mouvements liquidiens sont fonction du design de l'aiguille mais ils n'atteignent pas la longueur de travail sous peine de risquer une extrusion. (Figure 8)

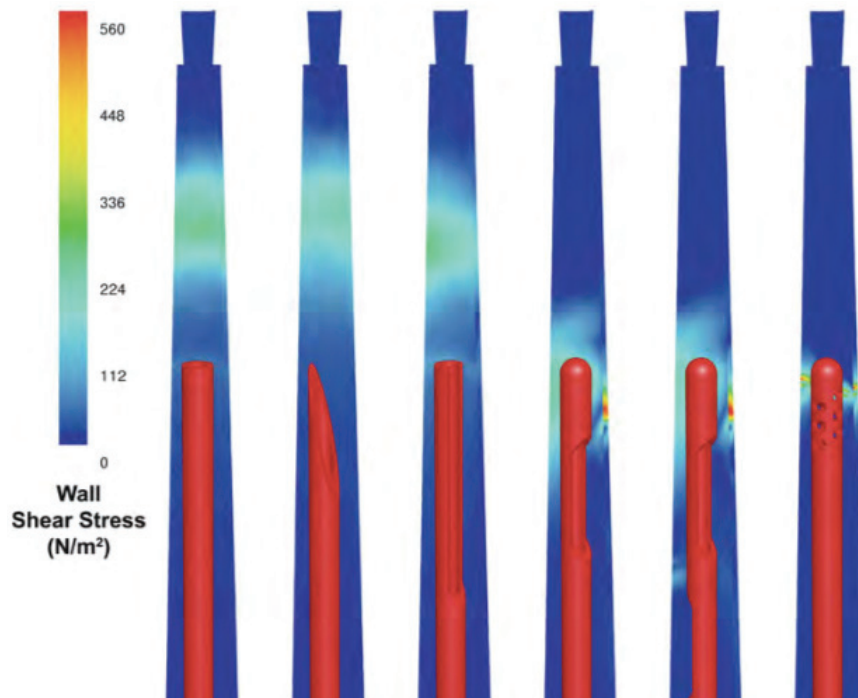


Figure 8 : Dynamique des fluides en fonction du design de l'aiguille.

L'activation devrait permettre un nettoyage efficace. (45)

2. L'irrigation à pression négative : le système EndoVac® (Sybron Endo™)

Les dispositifs à pression apicale négative (EndoVac® de Sybron Endo™) ont été mis au point pour obtenir une bonne distribution des solutions d'irrigation jusqu'au tiers apical, et un double flux continu et constamment renouvelé car la solution est en même temps aspirée et injectée. C'est une activation hydrodynamique qui utilise des variations de pression pour faire circuler les irrigants, créant un reflux susceptible de détacher et de faire remonter les débris. (48)



Figure 9 : Système EndoVac® de Sybron Endo™ : la seringue aspirante, la macrocanule, la microcanule.

Le système EndoVac® comprend une macro canule pour la partie coronaire et une micro canule pour la partie apicale, celles-ci sont connectées à une seringue pour l'irrigation et l'aspiration. (49) (Figure 9) Il a été développé en 2007 dans le but de sécuriser l'apport d'irrigant à l'apex. (48)

Pour une utilisation optimale, il est nécessaire d'augmenter à 35/100 le diamètre apical de la préparation pour pouvoir placer la micro canule à la longueur de travail et obtenir une élimination efficace des débris. (50) (Figure 10)

Un mouvement de va et vient permet d'améliorer l'éviction des débris. 30 secondes d'action sont préconisées entre chaque instrument.

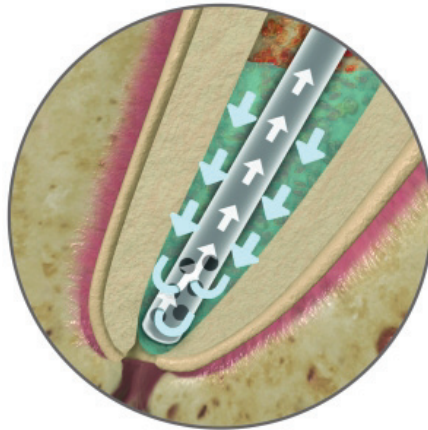


Figure 10 : Mouvements liquidiens au tiers apical généré par la micro canule de l'EndoVac® placée à la longueur de travail.

Des études soulignent le renouvellement important des irrigants dans le tiers apical et la diminution du risque d'extrusion grâce à une contre-aspiration. (51) L'efficacité de ce système réside dans la quantité de volume de solution délivré au niveau du tiers apical (52) et l'excellente capacité d'évacuation des débris dans cette zone (48)(53) et dans des zones inaccessibles par l'instrumentation (54) avec des résultats comparables avec ceux des dispositifs d'activation ultrasonores. (55)

Deux études conduites sur des dents immatures de chiens avec parodontites apicales concluent qu'une médication intra-canalair en inter-séance est inutile après irrigation avec l'EndoVac® et constatent une réparation péri-apicale plus avancée. (56)

Néanmoins, d'autres études montrent l'inverse.

Townsend et Maki (2009) ont étudié l'action antibactérienne sur des canaux simulés infectés par *E. faecalis* ; l'irrigation passive ultrasonore s'est montrée plus efficace que l'EndoVac®. (57)

Miller et Baumgartner (2010) ne trouvent pas de différence significative entre l'EndoVac® et l'irrigation classique avec une aiguille Maxi-probe de 30 G.

Pour résumer, malgré des résultats quelques fois contradictoires selon les études, l'EndoVac® permet d'obtenir un bon nettoyage apical avec une bonne action antimicrobienne grâce à l'apport sécurisé et renouvelé d'irrigant frais à la longueur de travail par ce système d'aspiration par pression négative, ainsi qu'une réduction du risque d'extrusion apicale.

Ce n'est pas un dispositif d'activation à proprement parler mais un moyen de délivrer la solution d'irrigation d'une manière optimale.

Son utilisation clinique paraît fastidieuse de par son encombrement et la nécessité d'une aide opératoire ainsi que par son coût non négligeable.

D. Revue de la littérature sur les moyens d'activation

1. Activation manuelle : technique du maitre cône

Cette méthode simple et efficace proposée par Pierre Machtou en 1980 consiste à insérer un cône de gutta percha calibré au diamètre de la préparation ajusté à la longueur de travail moins 1mm (LT-1mm), et de réaliser 200 mouvements aller-retours pour éliminer l'effet « Vapor Lock ». Le cône remplace la bulle de gaz et crée une brèche pour l'irrigant en générant des turbulences. (58) (Figure 11)

Bronnec et al. (2010) confirme l'efficacité de cette activation par déplacement latéral et apical des irrigants par des mouvements d'aller-retours de faible amplitude (4 à 5mm). (45)

Cette technique reste néanmoins une manœuvre fastidieuse, plutôt délicate et incertaine.

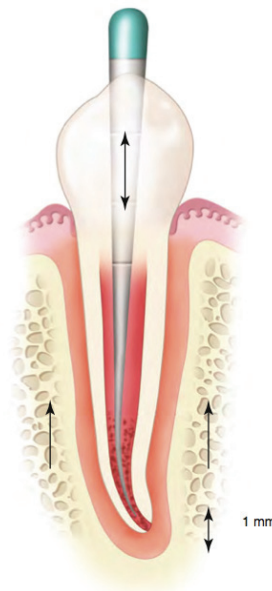


Figure 11 : Activation manuelle grâce à la technique du maitre cône : le cône de gutta est animé d'un mouvement de pompage vertical de 4 à 5 mm d'amplitude à LT-1mm pendant 1 à 2 min.

2. Activation thermique

Une étude compare la capacité de dissolution du collagène par l'hypochlorite de sodium à 2,5 % et 5,2 % à température ambiante 21°C et à température du corps humain 37°C. Il s'avère qu'à 37°C, NaOCl à 2,5 % a la même capacité de dissolution de la matière organique que NaOCl à 5,2 %, quelle que soit sa température. (59)

Sirtes confirme en 2005 l'augmentation d'efficacité de NaOCl chauffée ; la stabilité du NaOCl chauffée à court terme, c'est à dire durant un temps correspondant à un traitement endodontique ainsi que l'augmentation de sa capacité bactéricide. (60)

Néanmoins il est important de veiller à ce que la température physiologique de 37°C ne soit pas dépassée car la moindre extrusion causerait des dommages osseux et tissulaires irréversibles. (61)

A contrario, l'activation thermique n'est pas valable pour l'EDTA. En effet, il n'existe pas d'augmentation significative de la capacité chélatante de EDTA entre 25°C et 37°C. (62)

3. Activation sonore : EndoActivator® (Dentsply Maillefer)

L'EndoActivator® (Dentsply Maillefer) est une pièce à main sonore sans fil qui permet de faire vibrer mécaniquement des inserts en plastique médical flexible à usage unique à une fréquence de 10 000 cycles/min soit 1500 Hz. (Figure 12)

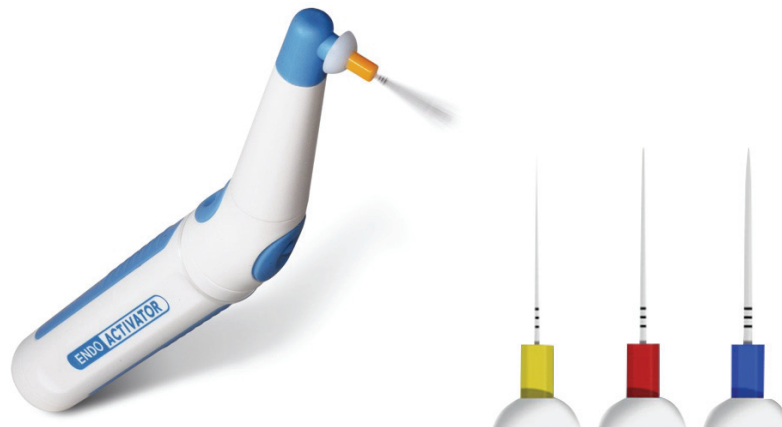


Figure 12 : L'EndoActivator® de Dentsply Maillefer et ses inserts de différents diamètres. Jaune #15/02, Rouge #25/04, Bleu #35/04

L'activation sonore n'engendre qu'un seul nœud (zone d'oscillation minimum) au niveau de l'attache de l'insert sur la pièce à main et qu'un anti-nœud (zone d'oscillation maximum) à l'extrémité de l'insert.

En cas de contraintes pariétales, les oscillations latérales disparaissent pour laisser place à une oscillation longitudinale pure.

L'insert en plastique monté sur l'EndoActivator® est stoppé à LT-1mm. Il s'utilise en faisant de petits mouvements de pompage verticaux d'amplitude de 2 à 3 mm.

Le rinçage final se fait par l'activation d'1ml d'EDTA pendant une minute puis 2 à 3 ml d'hypochlorite de sodium pendant 30sec, par canal.

Caron et al. (2010) ont observé au microscope électronique à balayage la qualité du nettoyage et l'élimination des boues dentinaires dans des canaux courbes après rinçage final selon le protocole décrit ci-dessus, et ils ont obtenus des résultats de propreté extrêmement probants dans le tiers apical des canaux courbes. (63)

D'après plusieurs auteurs, un consensus se dégage : ce dispositif semble très efficace.

4. L'Irrigation Passive Ultrasonore : IrriSafe™ (Satelec)

Les plages de fréquences utilisées se situent entre 25 et 30 kHz, au-delà des limites audibles, c'est pourquoi on parle d'ultrasons.

Le mode de vibration ultrasonore engendre une série de nœuds (zone d'oscillation minimum) et d'anti-nœuds (zone d'oscillation maximum) sur toute la longueur de l'insert. Les effets intra-canaux sont qualifiés de turbulences acoustiques. (64)

On parle d'irrigation passive ultrasonore PUI (65) : il s'agit d'utiliser la vibration d'une lime dans la solution d'irrigation mais sans instrumentation simultanée, pour éviter les effets délétères, car il y a absence d'effet de coupe des instruments utilisés.

Il n'y a pas d'effet bactéricide mais une déstructuration du biofilm.

Van der Sluis et al. ont suggéré que l'utilisation d'une lime lisse est aussi efficace et plus sûre qu'une lime K. (66)

De telles limes non actives sont disponibles chez EMS (Endo Soft Instrument) et chez Actéon-Satelec avec l'IrriSafe™ (Figure 13).



Figure 13 : Lime Ultrasonore IrriSafe™ - Illustration des noeuds et antinoeuds générant un microflux acoustique activant la solution d'irrigation.

L'insert d'irrigation ultrasonique IrriSafe™ est monté sur le générateur d'ultrasons et permet d'activer l'irrigant dans le canal ce qui génère un micro flux acoustique qui active et chauffe la solution.

L'IrriSafe™ est utilisé en alternance avec le renouvellement de la solution d'irrigation. La lime est placée dans le canal, préalablement mis en forme, à l'arrêt puis elle est activée

pendant 1 à 2 min. Il ne faut pas que la lime entre en contact avec les parois dentinaires pour ne pas rompre l'onde acoustique.

La PUI a surtout montré son efficacité dans l'élimination des débris dans des canaux droits pour que la lime puisse vibrer librement. A défaut, dans les canaux courbes, il y a une baisse d'efficacité, une production de boue dentinaire lors des chocs de la lime sur les parois et un risque de fracture non négligeable. (67)

La PUI n'améliore pas les capacités de chélation de l'EDTA. Les résultats étant comparables avec de l'EDTA à 17% avec ou sans irrigation ultrasonore passive. (68)

Une revue de la littérature exhaustive de Mohammadi (2015) arrive à la conclusion qu'il est impossible d'établir de façon formelle et certaine une quelconque supériorité de la PUI par rapport à une utilisation adéquate de l'irrigation à la seringue, que ce soit par l'activation de l'hypochlorite pour améliorer son efficacité sur les biofilms ou que ce soit pour le nettoyage de la boue dentinaire. (69)

L'inconvénient de la PUI est qu'elle peut causer une déviation du canal, un zipping apical, ou une perforation canalaire. (7)

5. Activation laser

L'activation au moyen de lasers est la dernière innovation en endodontie. Ils permettent un contrôle de l'énergie délivrée.

Les lasers apportent un intérêt dans la désinfection car la **lumière** diffuse dans les zones habituellement inaccessibles, rendant la complexité de l'anatomie canalaire enfin accessible. (6)(7)

E. Revue de littérature sur la clinique de l'irrigation : Recommandations HAS

Dernières recommandations sur l'irrigation selon la HAS (septembre 2008)(70) :

Utilisation de l'hypochlorite de sodium en optant pour une concentration maintenant une toxicité minimale ($\leq 1\%$), en association avec un agent chélatant (EDTA) afin d'éliminer la boue dentinaire composée de substances organiques et inorganiques.

La technique d'irrigation consiste à remplir abondamment le canal avec de l'hypochlorite de sodium à l'aide d'une fine aiguille d'irrigation (dont le diamètre est adapté à la taille de la préparation) entre chaque instrumentation.

Lorsque la mise en forme est terminée, un rinçage avec une solution d'EDTA (5 à 10 ml durant 1 min) est recommandé suivi immédiatement par un rinçage final avec la solution d'hypochlorite de sodium.

La HAS recommande le protocole suivant :

- Irrigation préalable : la cavité d'accès est remplie avec de l'hypochlorite de sodium (2,5 %) ;
- Exploration initiale manuelle avec un instrument stérile ;
- Mise en forme conique, régulière avec irrigation abondante (1 ml de solution) renouvelée entre chaque passage d'instrument ;
- Rinçage final avec solution d'EDTA suivi par rinçage avec l'hypochlorite, séchage.

III. LES DIFFERENTS LASERS EN ENDODONTIE

La dernière innovation en endodontie est l'utilisation des lasers.

En 1971, Weichman et Johnson ont été les premiers à utiliser les lasers en endodontie en tentant de sceller le foramen apical in vitro à l'aide d'un laser CO₂ (laser à haute puissance infrarouge) puis à l'aide d'un laser Nd : YAG. (71)

Depuis, différents lasers sont utilisés en endodontie, essentiellement dans un rôle d'agent de désinfection ou d'activation des solutions d'irrigations.

L'interaction du faisceau laser avec le tissu cible produit des **effets biologiques** qui se répercutent sur le plan thérapeutique.

Ces effets sont d'ordre :

- Bio-stimulation ;
- Photo-chimiques ;
- Photo-mécanique, comprenant les effets Photo-acoustiques ;
- Photo-thermique ;
- Photo-ablation.

Les lasers ont une action sur les bactéries et sur les tissus minéralisés :

- L'effet **Photo-mécano-acoustique** réduit de 73% la charge bactérienne, grâce à l'onde de choc dans l'eau.
- L'effet **Photo-thermique** a une action sur les parois bactériennes à faible dose, l'action est rapide sur les bactéries Gram -. Cet effet photo-thermique élimine également les débris minéralisés et la boue dentinaire mais peut aussi endommager les parois dentinaires en l'absence d'eau et provoquer des zones de « fusion dentinaire ».

C'est pourquoi on utilise les lasers en **dessous des valeurs d'ablation**, on recherche l'**effet photo-acoustique**.

Le mot **LASER** est un acronyme pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement).

A. Spectre d'émission des lasers

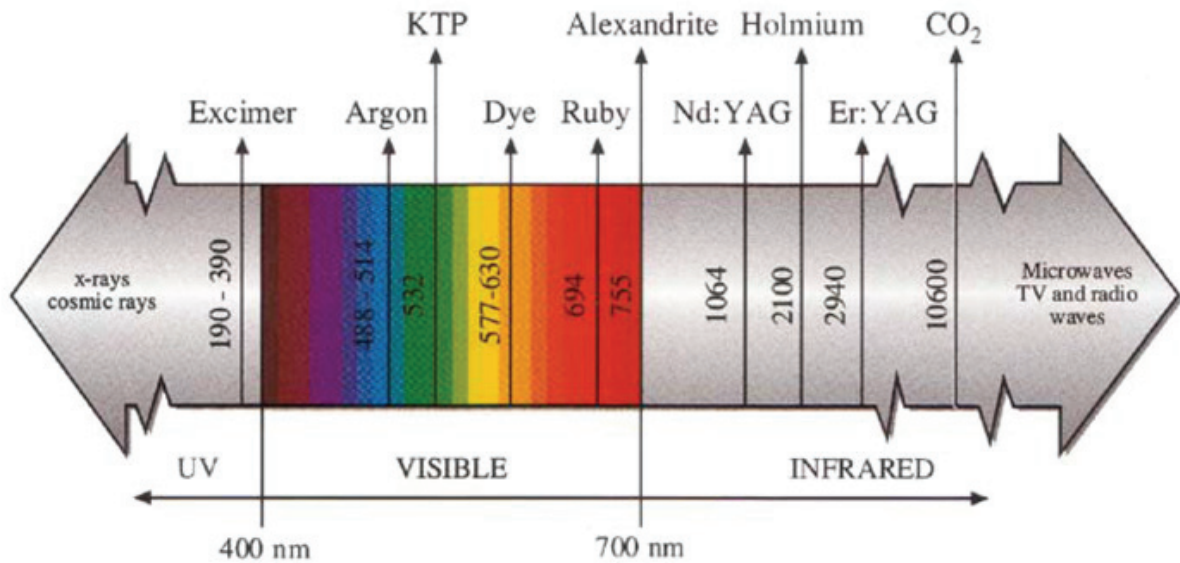


Figure 14 : Longueurs d'onde des différents types de laser selon leur spectre d'émission. Rayonnement mono-chromatique des lasers.

Contrairement à la lumière ordinaire, la lumière laser est monochromatique car seule une longueur d'onde est produite plutôt qu'un spectre de longueurs d'ondes. La lumière laser peut être très concentrée et directionnelle, produisant un faisceau collimaté.

Le spectre électromagnétique s'étend des rayonnements ionisants invisibles tels que les rayons gamma, les rayons X et les rayons ultraviolets (100 nm à 400 nm) ; la lumière visible (400 nm à 750 nm) ; jusqu'à un rayonnement thermique invisible tel que l'infrarouge et les ondes radio (au-dessus de 750 nm).

Les longueurs d'ondes actuellement utilisées en dentisterie varient de 488 nm à 10 600 nm. (Figure 14)

Ils sont émis par le spectre visible sous forme de rayonnement non ionisants donc non mutagène. (72)

B. Effet de Cavitation (définition)

La **cavitation stable** consiste en une succession d'expansions et de contractions rapides qui génèrent des hautes pressions gazeuses et élèvent la température. Ces impacts énergétiques ponctuels, intenses, activent aussi le contenu canalaire. La cavitation engendre des bulles et améliore l'éviction du biofilm. (73)(66)

On appelle **cavitation** la naissance de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une compression. Si cette compression est suffisamment élevée, la pression peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante, et une bulle de vapeur est susceptible de se former. (Figure 15)

Lorsqu'une bulle explose dans un espace limité, elle crée une surpression en explosant, c'est l'**effet de cavitation**.

En explosant, les bulles créent des contraintes sur les parois canalaire capables de décoller la boue dentinaire et de détruire le biofilm.

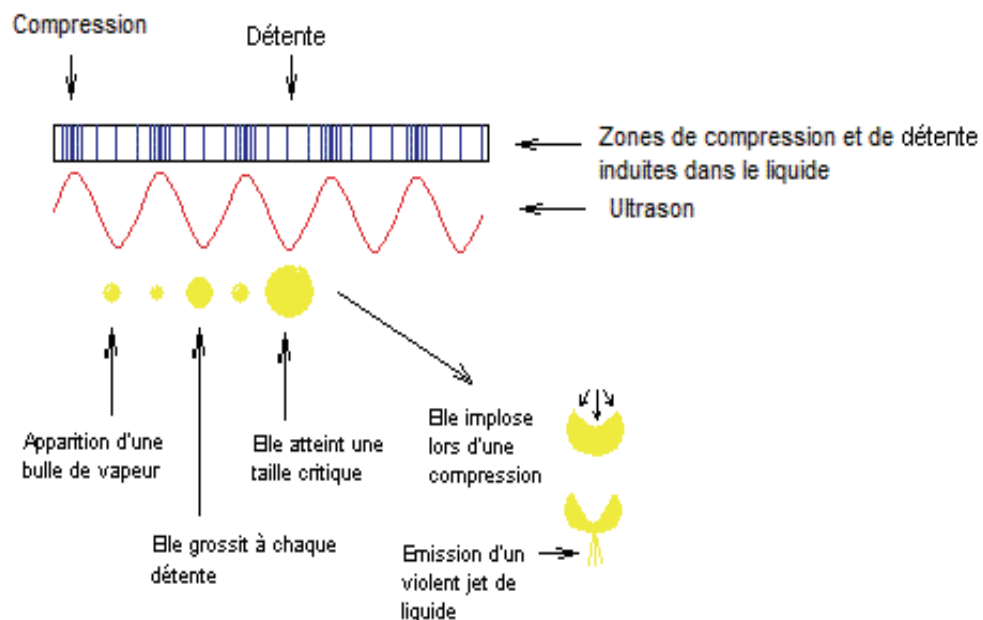


Figure 15 : Le Phénomène de Cavitation.

C. Les différents lasers

1. Laser Diode

Le laser **Diode** est un laser dans le proche infra-rouge puisqu'il utilise des longueurs d'ondes de 440 nm à 810 nm.

Il est fortement absorbé par l'hémoglobine et les tissus de couleur foncée (mélanine) mais pas dans l'eau. (74)

Les lasers Diodes ont rapidement trouvé leur chemin dans la dentisterie laser assistée grâce à leur petite taille, leur facilité d'utilisation et leur prix abordable.

Ils ont beaucoup contribué dans le domaine de la désinfection endodontique.

2. Laser Nd:YAG

Le laser **Nd:YAG** est un laser dans le proche infra-rouge puisqu'il utilise des longueurs d'ondes de 1064 nm.

Le procédé de fabrication actuel repose sur un cristal d'Yttrium-Aluminium-Garnet (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) auquel on adjoint un ion Néodymium (Nd_{3+}) qui est un Lanthanide (groupe des terres rares).

Le Nd:YAG n'est pas absorbé dans l'eau. (74)

3. Laser Er:YAG et Er;Cr:YSGG

Ce laser est le plus utilisé en odontologie depuis 1988 pour la préparation des cavités et le nettoyage des caries, et plus récemment en endodontie.

La longueur d'onde d'émission est proche de $3\mu m$ et son absorption est maximum dans l'eau et l'hydroxyapatite.

Deux lasers à Erbium coexistent en dentisterie : l'Erbium-Chrome : YSGG qui émet à $2,79\mu m$ et l'Erbium : YAG qui émet à $2,94\mu m$.

Comme le laser à Néodyme, l'Erbium appartient à la famille des terres rares (Lanthanides) et il est placé au cœur d'un cristal.

Actuellement, les deux principaux cristaux utilisés sont l'Yttrium-Aluminium-Garnet (YAG, $Y_3Al_5O_{12}$) et l'Yttrium-Scandium-Gallium-Garnet (YSGG, $Y_3Sc_2Ga_3O_{12}$).

Lorsque l'onde d'émission du laser Er : YAG est absorbée par les solutions d'irrigation, l'énergie engendrée entraîne une vaporisation. La bulle de vapeur s'expand et forme un vide juste devant le laser. (6)

D'après l'étude de George & Walsh (2008), les lasers Er:YAG et Er;Cr:YSGG augmentent le risque d'extrusion des débris dans le péri-apex et provoquent une élévation de la température s'ils sont utilisés sans spray. (75)

Oliveira et al. ont comparé l'efficacité des lasers Nd:YAG, Er:YAG et Diode sur la boue dentinaire. Il en résulte une meilleure réduction de la boue dentinaire avec l'utilisation du laser Er:YAG (2094 nm). (76) (Figure 16)

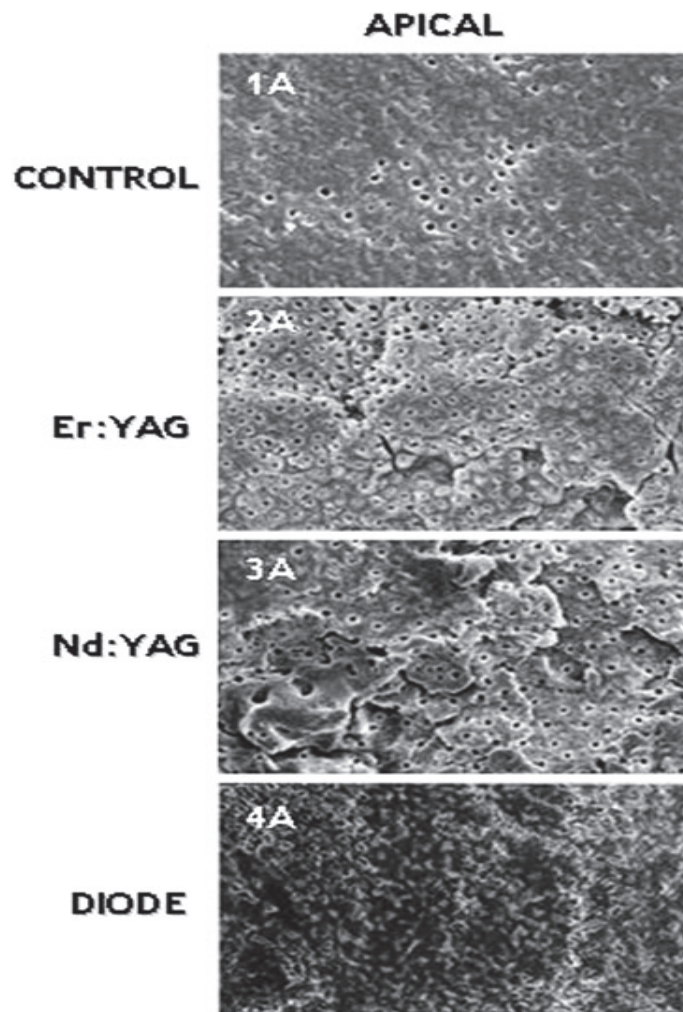


Figure 16 : Image au MEB du tiers apical après activation des solutions d'irrigations au laser Er:YAG (100mJ - 15Hz - 150 μ s - 1,5W); Nd:YAG (100mJ - 15Hz - 100 μ s - 1,5W) et Diode (250mJ - 100 μ s - 2,5W). (76)

	Diode	Nd : YAG	Er : YAG	Er,Cr : YSGG
Préparation canalaire		+ / -	+ / -	+ / -
Efficacité bactéricide	+	++	+++	+++
Elimination de la boue dentinaire	+	++	+++	+++
Ouverture des tubuli			+++	+
Fermetures des tubuli	++	+ / -		
Amélioration de l'étanchéité apicale	+ / -	+++		
Perméabilité canalaire augmentée	+ / -		+++	+++

Tableau 1 : Propriétés et applications des lasers utilisés en endodontie. (76)

Les techniques LAI, PIPS et SWEEPS utilisent le laser Er:YAG.

D. Effets indésirables des lasers Er : YAG en endodontie

Plusieurs effets indésirables peuvent se produire :

➤ Les **blessures oculaires** :

La lumière laser peut provoquer des blessures irréversibles de la rétine, directement ou par réflexion dans un miroir.

Il est conseillé de ne pas utiliser d'instruments ayant des surfaces réfléchissantes.

Le patient et les opérateurs doivent porter des lunettes de protection.

➤ **Élévation de la température intra-canaire** :

Plusieurs auteurs ont montré que lorsque le laser Er : YAG est utilisé avec spray ou en présence d'irrigants tels que le NaOCl ou l'EDTA, l'augmentation de la température intra-canaire ou au niveau des tissus parodontaux était tellement faible qu'elle ne peut être en aucun cas responsable de dommages thermiques irréversibles. (77)(78)

➤ **Modification de la structure minérale de la dentine** :

Le laser Er : YAG a son absorption maximum dans l'eau et l'hydroxyapatite. Les cristaux d'hydroxyapatite sont principalement composés d'éléments de Calcium (Ca) et de Phosphore (P).

Topçuoğlu et al., en 2015, ont cherché à savoir si le rapport Ca/P était modifié par l'irradiation laser Er : YAG (1W, 100mJ, 10Hz, 250µs, 795.7 W/cm², avec spray). Ils ne constatèrent aucun changement significatif de la teneur en minéraux de la dentine radiculaire, avant et après traitement laser. (79)

Cela tend à démontrer que le laser Er : YAG utilisé avec spray ne produit aucune modification significative de la structure minérale de la dentine.

➤ **Extrusion de débris et d'irrigants dans le péri-apex** :

Dans son étude de 2017, Arslan et al. ont observé une quantité de débris extrudés significativement supérieure sur les dents traitées par la PIPS (Er : YAG à 0.3W, 15Hz, 20mJ) par rapport à une irrigation à la seringue. Dans cette étude la PIPS était réalisée après chaque passage instrumental, ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus. (80)(81)

Il semble raisonnable de réserver l'activation laser Er : YAG (PIPS) l'irrigation finale, afin d'éviter au maximum l'extrusion des débris dans le péri-apex. Mais ces résultats sont à interpréter avec prudence car il est, pour l'heure, impossible de simuler parfaitement les tissus péri-apicaux et la pression qui s'exerce au niveau du foramen apical en laboratoire.

IV. ACTIVATION LASER DES SOLUTIONS D'IRRIGATION

A. PDT : Photodynamic Therapy

La **Thérapie Photodynamique (PDT)** implique l'utilisation d'un **colorant photo-sensibilisateur** (présentant une activité antimicrobienne) activé par l'exposition de la **lumière** à une longueur d'onde spécifique (proche infra-rouge), en présence d'oxygène. Elle réalise une désinfection photo-chimique. (82) L'objectif étant d'éliminer sélectivement les cellules indésirables dans le corps.

Trois colorants photo-sensibilisateurs ont été examinés : Blue Toluidine (83), le bleu de méthylène (84) et d'autres photo-sensibilisants naturels comme la curcumine (85).

L'**Agent Photosensible** doit présenter :

- Peu de toxicité cellulaire sans lumière,
- Une toxicité sélective maximale entre cellules cibles et cellules saines,
- Un pic d'absorption de l'agent photosensible adapté à la longueur d'onde de la source de lumière,
- Etre actif seulement lors de l'illumination.

Après la mise en forme canalaire et le rinçage final, l'opérateur injecte l'agent photosensible dans les canaux. Après 2 minutes d'attente, on active l'agent photosensible par un temps d'irradiation de 1 à 5 minutes par canal. ($\lambda = 660 \text{ nm}$; $P = 100 \text{ mW}$) temps cliniquement long. (86)

L'absence d'effets génotoxiques et mutagènes de la PDT est un facteur important de la sécurité à long terme pendant le traitement.

La PDT représente une approche thérapeutique innovatrice dans la gestion des biofilms oraux malgré un effet bactéricide moindre que la PUI. Elle n'a que peu d'effet sur la boue dentinaire. (87)(88)

B. LAI : Laser Activated Irrigation

L'**Irrigation Activée par Laser (LAI)** provoque une agitation de la solution d'irrigation et une désinfection photo-acoustique.

Elle nécessite un laser Er:YAG à une longueur d'onde de 2940 nm. Son absorption est maximale dans l'eau et les cristaux d'hydroxyapatite.

Elle s'est révélée statistiquement plus efficace pour éliminer les débris et la boue dentinaire que la PUI. (82)

L'enregistrement microphotographique des études sur LAI a suggéré que le laser Er:YAG utilisé dans les canaux remplis de solution d'irrigation génèrent un flux à grande vitesse à travers les fluides et un **effet de cavitation**.

L'effet thermique du laser va donc générer l'implosion et l'expansion des molécules d'eau dans la solution d'irrigation, créant un effet secondaire de cavitation sur les fluides intracanaux. (Figure 17)

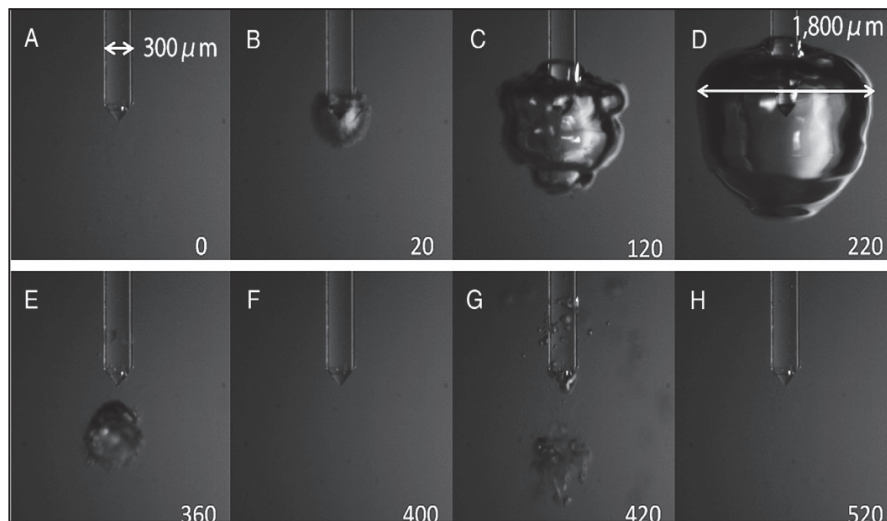


Figure 17 : La fibre optique de 300μm est placée à LT-5mm et crée un effet de cavitation. (89)

Pour obtenir cet effet de cavitation, il est suggéré de placer la fibre optique dans le tiers moyen du canal, à maximum 5mm de l'apex. Puis de remonter vers la partie coronaire en faisant un mouvement hélicoïdal. Opération répétée 3 à 4 fois selon le protocole. (82) (Figure 18)

La LAI implique l'utilisation de Tips (qui peuvent être conique, conique et chimiquement activé, ou conique et dépouillé) qui sont des fibres optiques de 300 micromètres permettant d'améliorer l'émission latérale de photons pour activer les solutions d'irrigations.

Ce concept simplifie la technique laser, sans avoir à atteindre l'apex ni à négocier les courbures radiculaire. (90) La LAI n'est donc pas limitée par une anatomie canalaire particulière comme peut l'être la PUI. (91)

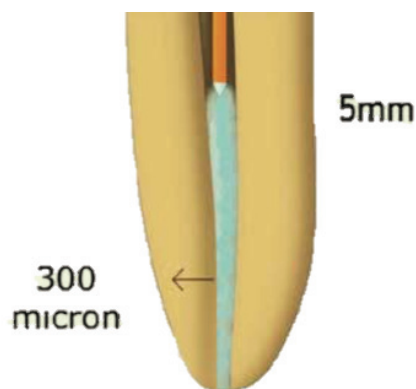


Figure 18 : LAI, le tip est placé à 5mm de l'apex puis remonté vers la partie coronaire par un mouvement hélicoïdal. L'irrigant pénètre jusqu'à 300 microns dans les tubuli. (82)

De la LAI sont nées la PIPS et la SWEEPS.

C. PIPS : Photon Induced Photoacoustic Streaming

Le mécanisme d'action est presque le même que dans la LAI. Le laser produit des ondes acoustiques par des impulsions de faible énergie, aidant les solutions d'irrigation à diffuser dans toute l'anatomie canalaire.

Jusqu'en 2012, l'activation des solutions d'irrigation par laser Er : YAG s'effectuaient exclusivement avec une fibre endodontique placée à l'intérieur du canal, à quelques millimètres de la longueur de travail puis remontée progressivement en direction coronaire.

En 2012, Di Vito met au point une nouvelle fibre à extrémité conique au niveau de laquelle 3mm de gaine polyamide est retirée. Il utilise des impulsions très brèves (50 μ s) et de faibles énergies de tel sorte que les effets thermiques soient négligeables tout en augmentant l'élimination de la boue dentinaire et la désinfection canalaire. (77)

Il montre que le positionnement du tip dans la chambre est suffisant pour activer l'irrigant, même dans la région apicale. (92)(77) (Figure 19)

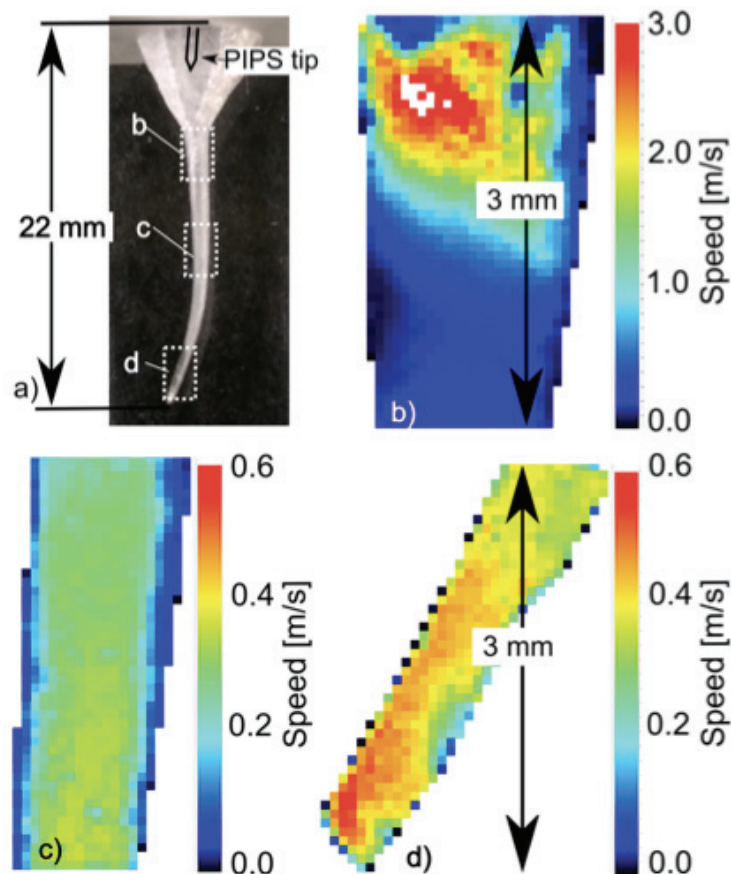


Figure 19 : L'image (a) montre le model de faux canal utilisé et la position du tip PIPS dans la chambre. Les images (b), (c), (d) montrent les vitesses obtenues au tiers coronaire, au tiers moyen, et au tiers apical lors de l'activation PIPS. (93)

L'innovation de la PIPS réside dans l'absence d'insertion de l'embout dans les canaux. Le tip est placé dans la chambre.

La PIPS provoque une agitation de la solution d'irrigation et une désinfection photo-acoustique par augmentation de la convection. (82) Elle permet d'éliminer plus de boue dentinaire au tiers apical que l'irrigation à la seringue. (94)

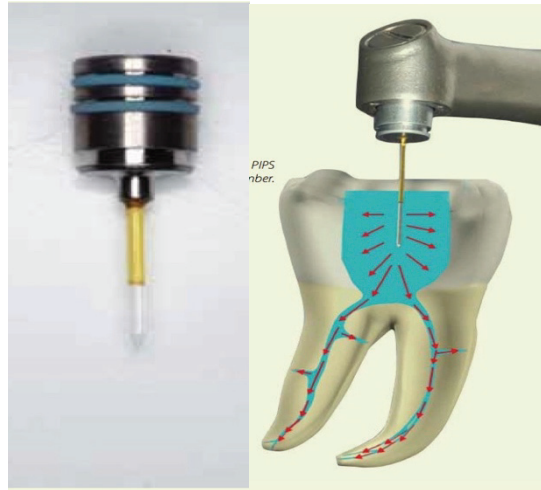


Figure 20 : Tip PIPS (droite) de 600µm-9mm. Laser Light-Walker AT Fotona®. Technique PIPS, l'embout reste dans la chambre. (82).

La PIPS utilise un tip conique à tir radial, en quartz de 9mm de longueur et de 600 µm de diamètre. Les 3 derniers millimètres ont été dénudés du revêtement de protection externe, afin d'augmenter la dispersion latérale d'énergie. (82) (Figure 20)

Lors de leur étude en 2015, Akyuz Ekim et al., ont obtenu de biens meilleurs scores avec la PIPS qu'avec l'irrigation conventionnelle à la seringue au sujet de la capacité de l'EDTA à éliminer la boue dentinaire, ce qui tend à démontrer qu'elle a une réelle influence sur l'action de l'EDTA 17%. (95)

Selon Wang et al., le protocole le plus efficace pour l'élimination de la boue dentinaire au tiers apical est l'utilisation d'un laser Er : YAG avec un tip PIPS+ NaOCl 5,25% 30sec + EDTA 17% 30sec (2940 nm, 20mJ, 15Hz, 0,3W, mode Super-Short Pulse 50µs ; PIPS tip de 9mm, diamètre 600µm). (7)

Le risque d'extrusion dans le péri-apex des solutions d'irrigations entre la PIPS, la PUI, et l'irrigation à la seringue est le même. (81)

Les inconvénients de la PIPS sont :

- Les ondes de choc allant plus vite que le son ne sont pas observées dans un espace confiné tel que les canaux radiculaires. (96)
- La dynamique de la cavitation est considérablement ralentie par le frottement des parois du canal et par l'espace disponible limité pour le déplacement des fluides.

➤ **Protocole PIPS avec le laser Er : YAG Light-Walker AT Fotona® selon Golob (97)**
(Figure 21) :

Paramètres : Er : YAG : **2940 nm**
Tip : **600µm** et **9mm**
Mode : SuperShortPulse (SSP) = **50µs**
Puissance : **20mJ – 0,3W**
Fréquence : **15Hz**
Spray : **Air/eau**

Protocole de nettoyage à renouveler tant que des débris remontent à la surface :

- 1 seringue d'EDTA 17% + 30sec d'activation PIPS puis 60sec de temps de repos,
- 1 seringue de sérum physiologique + 30sec d'activation PIPS.

Protocole de désinfection :

- 1 seringue de NaOCl 5,25% + 30sec d'activation PIPS, suivi de 60sec de temps de repos, cycle à renouveler 3 fois,
- 1 seringue de sérum physiologique + 30sec d'activation PIPS.

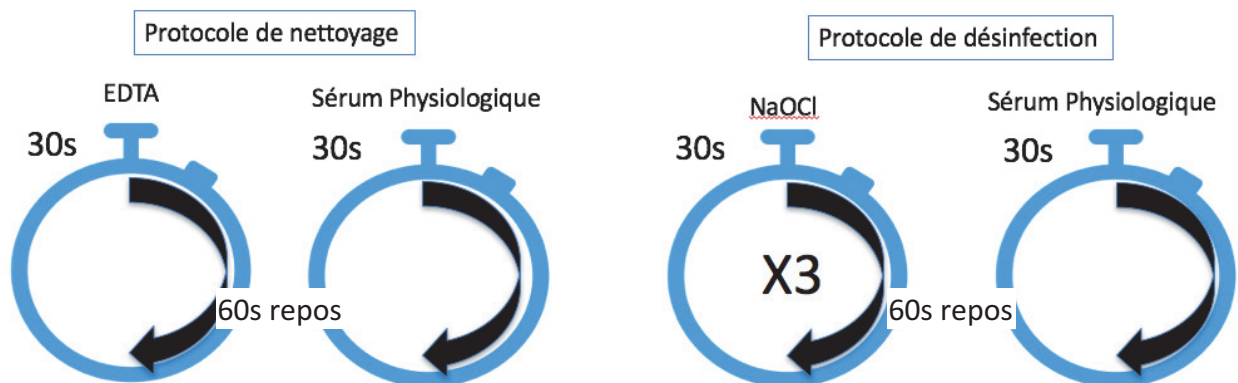


Figure 21 : Protocole PIPS avec le laser Er : YAG Light-Walker AT Fotona®, selon Golob. (97)

D. SWEEPS : Shock Wave Enhanced Emission Photoacoustic Streaming

Dans son article de 2017, Lukac et al. (98) présente pour la première fois l'innovation SWEEPS. Cette nouveauté pour l'Er : YAG a été développée spécialement pour améliorer l'efficacité de nettoyage et la désinfection endodontique de la PIPS.

Typiquement, la croissance de la deuxième bulle exerce une pression sur la bulle qui s'effondre, ce qui conduit à une accélération de l'effondrement de la bulle initiale mais aussi des bulles secondaires créant des ondes de chocs sur les parois des canaux étroits améliorant ainsi l'efficacité de l'élimination de la boue dentinaire et la désinfection. (Figure 22)

Dans des canaux étroits, le facteur d'amplification est plus élevé que dans un espace plus grand. Ainsi dans des canaux de diamètre inférieurs à 4mm, il a été démontré que le facteur d'amplification peut être doublé.

Fotona® a développé un mode Auto SWEEPS dans lequel 2 impulsions laser sont séparées continuellement de 10 μ s garantissant une plage de repos d'au moins 50 μ s nécessaire à la génération d'ondes de chocs primaires et secondaires. De plus, ce mode Auto SWEEPS limite les erreurs dues au positionnement approximatif de l'embout au centre du canal.

En résumé, la SWEEPS entraîne une amplification des effets connus de la technique PIPS.

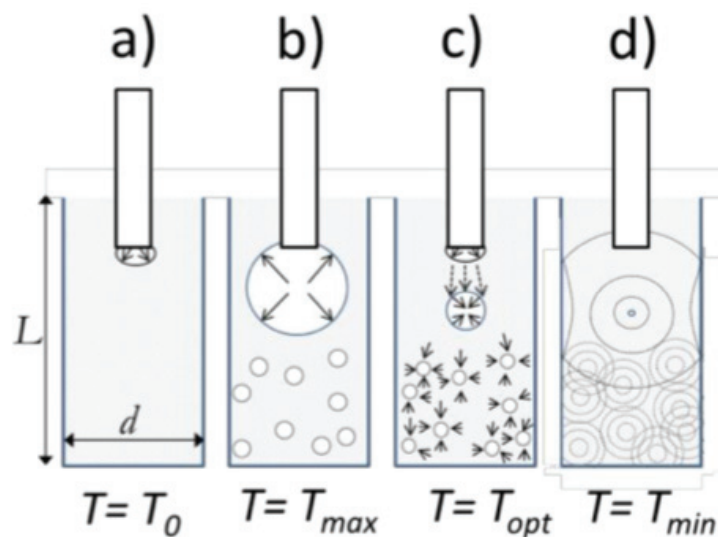


Figure 22 : Mode Auto SWEEPS générant des bulles créant des ondes de chocs. (a) Une bulle commence à se développer à l'extrémité de l'embout, suite à l'impulsion laser. (b) La bulle primaire se dilate jusqu'à atteindre son volume maximal, avec création de bulles secondaires plus petites. (c) Durant l'effondrement de la bulle primaire, une seconde bulle commence à se développer à l'extrémité de l'embout, suite à la seconde impulsion laser. (d) Lorsque l'émission de la seconde bulle est correctement chronométrée, la pression engendrée par la seconde bulle force la bulle primaire et les bulles secondaires à un violent effondrement, générant l'émission d'ondes de chocs primaires et secondaires allant plus profondément dans le canal. (98)

➤ Paramètres SWEEPS avec le laser Er : YAG Light-Walker AT Fotona® selon Lukac :
(98)

Paramètres : Er : YAG : **2940 nm**
 Tip : **600µm** et **9mm**
 Mode : **Auto SWEEPS = 50µs**
 Puissance : **20mJ – 0,3W**
 Fréquence : **15Hz**
 Spray : **Air/eau**

E. Tableau Récapitulatif des différentes techniques d'activation Laser des solutions d'irrigation

Technique Laser	Effets du laser	Position du tip	Taille du tip	Design du tip	Préparation apicale
PDT	Photo-thermique	A 1mm de l'apex	200-300 microns	<u>End-firing</u>	ISO 30-40
LAI	Photo-thermique, Cavitation	Tiers moyen, A 5mm de l'apex	200-300-400 microns	Plat / conique	ISO 30-40
PIPS	Photo-thermique, Photo-mécanique, Photo-acoustique, Cavitation	Chambre pulpaire	400-600 microns	Conique, effilé et dénudé	ISO 20-25
SWEEPS	Photo-thermique, Photo-mécanique, Photo-acoustique, Cavitation, Ondes de chocs	Chambre pulpaire	600 microns	Conique	ISO 20-25

V. BUT DE L'ETUDE

Le but de cette étude est d'évaluer au Microscope Electronique à Balayage (MEB) l'élimination des boues dentinaires dans le tiers apical de racines courbes après activation des solutions d'irrigation avec le laser Er : YAG.

L'objectif est d'évaluer la qualité de l'agitation des solutions d'irrigations en comparant la technique PIPS (Fotona®), Photoacoustique (Syneron®) et SWEEPS (Fotona®).

VI. MATERIEL ET METHODES

A. Sélection des dents

Dix-sept dents indemnes de lésions carieuses, fraîchement extraites pour des raisons parodontales, prothétiques ou orthodontiques, soit 36 canaux courbés à plus de 20°, mesurés selon la technique de Schneider sur clichés radiographiques (99).

Sont exclues, les dents non intactes, cariées, fissurées ou fracturées ; les canaux présentant une courbure inférieure à 20° ; les dents présentant des résorptions internes ou externes ; les dents déjà traitées endodontiquement.

Après un nettoyage à la compresse, les dents sont conservées dans une solution de formaldéhyde à 4% tamponnée (fixateur), tout au long de l'étude.

B. Système de mise en forme : TF Adaptive™ (Kavo-Kerr® France)

Les TF Adaptives™ (Twisted File Adaptive) sont des instruments en NiTi fabriqués par torsion à chaud de la lame. Le traitement de surface, qui est une désoxydation, protège l'intégrité de la lime et accroît la durabilité des instruments et les performances de coupe. Ce procédé de fabrication permet d'augmenter la résistance à la fracture des instruments comparés aux MTwo, Profile ou K3. (100)(101) (Figure 23)

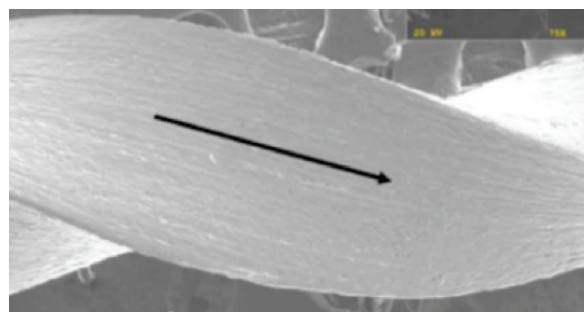


Figure 23 : TF Adaptive™ vu au MEB. Instrument torsadé pour maintenir la structure du grain.

La section est triangulaire ce qui lui procure une flexibilité maximale, moins de stress en torsion et augmente l'efficacité de coupe. (102) (Figure 24)

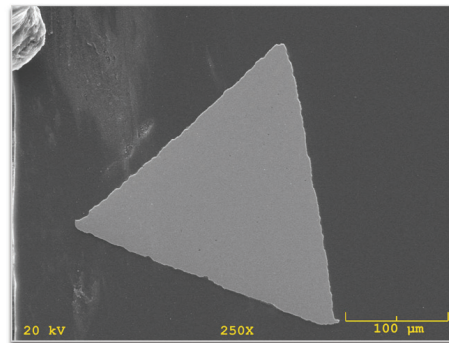


Figure 24 : Section triangulaire des instruments TF Adaptive™ au MEB.

Son pas est variable, diminuant ainsi l'effet de vissage et permettant une remontée efficace de débris tout en réduisant le stress en torsion. (Figure 25)



Figure 25 : Pas variable des instruments TF Adaptive™.

Sa pointe est une pointe de sécurité, comme beaucoup d'instruments de préparation, ce qui diminue les risques de déviation de trajectoire. (103)(104) (Figure 26)

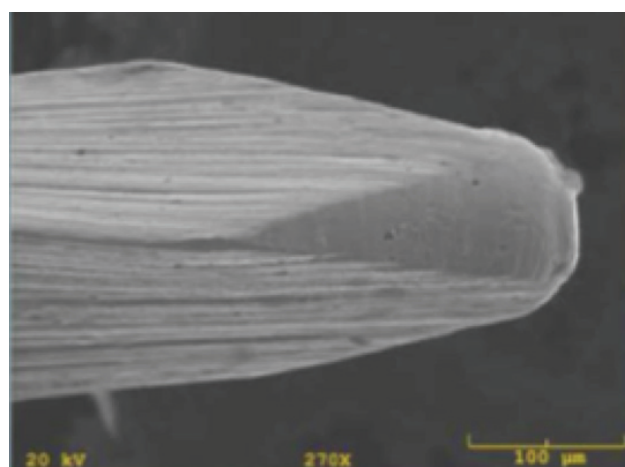


Figure 26 : Pointe de sécurité des instruments TF Adaptive™ au MEB.

Le fabricant propose 2 séquences instrumentales avec chacune 3 instruments : (Figure 27)

- La séquence SM : #20/.04% - #25/ .06% - # 35/ .04%
- La séquence ML : #25/ .08% - # 35/ .06% - #50/ .04%

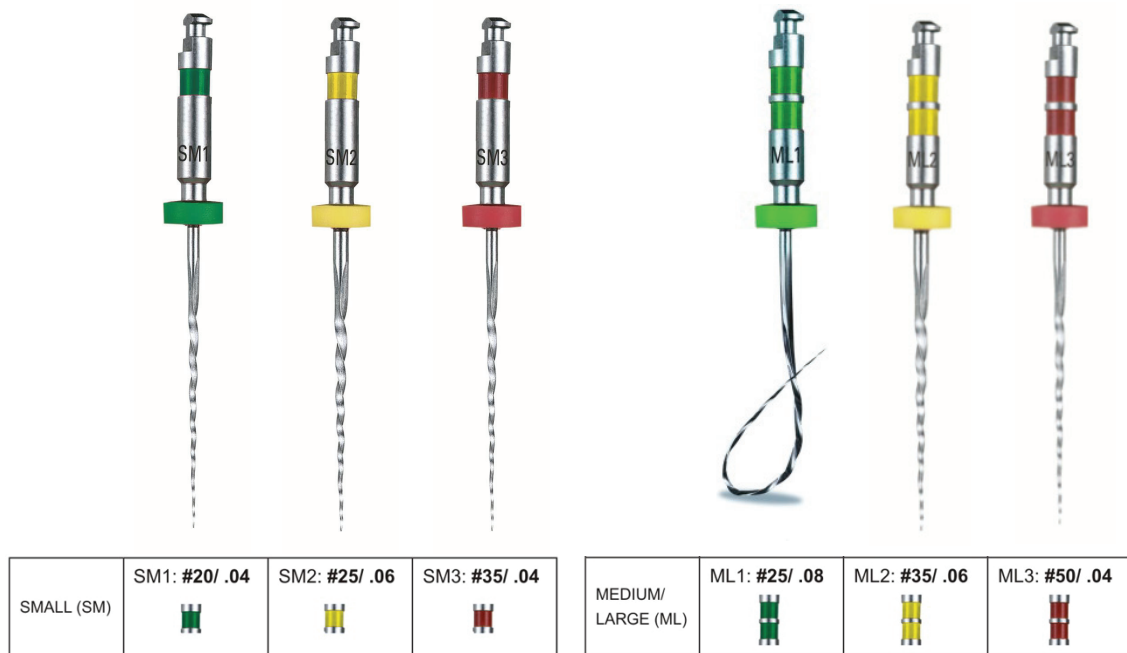


Figure 27 : Séquences instrumentales TF Adaptive™ SM et ML.

Lorsque l'instrument rencontre une contrainte lors de la préparation canalaire, la technologie **rotation « adaptative »** permise par le moteur SybronEndo® alterne un mouvement réciproque avec une amplitude de 370° dans le sens horaire et jusqu'à 50° dans le sens anti-horaire. Si aucune contrainte n'est appliquée sur l'instrument, le moteur se remet en rotation continue pendant 600° dans le sens horaire. Ce mouvement en réciprocité diminue la fatigue cyclique des instruments. (101) (Figure 28)

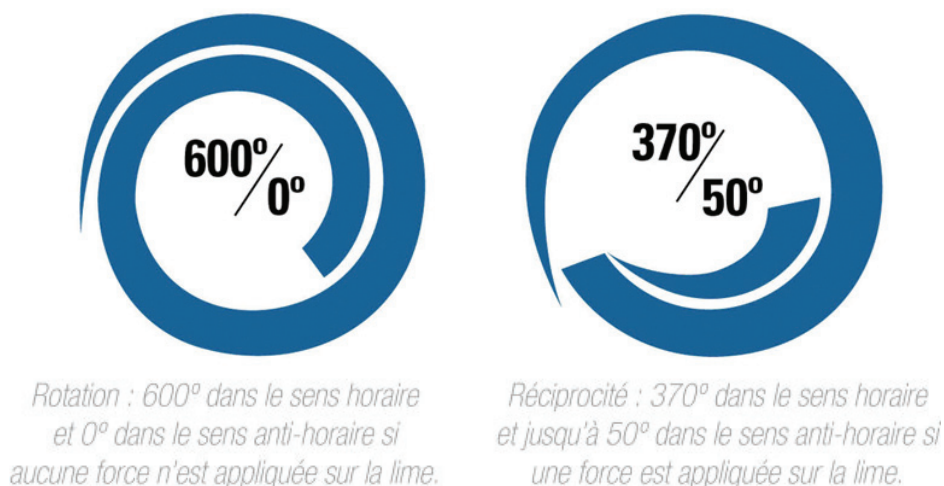


Figure 28 : Mouvement particulier en rotation « adaptative » alternant rotation continue si aucune force n'est appliquée à l'instrument, et réciprocité si une force est appliquée à l'instrument.

C. Protocole de mise en forme canalair

Les dents sont préparées sous microscope par un opérateur unique.

La cavité d'accès est réalisée à l'aide d'une fraise boule diamantée (Komet) et d'une EndoZ (Dentsply Maillefer).

Les canaux sont cathétérisés à l'aide d'une lime manuelle MMC n°10 pré-courbée (MicroMega®). La longueur de travail est déterminée en éliminant 0,5 mm dès que la lime est visible par le foramen apical.

On utilisera pour l'étude la séquence SMALL (SM) de TF Adaptive™ (Kavo-Kerr®) en rotation « adaptative » jusqu'au diamètre 35/100, conicité 4 % (SM3), 5 mouvements en appui pariétal par canal. (Figure 29)



Figure 29 : Moteur SybronEndo permettant l'utilisation des instruments TF Adaptive™ (Kavo-Kerr®) en rotation « adaptative ». Séquence instrumentale SM : SM1 #20.04 (bague verte), SM2 #25.06 (bague jaune), SM3 #35.04 (bague rouge).

Chaque canal sera irrigué avec 1ml d'hypochlorite de sodium à 2,5%, entre chaque passage d'instrument, à l'aide d'une seringue et d'une aiguille de 30 jauge à perforation latérale stoppée à LT-2mm.

Une lime de perméabilité MMC n°10 (LT+1mm) sera passée entre chaque instrument pour assurer la perméabilité.

La séquence opératoire pour un canal est la suivante :

- Lime manuelle MMC n°10 : cathétérisme dans NaOCl 2,5%
- 1 ml NaOCl 2,5%
- Lime manuelle MMC n°15
- 1 ml NaOCl 2,5%
- **SM1** : #20/ .04 (bague verte)
- 1 ml NaOCl 2,5%
- Récapitulation à la lime MMC n°10
- **SM2** : #25/ .06 (bague jaune)
- 1 ml NaOCl 2,5%
- Récapitulation à la lime MMC n°10
- **SM3** : #35/ .04 (bague rouge)
- 1 ml NaOCl 2,5%
- Récapitulation à la lime MMC n°10
- Jaugeage du diamètre apical à l'aide de limes successives 20.02, 25.02, 30.02, 35.02 jusqu'à trouver celle qui bloque à la LT, définissant notre diamètre apical.
- Calibrage du maître cône et contrôle de la résistance au retrait du maître cône calibré.

Après la mise en forme canalaire, les dents sont réparties en 3 groupes de 10 canaux de façon aléatoire. (Figure 30)



Figure 30 : Répartition aléatoire des dents préparées dans les 3 groupes.

D. Protocole d'irrigation finale selon les groupes (Photoacoustique Syneron® – PIPS Fotona® – SWEEPS Fotona® – Témoin+ EndoActivator® – Témoin- Seringue)

L'activation aux lasers Er : YAG se fait sous spray d'eau constant, pour pallier à la vaporisation de la solution d'irrigation.

- **Groupe 1 - Photoacoustique (Syneron®) : 10 canaux**

Une solution d'EDTA 17% (1 ml) sera laissée en place pendant 1min puis activée 30 secondes à l'aide du laser Er : YAG LiteTouch™ de chez Syneron® (Mode Soft Tissue, 0.5W, 50mJ, 10Hz) et de l'embout photoacoustique Syneron® (diamètre de 600 microns, longueur de 17mm) avec un mouvement lent et circulaire dans la chambre pulpaire. (Figure 31 et 32)

Une nouvelle activation de 30 secondes sera réalisée après un temps de relaxation de 60 secondes entre les deux activations où à nouveau, une irrigation avec 1 ml d'EDTA 17% sera réalisée.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal pour éliminer la totalité de l'EDTA.

Irrigation avec 1 ml d'hypochlorite de sodium à 2,5%, puis activation 2 fois 30 secondes avec 60 secondes de relaxation entre les deux activations, soit au total 2 ml de NaOCl.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal.

Contrôle de la résistance au retrait du maître cône calibré.

Puis séchage des canaux à l'aide de pointes de papier stériles 35/100.

Conservation des échantillons dans la solution de formaldéhyde tamponné à 4% pour fixation.

Paramètres : Er : YAG : **2940 nm**

Tip : **600µm et 17 mm**

Mode : Soft Tissue = **50µs**

Puissance : **50mJ – 0,5W**

Fréquence : **10Hz**

Spray : **Air/eau**



Figure 31 : Embout Photoacoustique Syneron® (600µm – 17mm) monté sur la pièce à main du laser LiteTouch™ de chez Syneron® utilisé lors de l'étude pour le groupe Photoacoustique.

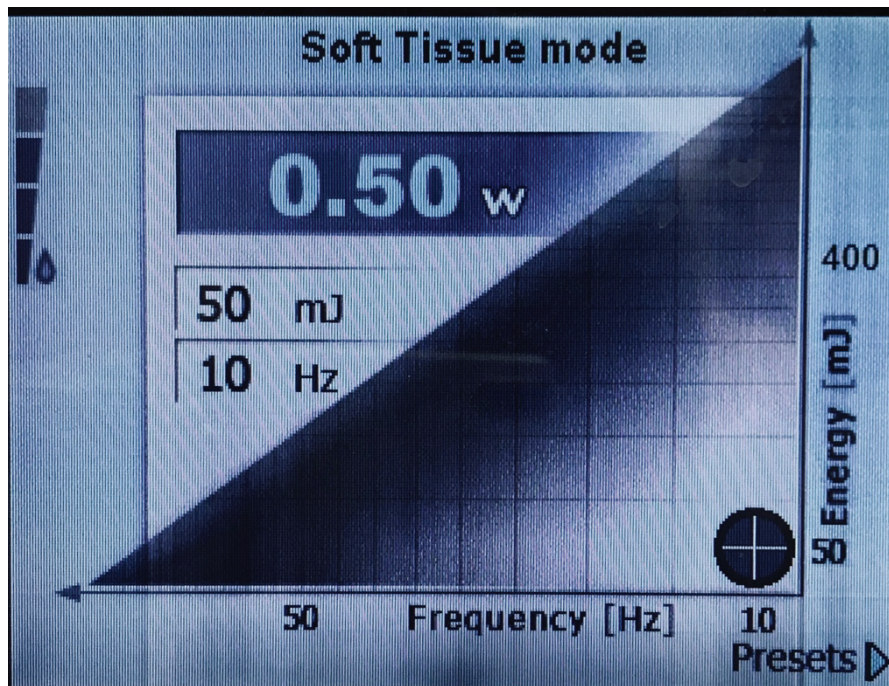


Figure 32 : Réglages Photoacoustique du laser Er : YAG LiteTouch™ de Syneron®.

- **Groupe 2 - PIPS (Fotona®)** : 10 canaux

Le même protocole sera utilisé que pour le groupe 1 avec le laser Er : YAG LightWalker ATS de Fotona® et l'embout PIPS monté sur la pièce à main H14 de Fotona®. (Figure 33, 34 et 36)

Paramètres : Er : YAG : **2940 nm**
Tip : **600µm** et **9mm**
Mode : SuperShortPulse (SSP) = **50µs**
Puissance : **20mJ – 0,3W**
Fréquence : **15Hz**
Spray : **Air/eau**



Figure 33 : Embout PIPS de Fotona® (diamètre : 600µm et longueur : 9mm).



Figure 34 : Réglages PIPS du laser Er : YAG LightWalker ATS™ Fotona®.

- **Groupe 3 - SWEEPS (Fotona®)** : 10 canaux

Le même protocole sera utilisé que pour le groupe 1 avec le laser Er:YAG LightWalker ATS de Fotona® et l'embout SWEEPS monté sur la pièce à main H14 de Fotona®. (Figure 35 et 36)

Paramètres : Er : YAG : **2940 nm**
 Tip : **600µm** et **9mm**
 Mode : Auto SWEEPS = **50µs**
 Puissance : **20mJ – 0,3W**
 Fréquence : **15Hz**
 Spray : **Air/eau**



Figure 35 : Réglages SWEEPS du laser Er : YAG LightWalker ATS™ Fotona®.



Figure 36 : Laser LightWalker ATS™ de Fotona® utilisé lors de l'étude pour la PIPS et la SWEEPS.

- **Témoin Positif - EndoActivator® (Dentsply-Sirona) : 3 canaux**

Une solution d'EDTA 17% (1 ml) sera laissée en place pendant 1min puis activée 30 secondes à l'aide de l'embout 25/100mm (bague rouge) monté sur l'EndoActivator® (Dentsply-Sirona).

Une nouvelle activation de 30 secondes sera réalisée après un temps de relaxation de 60 secondes entre les deux activations où à nouveau, une irrigation avec 1 ml d'EDTA 17% sera réalisée.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal pour éliminer la totalité de l'EDTA.

Irrigation avec 1 ml d'hypochlorite de sodium à 2,5%, puis activation 2 fois 30 secondes avec 60 secondes de relaxation entre les deux activations, soit au total 2 ml de NaOCl.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal.

Contrôle de la résistance au retrait du maître cône calibré.

Puis séchage des canaux à l'aide de pointes de papier stériles 35/100.

Conservation des échantillons dans la solution de formaldéhyde tamponné à 4% pour fixation.

- **Témoin Négatif - Seringue (3ml) + Aiguille à ouverture latérale (30 gauge) : 3 canaux**

Une solution d'EDTA 17% (2 ml) sera distribuée à l'aide d'une seringue et d'une aiguille à ouverture latérale pendant 2min.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal pour éliminer la totalité de l'EDTA.

Puis distribution de 2 ml d'hypochlorite de sodium 2,5% pendant 2min.

Rinçage avec 2 ml de sérum physiologique par canal.

Contrôle de la résistance au retrait du maître cône calibré.

Puis séchage des canaux à l'aide de pointes de papier stériles 35/100.

Conservation des échantillons dans la solution de formaldéhyde tamponné à 4% pour fixation.

E. Préparation des échantillons pour leur examen au MEB

Les cavités d'accès sont obturées par du Cavit™ 3M ESPE pour éviter l'infiltration de poussières dans les canaux lors de la coupe des échantillons. Les apex sont obturés par de la cire collante.

Deux rainures longitudinales sont réalisées sur les faces mésiales et distales des racines à l'aide d'un disque diamanté, sans pénétrer dans le canal.

Les racines sont cassées en deux longitudinalement à l'aide d'un ciseau à bois et d'un maillet.

Chaque hémiracine est montée sur des plots d'aluminium, étiquetée puis est mise à dessiquer durant 24h dans une cloche à dessiccation, en attendant de les observer au MEB.
(Figure 37)

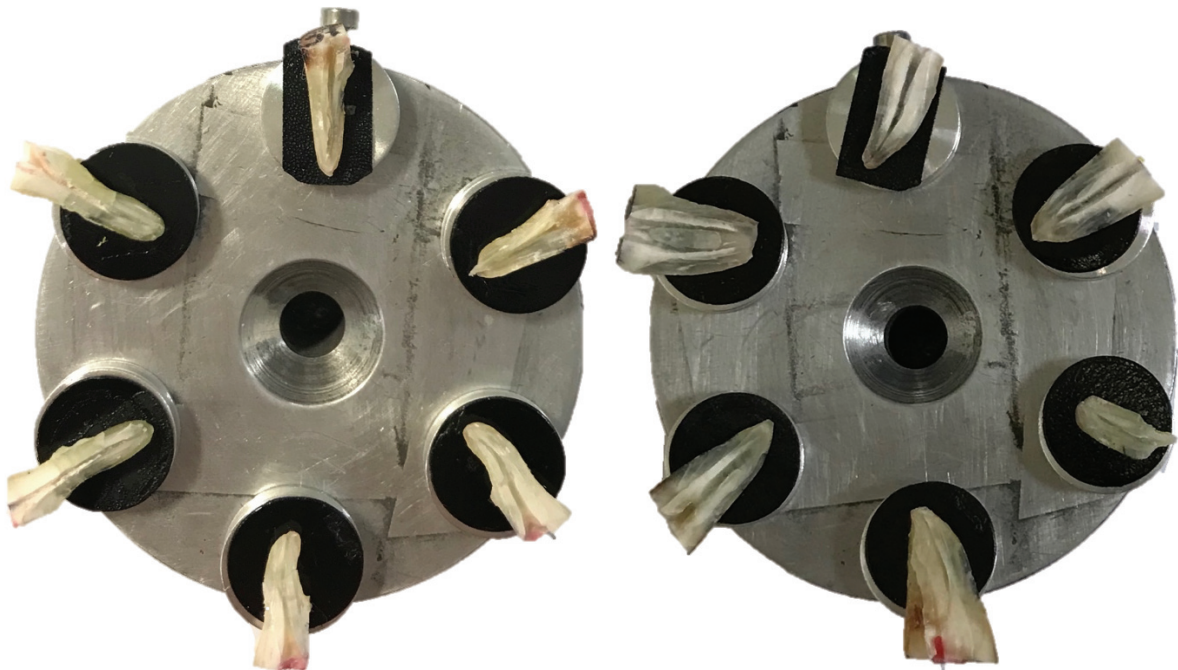


Figure 37 : Hémiracines dessiquées et montées sur les plots - échantillons prêts à être observés au MEB

F. Méthode d'observation : Le Microscope Electronique à Balayage



Figure 38 : Microscope Electronique à Balayage Philips XL30 ESEM du CEMEF à l'Ecole des Mines de Sophia-Antipolis.

Chaque échantillon est observé au Microscope Electronique à Balayage (MEB) Philips XL30 en mode ESEM (Environnemental Scanning Electron Microscope). (Figure 38) Ce mode environnemental en vide partiel (10^{-4} Pa) ne nécessite pas une métallisation de nos échantillons, et limite leur déshydratation.

Les réglages du MEB sont : une puissance de 25 kV, à un grossissement de 2000 fois en mode environnemental (vide partiel) à 0,4 mBar. La distance de travail est de 20 micromètres. (Figure 39)

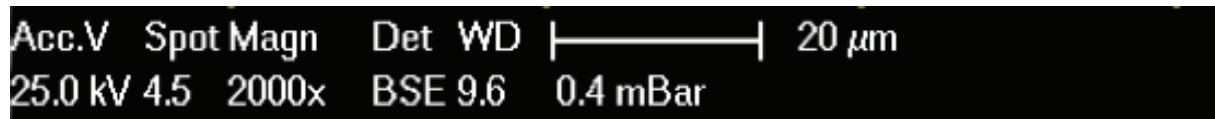


Figure 39 : Réglage du MEB pour l'observation des échantillons et la prise de photo à un grossissement de x 2000.

Après observation plus large de la zone apical à plus faible grossissement, une photo de l'état de surface canalaire est prise à un grossissement de x 2000 dans le tiers apical, précisément entre 1 à 2mm de l'apex. Plusieurs images sont réalisées, et l'image la plus représentative de la zone observée est conservée.

Les images obtenues sont enregistrées grâce au logiciel Microscope Control®.

G. Evaluation de la propreté des surfaces

Les images ainsi acquises sont analysées par la **méthode des scores** qui permet d'évaluer l'absence ou la présence plus ou moins importante de boue dentinaire dans les tubuli dentinaires. (Figure 40)

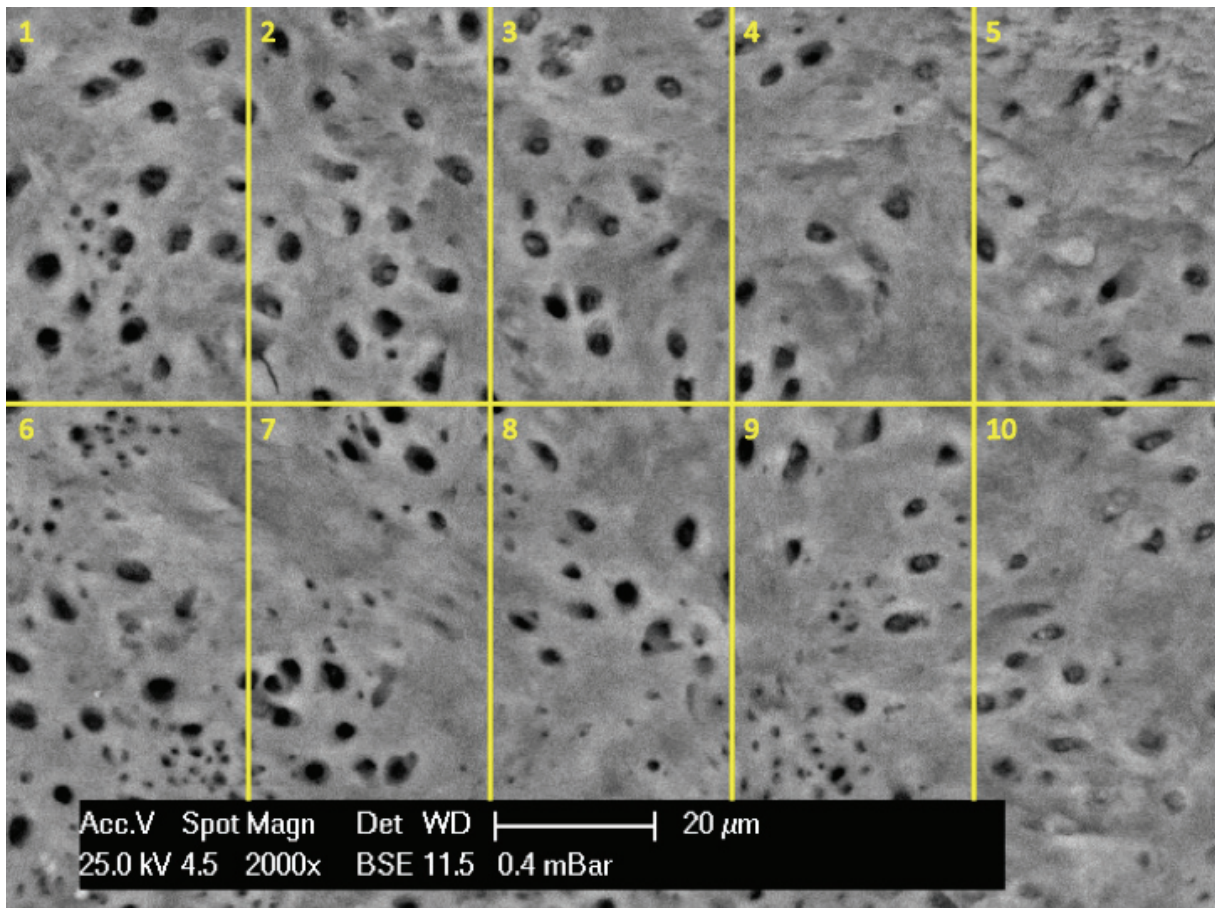


Figure 40 : Exemple de photo obtenue au MEB à un grandissement x2000, divisée en 10 secteurs égaux par une grille.

Une grille divise l'image à analyser en 10 zones égales. Un score compris entre 0 et 3 est donné pour chaque zone en fonction de la propreté, selon le protocole élaboré par Rome (1985)(105) :

- **Score 0** : Pas de boue dentinaire avec tous les tubuli dentinaires ouverts et vides de tout débris.
- **Score 1** : Boue dentinaire présente seulement dans les ouvertures des tubuli.
- **Score 2** : Fine couche de boue dentinaire recouvrant la surface canalaire et les ouvertures des tubuli.
- **Score 3** : Couche épaisse de boue dentinaire masquant les ouvertures de tubuli.

Trois évaluateurs (des endodontistes confirmés) indépendants à l'étude ont été sélectionnés pour scorer les images en aveugle, sans connaître la technique d'activation des solutions d'irrigation employée.

Les évaluateurs ont été calibrés avec des images types correspondants aux différents scores. La méthode des scores leur a été expliquée.

La notation s'est faite sur un fichier Power Point présentant de manière randomisée les 36 images MEB, sans qu'ils sachent le type d'activation qui avait été utilisée.

L'ensemble des notes obtenues par zone et par évaluateurs a été consigné dans un tableur Excel afin d'obtenir les moyennes par images et par évaluateur, ainsi qu'une moyenne globale par image tous évaluateurs confondus pour réaliser l'analyse statistique.

H. Analyse des Résultats

La note pour chaque image est obtenue en effectuant la moyenne de toutes les notes données par zone de tous les évaluateurs.

L'**hypothèse nulle H0** choisie est que toutes les techniques sont équivalentes. Ce qui signifie que toutes les moyennes sont égales et qu'il n'y a pas de différence significative entre les différents moyens d'activation des solutions d'irrigation.

I. L'analyse statistique

Les notes recueillies nous permettent de réaliser l'analyse statistique, afin d'évaluer les différents états de surface obtenus avec chacun des systèmes d'activation des solutions d'irrigations et comparer leur efficacité les uns par rapport aux autres.

Un **test du coefficient Kappa de Cohen** a été réalisé pour évaluer l'agrément entre les évaluateurs. Grâce au logiciel AnaStats®, un K de 0,6158 a été obtenu, ce qui indique un agrément important entre les 3 évaluateurs. La valeur de p correspondante ($< 0,001$) est significative, ce qui indique que l'agrément entre les évaluateurs s'écarte d'une notation au hasard.

Les tests statistiques utilisés reposent sur des analyses non paramétriques :

- Le **test de Kruskal & Wallis** pour comparer les scores entre les groupes,
- Et le **U-test de Mann & Whitney** pour comparer les échantillons 2 à 2, si le premier test s'avère significatif.

Les différences entre les résultats sont considérées comme **statistiquement significatives** si la probabilité p que le résultat soit dû au hasard est alors inférieure à 5%.

Toutes les analyses statistiques ont été faites grâce au logiciel Statview®.

VII. RESULTATS

- **L'analyse non paramétrique de Kruskal & Wallis** nous permet de comparer les scores des différents moyens d'activation. Pour tous les évaluateurs confondus et pour tous les types d'activation, le p value obtenue est égale à **0,0020** donc p est **statistiquement significatif** car inférieur à 0,05. Cela signifie que notre hypothèse n'est pas vérifiée : les différents systèmes d'activation ne sont pas identiques et produisent des effets différents.

Kruskal-Wallis Test for score tous evaluateurs

Grouping Variable: type d'activation

DF	4
# Groups	5
# Ties	16
H	16,942
P-Value	,0020
H corrected for ties	18,590
Tied P-Value	,0009

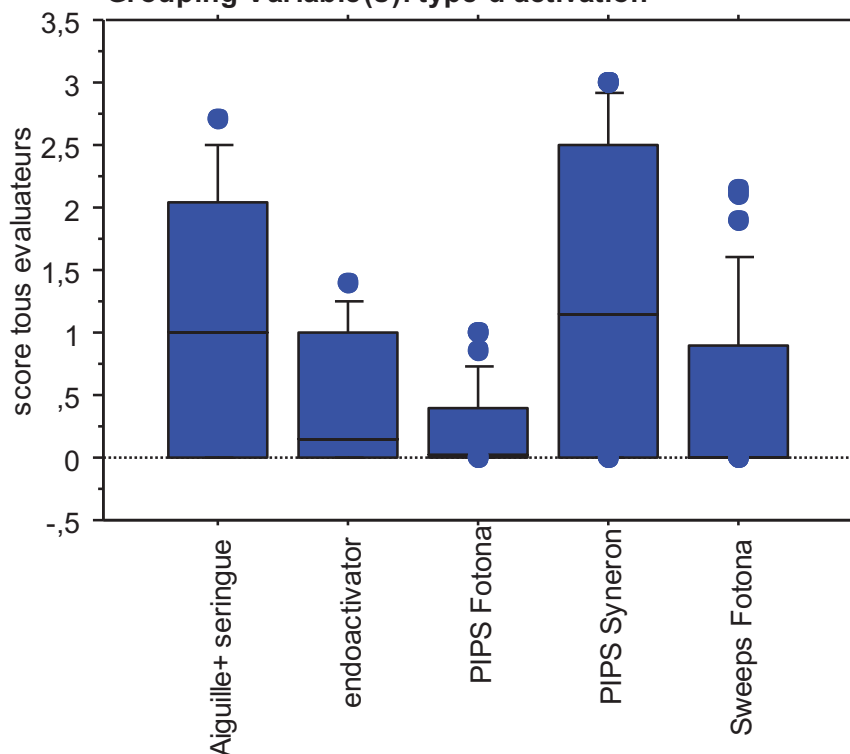
Kruskal-Wallis Rank Info for score tous evaluateurs

Grouping Variable: type d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
Aiguille+ seringue	9	601,000	66,778
endoactivator	9	473,000	52,556
PIPS Fotona	30	1306,000	43,533
PIPS Syneron	30	2153,500	71,783
Sweeps Fotona	30	1352,500	45,083

Box Plot

Grouping Variable(s): type d'activation



- **U-Test de Mann & Whitney pour comparer Aiguille + seringue et PIPS Fotona :**

On remarque qu'il y a une **différence significative** en faveur de la PIPS Fotona (**p = 0,0343**). L'effet PIPS de Fotona® élimine mieux la boue dentinaire que la seringue et l'aiguille dans les derniers millimètres apicaux des racines courbes. (Figure 41)

Moyenne des scores pour Aiguille + seringue : $1,089 \pm 1,017$ avec une moyenne maximum de 2,7 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour PIPS Fotona : $0,22 \pm 0,314$ avec une moyenne maximum de 1, et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for score tous evaluateurs
Grouping Variable: type d'activation

U	71,500
U Prime	198,500
Z-Value	-2,117
P-Value	,0343
Tied Z-Value	-2,231
Tied P-Value	,0257
# Ties	5

Mann-Whitney Rank Info for score tous evaluateurs
Grouping Variable: type d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
Aiguille+ seringue	9	243,500	27,056
PIPS Fotona	30	536,500	17,883

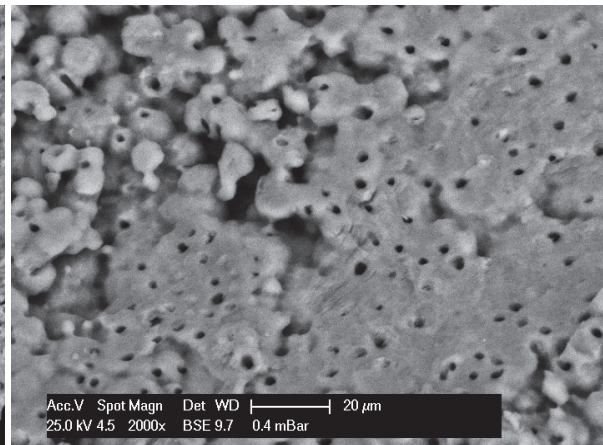
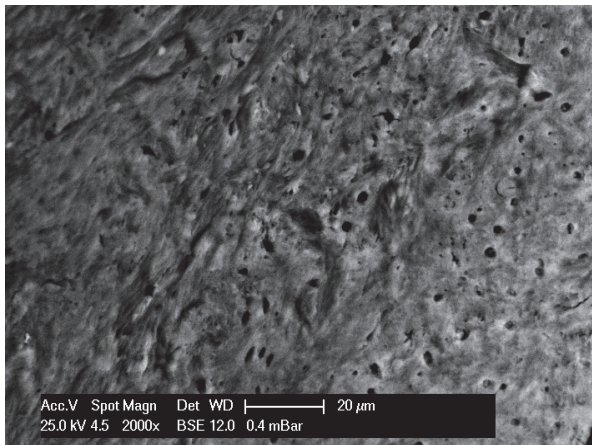
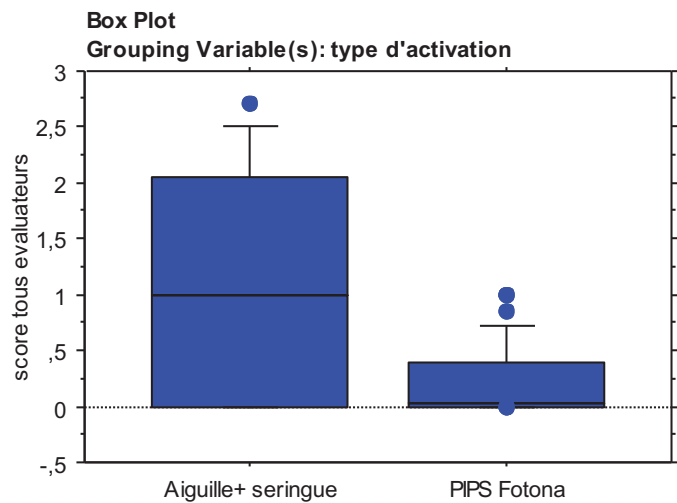


Figure 41 : Exemples d'images MEB obtenues. Aiguille + seringue : score = 1,63 (gauche), PIPS Fotona : score = 0,13 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer Aiguille + seringue et SWEEPS Fotona :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,830$). Cependant la médiane des valeurs est meilleure pour l'effet SWEEPS Fotona®. (Figure 42)

Moyenne des scores pour Aiguille + seringue : $1,089 \pm 1,017$ avec une moyenne maximum de 2,7 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour SWEEPS Fotona : $0,407 \pm 0,680$ avec une moyenne maximum de 2,150 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	83,000
U Prime	187,000
Z-Value	-1,733
P-Value	,0830
Tied Z-Value	-1,888
Tied P-Value	,0591
# Ties	4

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs conf
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
Aiguille+ seringue	9	232,000	25,778
Sw eeeps Fotona	30	548,000	18,267

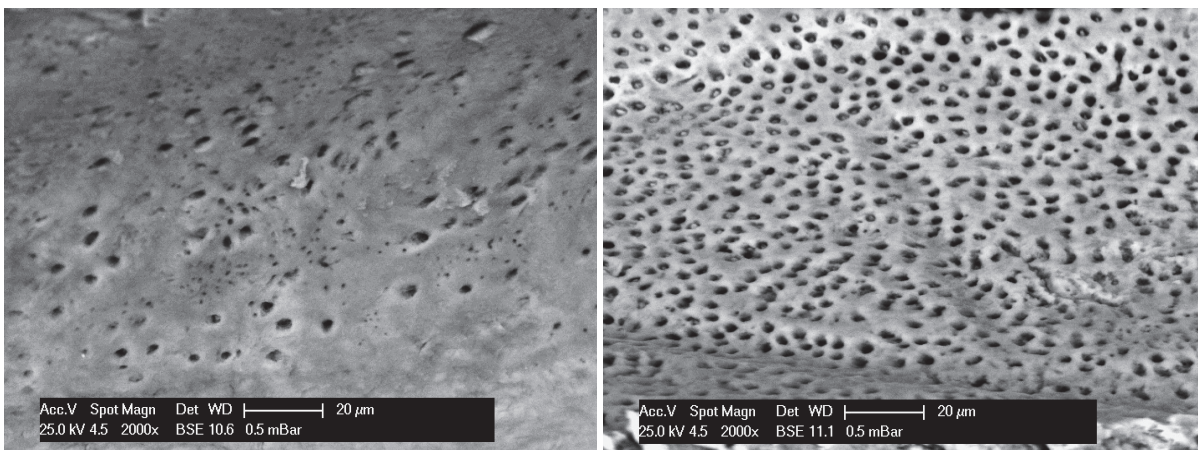
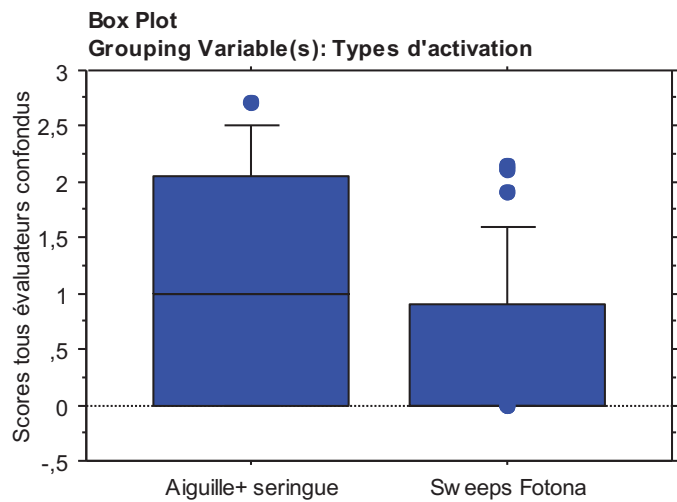


Figure 42 : Exemples d'images MEB obtenues. Aiguille + seringue : score = 1,3 (gauche), SWEEPS Fotona : score = 0,03 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer Aiguille + seringue et PIPS Syneron :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,5597$). De plus, la médiane des valeurs est sensiblement identique. (Figure 43)

Moyenne des scores pour Aiguille + seringue : $1,089 \pm 1,017$ avec une moyenne maximum de 2,7 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour PIPS Syneron : $1,245 \pm 1,109$ avec une moyenne maximum de 3 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	117,500
U Prime	152,500
Z-Value	-,583
P-Value	,5597
Tied Z-Value	-,591
Tied P-Value	,5548
# Ties	6

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
Aiguille+ seringue	9	162,500	18,056
PIPS Syneron	30	617,500	20,583

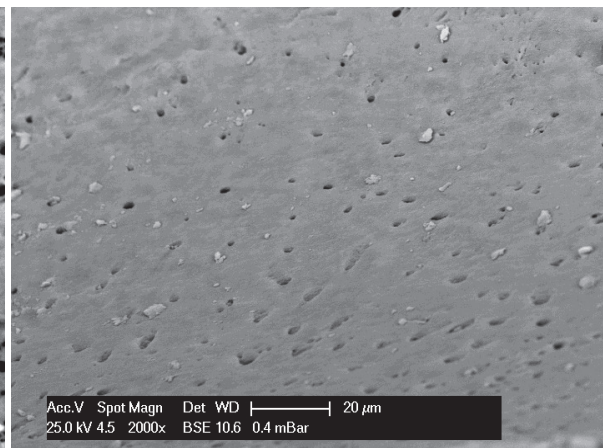
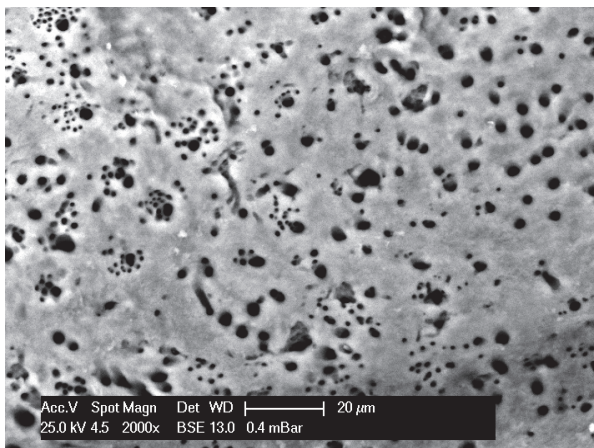
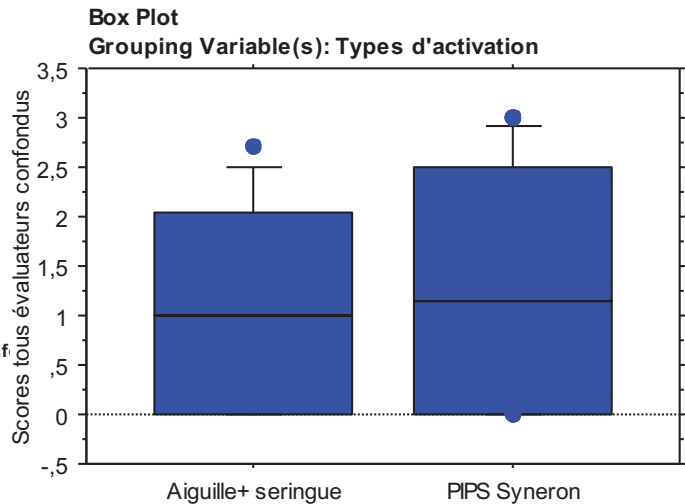


Figure 43 : Exemples d'images MEB obtenues. Aiguille + seringue : score = 0,33 (gauche), PIPS Syneron : score = 0,7 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer Aiguille + seringue et EndoActivator :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,2697$). Cependant la médiane des valeurs est meilleure pour l'EndoActivator®. (Figure 44)

Beaucoup de réserve sur ce résultat car il s'agit d'une dent à 3 canaux pour chaque type d'activation.

Moyenne des scores pour Aiguille + seringue : $1,089 \pm 1,017$ avec une moyenne maximum de 2,7 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour EndoActivator : $0,483 \pm 0,561$ avec une moyenne maximum de 1,4 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	28,000
U Prime	53,000
Z-Value	-1,104
P-Value	,2697
Tied Z-Value	-1,143
Tied P-Value	,2529
# Ties	2

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs conf
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
Aiguille+ seringue	9	98,000	10,889
endoactivator	9	73,000	8,111

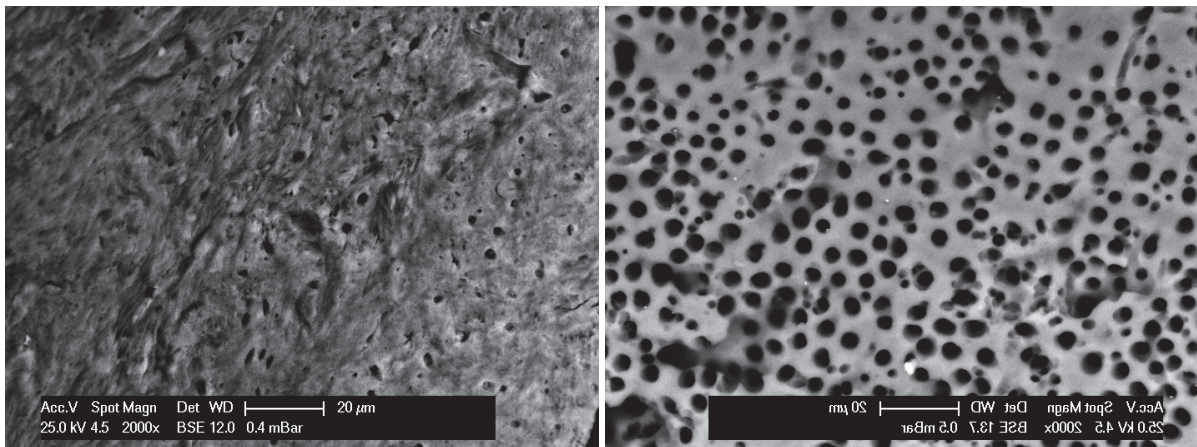
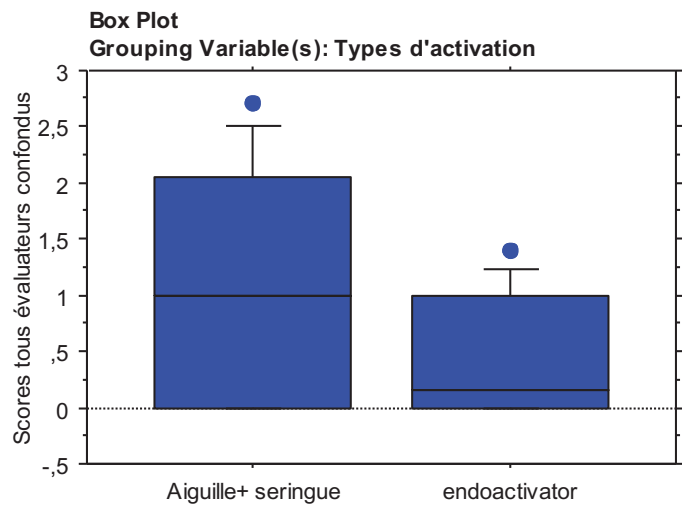


Figure 44 : Exemples d'images MEB obtenues. Aiguille + seringue : score = 1,63 (gauche), EndoActivator : score = 0 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer EndoActivator et PIPS Fotona :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,3173$). (Figure 45)

Moyenne des scores pour EndoActivator : $0,483 \pm 0,561$ avec une moyenne maximum de 1,4 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour PIPS Fotona : $0,22 \pm 0,314$ avec une moyenne maximum de 1, et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	105,000
U Prime	165,000
Z-Value	-1,000
P-Value	,3173
Tied Z-Value	-1,064
Tied P-Value	,2872
# Ties	4

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
endoactivator	9	210,000	23,333
PIPS Fotona	30	570,000	19,000

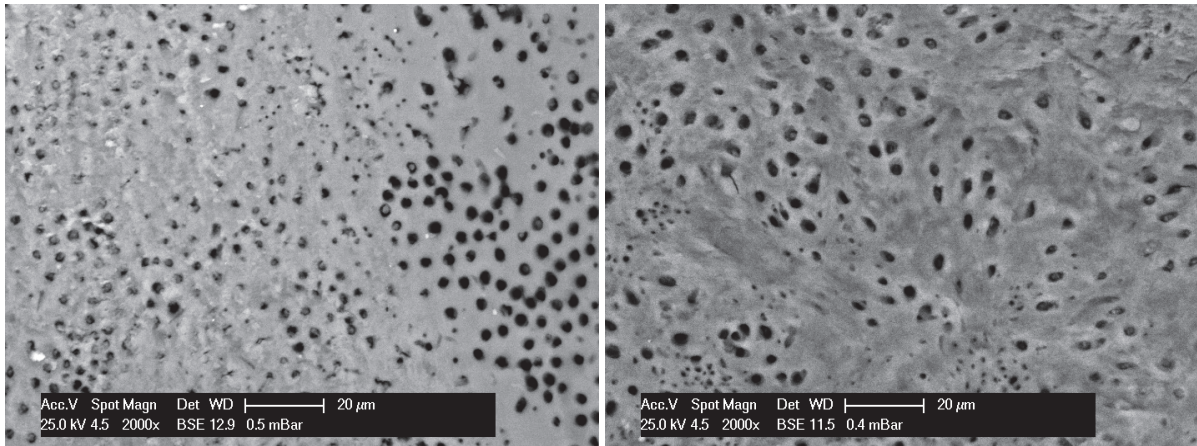
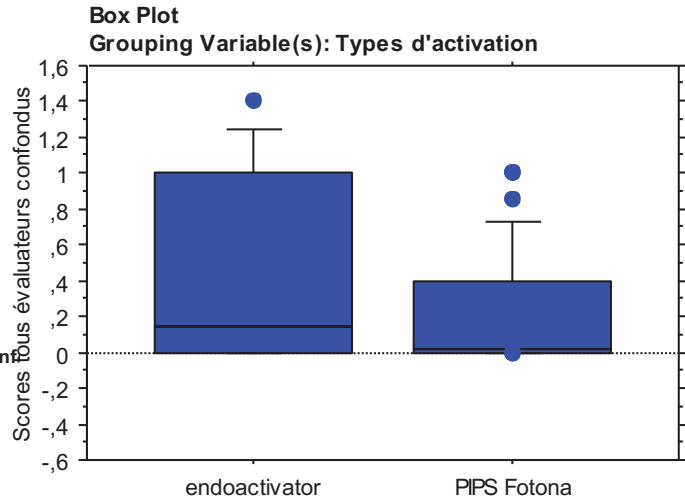


Figure 45 : Exemples d'images MEB obtenues. EndoActivator : score = 1,13 (gauche), PIPS Fotona : score = 0,07 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer EndoActivator et SWEEPS Fotona :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,5597$). (Figure 46)

Moyenne des scores pour EndoActivator : $0,483 \pm 0,561$ avec une moyenne maximum de 1,4 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour SWEEPS Fotona : $0,407 \pm 0,680$ avec une moyenne maximum de 2,150 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	116,000
U Prime	154,000
Z-Value	-,633
P-Value	,5265
Tied Z-Value	-,699
Tied P-Value	,4843
# Ties	4

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
endoactivator	9	199,000	22,111
Sw eeps Fotona	30	581,000	19,367

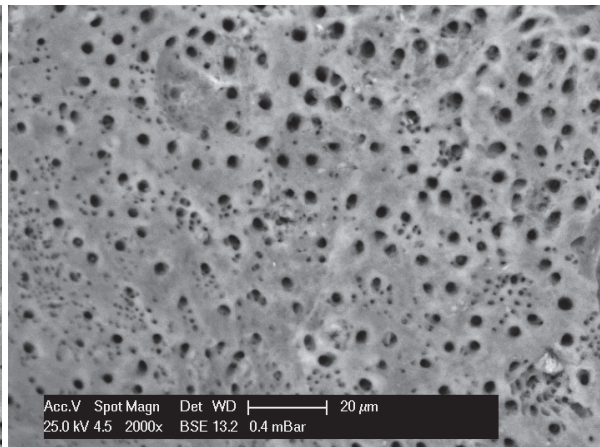
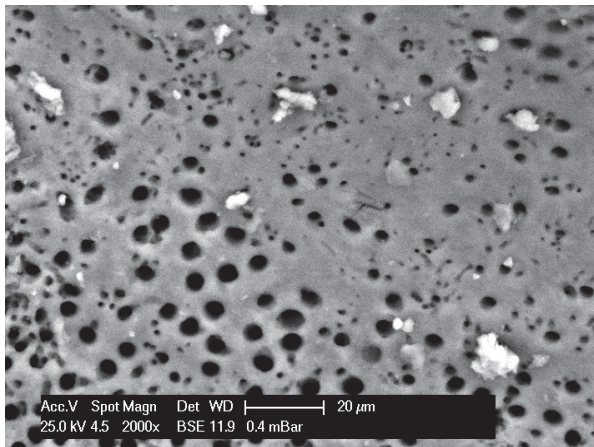
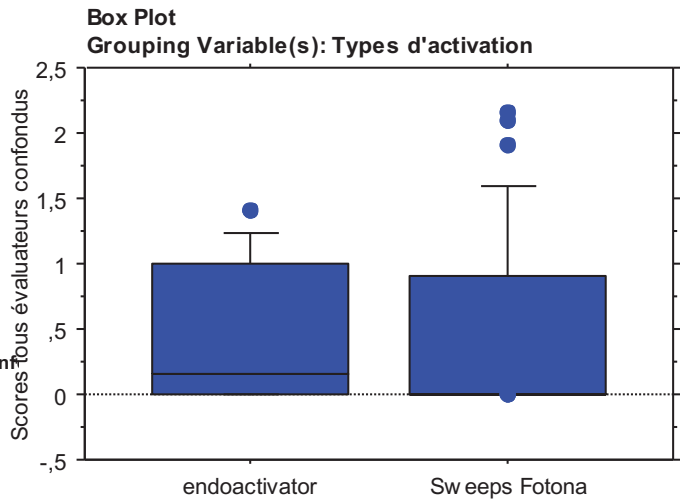


Figure 46 : Exemples d'images MEB obtenues. EndoActivator : score = 0,32 (gauche), SWEEPS Fotona : score = 0 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer EndoActivator et PIPS Syneron :**

Il n'y a pas de différence significative ($p = 0,0773$). Cependant la médiane des valeurs est meilleure pour l'EndoActivator®. (Figure 47)

Moyenne des scores pour EndoActivator : $0,483 \pm 0,561$ avec une moyenne maximum de 1,4 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour PIPS Syneron : $1,245 \pm 1,109$ avec une moyenne maximum de 3 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus

Grouping Variable: Types d'activation

U	82,000
U Prime	188,000
Z-Value	-1,767
P-Value	,0773
Tied Z-Value	-1,795
Tied P-Value	,0727
# Ties	7

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus

Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
endoactivator	9	127,000	14,111
PIPS Syneron	30	653,000	21,767

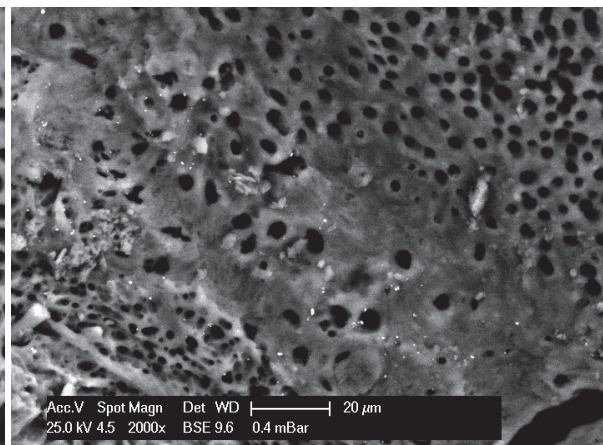
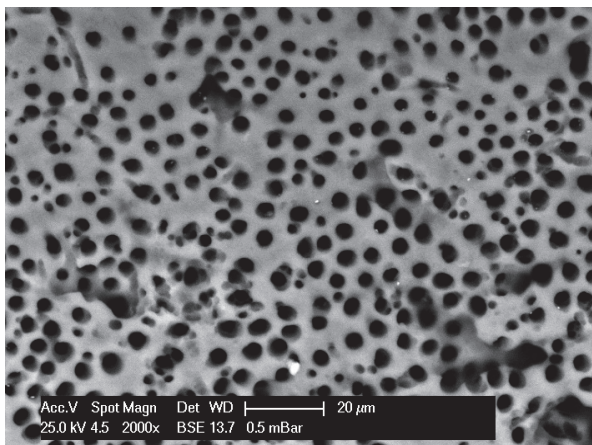
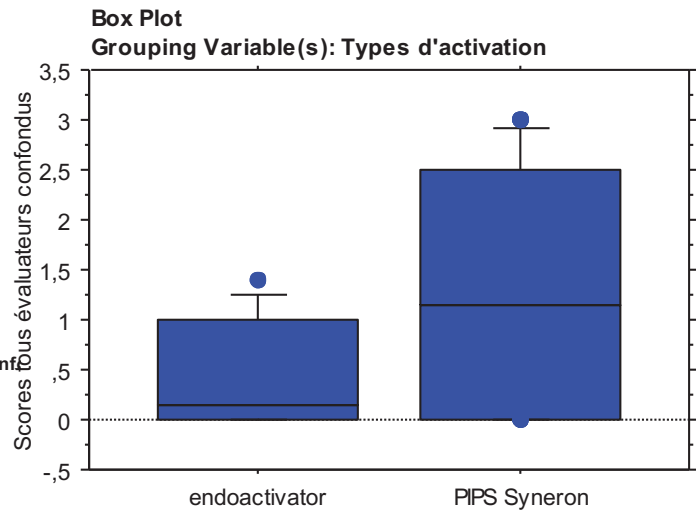


Figure 47 : Exemples d'images MEB obtenues. EndoActivator : score = 0 (gauche), PIPS Syneron : score = 0,27 (droite).

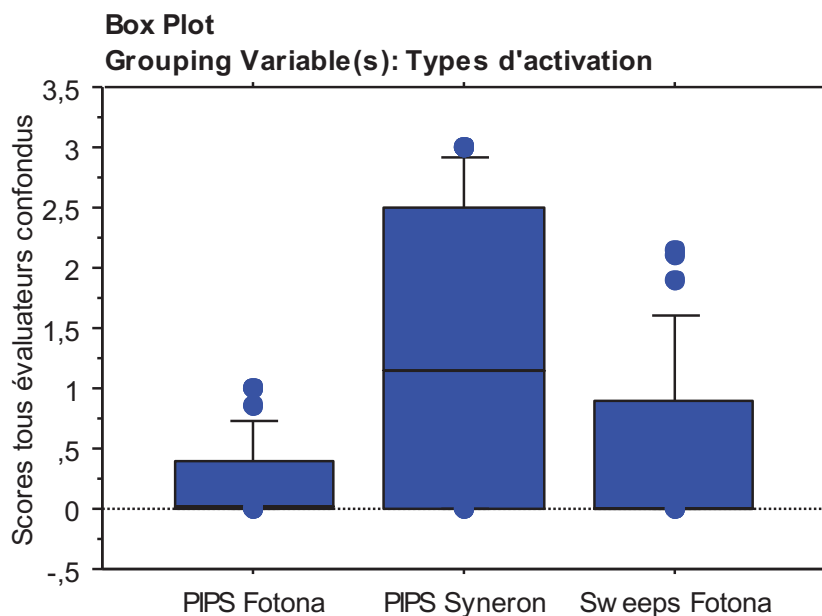
- L'analyse non paramétrique de Kruskal & Wallis, pour tous les évaluateurs confondus et pour tous les types d'activation est **statistiquement significative** avec un **p=0,0006** très bas. Cela signifie que notre hypothèse n'est pas vérifiée : les différents systèmes d'activation ne sont pas identiques et produisent des effets différents.

Kruskal-Wallis Test for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

DF	2
# Groups	3
# Ties	12
H	14,862
P-Value	,0006
H corrected for ties	16,424
Tied P-Value	,0003

Kruskal-Wallis Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
PIPS Fotona	30	1123,500	37,450
PIPS Syneron	30	1815,000	60,500
Sw eeps Fotona	30	1156,500	38,550



- **U-Test de Mann & Whitney pour comparer PIPS Fotona et PIPS Syneron :**

On remarque qu'il y a une **différence significative** en faveur du PIPS Fotona ($p = 0,0004$). L'effet PIPS de Fotona® élimine mieux la boue dentinaire que l'effet Photoacoustique de Syneron® dans les derniers millimètres apicaux des racines courbes. (Figure 48)

Moyenne des scores pour PIPS Fotona : $0,22 \pm 0,314$ avec une moyenne maximum de 1, et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour PIPS Syneron : $1,245 \pm 1,109$ avec une moyenne maximum de 3 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	210,000
U Prime	690,000
Z-Value	-3,548
P-Value	,0004
Tied Z-Value	-3,654
Tied P-Value	,0003
# Ties	8

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
PIPS Fotona	30	675,000	22,500
PIPS Syneron	30	1155,000	38,500

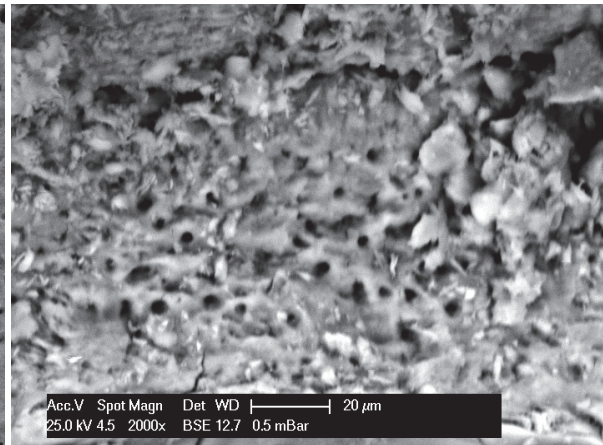
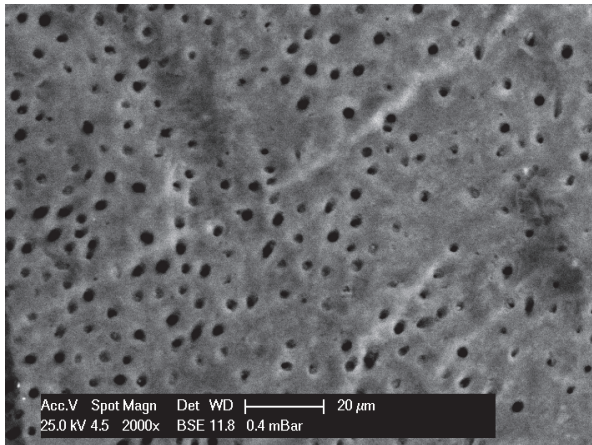
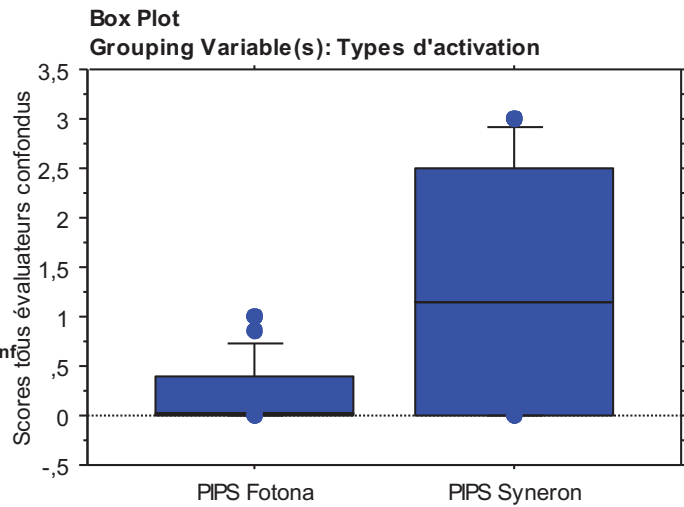


Figure 48 : Exemples d'images MEB obtenues. PIPS Fotona : score = 0 (gauche), PIPS Syneron : score = 2,55 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer PIPS Fotona et SWEEPS Fotona :**

Il n'y a pas de différence significative chez Fotona® (p =0,9823). La médiane des valeurs est sensiblement identique. (Figure 49)

Moyenne des scores pour PIPS Fotona : $0,22 \pm 0,314$ avec une moyenne maximum de 1, et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour SWEEPS Fotona : $0,407 \pm 0,680$ avec une moyenne maximum de 2,150 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus
Grouping Variable: Types d'activation

U	448,500
U Prime	451,500
Z-Value	-,022
P-Value	,9823
Tied Z-Value	-,024
Tied P-Value	,9806
# Ties	6

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs conf
Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
PIPS Fotona	30	913,500	30,450
Sw eeps Fotona	30	916,500	30,550

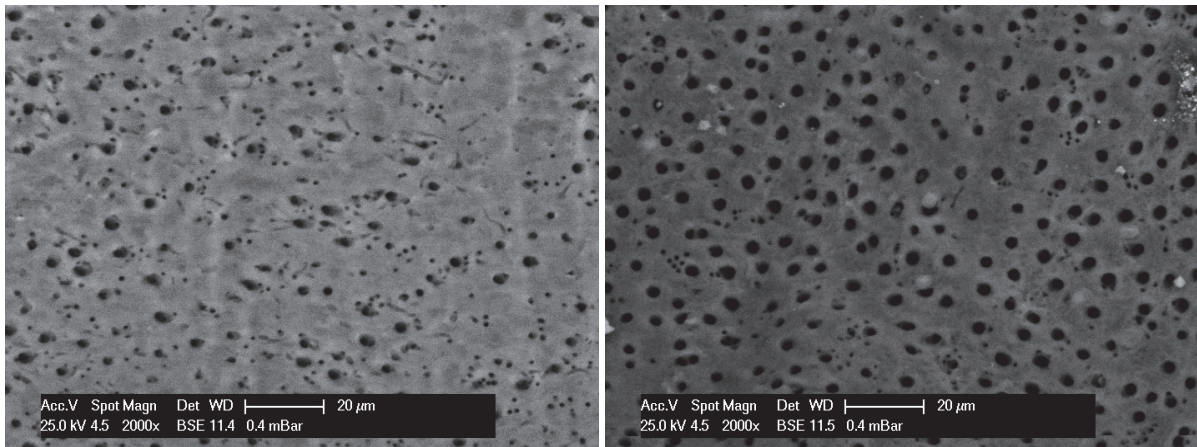
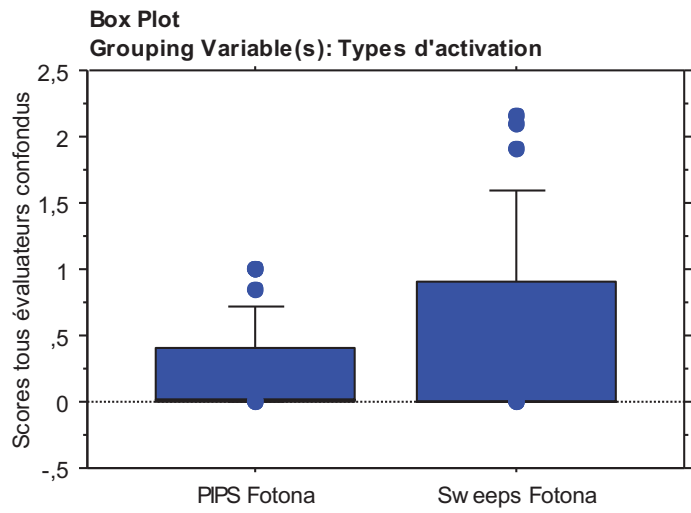


Figure 49 : Exemples d'images MEB obtenues. PIPS Fotona : score = 0 (gauche), SWEEPS Fotona : score = 0,17 (droite).

• **U-Test de Mann & Whitney pour comparer PIPS Syneron et SWEEPS Fotona :**

On remarque qu'il y a une **différence significative** en faveur du SWEEPS Fotona ($p = 0,0019$). L'effet SWEEPS de Fotona® élimine mieux la boue dentinaire que l'effet Photoacoustique de Syneron® dans les derniers millimètres apicaux des racines courbes. (Figure 50)

Moyenne des scores pour PIPS Syneron : $1,245 \pm 1,109$ avec une moyenne maximum de 3 et une moyenne minimum de 0.

Moyenne des scores pour SWEEPS Fotona : $0,407 \pm 0,680$ avec une moyenne maximum de 2,150 et une moyenne minimum de 0.

Mann-Whitney U for Scores tous évaluateurs confondus

Grouping Variable: Types d'activation

U	240,000
U Prime	660,000
Z-Value	-3,105
P-Value	,0019
Tied Z-Value	-3,240
Tied P-Value	,0012
# Ties	9

Mann-Whitney Rank Info for Scores tous évaluateurs confondus

Grouping Variable: Types d'activation

	Count	Sum Ranks	Mean Rank
PIPS Syneron	30	1125,000	37,500
Sw eeps Fotona	30	705,000	23,500

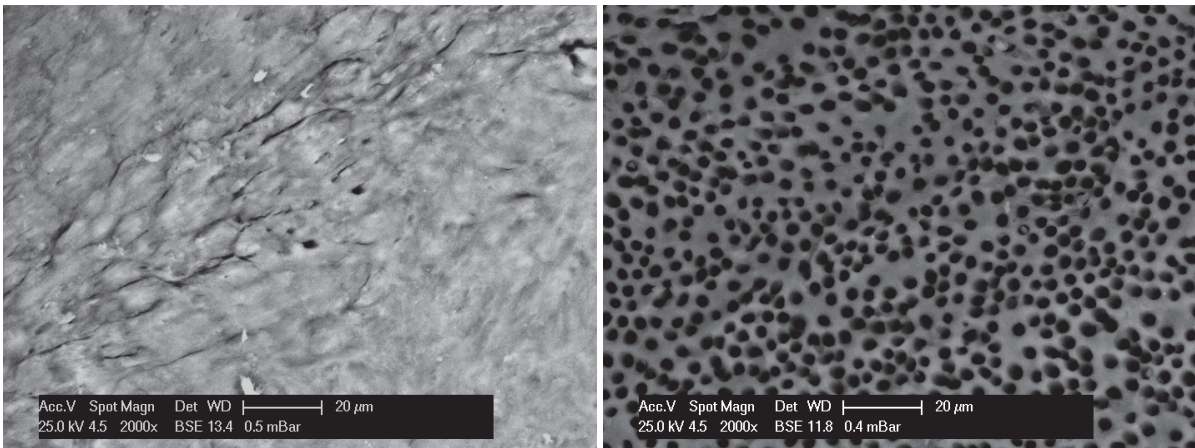
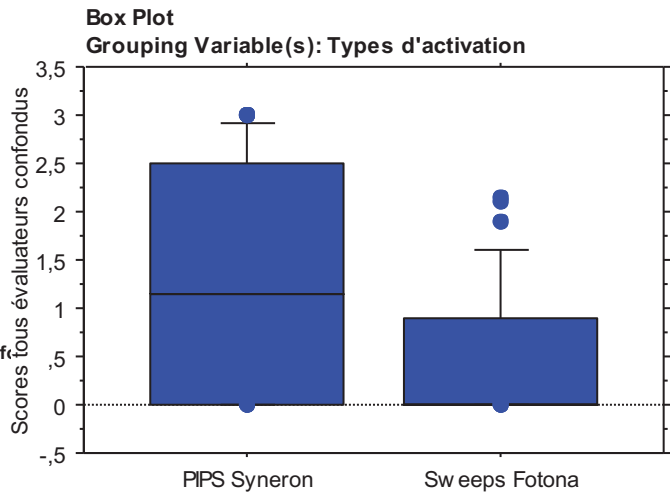


Figure 50 : Exemples d'images MEB obtenues. PIPS Syneron : score = 3 (gauche), SWEEPS Fotona : score = 0 (droite).

VIII. DISCUSSION

A. Discussion des Résultats

D'après les résultats énoncés précédemment, la PIPS de chez Fotona® est significativement meilleure que les autres moyens d'activations pour éliminer la boue dentinaire dans les 2 derniers millimètres apicaux.

Pour l'effet SWEEPS de Fotona®, l'élimination de la boue dentinaire est significativement meilleure que l'effet Photoacoustique de Syneron®. Mais équivalente à l'effet PIPS Fotona®, l'EndoActivator® et l'aiguille-seringue.

Pour l'effet Photoacoustique de Syneron®, la moyenne des scores d'évaluation est de $1,245 \pm 1,109$. L'écart-type étant inférieur à la moyenne, on peut en conclure que cette technique est reproductible mais l'élimination des boues dentinaires est médiocre puisque les scores vont jusqu'à 3.

Cependant, tous évaluateurs confondus et tous moyens d'activation des solutions d'irrigation confondus, les moyennes des scores sont tous bas : de 0,22 à 1,245. Les états de surfaces canalaires dans les canaux courbes étaient donc propres quelle que soit la technique utilisée.

B. Comparaison des résultats observés avec ceux de la littérature

1. Efficacité comparée des 3 lasers Er : YAG : explications des résultats et de leurs variations

A l'observation de ces résultats, il apparaît qu'une activation des solutions d'irrigation avec la technique PIPS de Fotona® est significativement meilleure qu'une autre d'un point de vue de l'élimination de la boue dentinaire au tiers apical des racines courbes.

Il a été démontré par Gu en 2009 que quelle que soit la technique d'irrigation utilisée, les canaux courbes présentent toujours plus de débris au niveau du tiers apical (58) à cause de la difficulté d'accéder à cette zone.

Grâce aux embouts PIPS et SWEEPS qui sont placés dans la chambre pulpaire, plus besoin de négocier les courbures pour éliminer la boue dentinaire du tiers apical. Dans notre étude, nous arrivons à obtenir des scores de 0, soit pas de boue dentinaire avec tous les tubuli dentinaires ouverts et vides de tout débris dans les derniers millimètres des racines courbes.

Avec la PIPS et la SWEEPS, la technique par pression négative type EndoVac® n'est donc plus la seule technique permettant d'amener les irrigants et de nettoyer le tiers apical. Elles montrent un réel intérêt pour les canaux courbes.

Nous obtenons des résultats comparables aux autres études menées sur la PIPS. Tout comme Ayranci et al. en 2016, l'activation de l'hypochlorite de sodium 2,5% puis de l'EDTA 17% par la PIPS de Fotona® durant 30 secondes chacun, montre des résultats statistiquement meilleurs qu'avec l'activations de irrigants par la PUI, avec un meilleur nettoyage du tiers apical des canaux droits (6).

Wang et al. en 2017 ont montré que l'activation de NaOCl 5,25% puis de l'EDTA 17% par la PIPS avec un laser Er : YAG durant 30 secondes chacun est le protocole le plus efficace sur l'élimination de la boue dentinaire sur toute la surface du canal et sans abimer les parois canalaire ni créer de carbonisation ou de cracks (106).

Aucun article traitant de l'élimination de la boue dentinaire grâce au laser LiteTouch™ Syneron® n'a été trouvé sur PubMed. Nous ne pouvons donc pas établir de comparaison avec les résultats obtenus lors de cette étude.

2. Variations entre les évaluateurs

Les évaluateurs ayant participé à la notation des images obtenues au MEB ont tous une activité limitée à l'endodontie. De ce fait, peu de différence ont été remarquées dans l'évaluation des images. Le test du coefficient Kappa de Cohen était de 0,6158 montrant un agrément important entre les 3 évaluateurs.

Malgré tout, pour pallier une éventuelle subjectivité, toutes les images ont été randomisées avec un numéro d'identification, nous permettant une notation en aveugle. Pour avoir des résultats homogènes, une moyenne des notes a été réalisé puis les tests statistiques ont permis de retirer les valeurs extrêmes.

C. Discussion du Protocole

1. Choix des dents

Le choix des dents s'est porté sur les canaux ayant une courbure supérieure à 20° pour se rapprocher le plus possible de la réalité. Peu d'étude ont été réalisées sur les canaux courbes comparée au nombre sur les canaux droits, or la majorité des dents présentent des courbures apicales. Nous avons utilisé pour cette étude la technique de Schneider mesurant sur des clichés radiographiques les courbures qui est la technique de référence (99).

Dans la plupart des études, les canaux sont calibrés et standardisés pour avoir des longueurs canalaire identiques : les couronnes des dents sont supprimées pour cela.

Cependant dans notre étude nous avons choisi de conserver la longueur radiculaire initiale pour conserver la variabilité que nous pourrions rencontrer avec les courbures. De plus, la conservation de la couronne de la dent intacte, nous a permis de réaliser les cavités d'accès correspondantes à chaque dent : ce réservoir naturel est absolument nécessaire à l'utilisation des lasers pour pouvoir générer les phénomènes de cavitation.

Lors de la collection des dents, le passé pathologique et l'âge de la dent n'a pas été renseigné. Or cette information pourrait influencer sur l'aspect de la dentine intra-canaire et donc sur la quantité et la qualité de la boue dentinaire générée lors de l'instrumentation. Nous avons d'ailleurs observé différents aspects de dentine apicale signant des dents jeunes ou des dents ayant subi des agressions (nécrose, LIPOE, dentine sclérosée).

2. Choix des NiTi et du Système TF Adaptive™

Parce que nous travaillons sur des canaux courbes, le choix de l'utilisation du système TF Adaptive™ pour la mise en forme canalaire repose sur le fait que ces instruments sont relativement résistants avec une bonne résistance cyclique et à la fois suffisamment souple pour la mise en forme de canaux courbes en maintenant et respectant la courbure apicale originelle (107).

De plus ces instruments ont été utilisés en rotation « adaptative » : le moteur SybronEndo® adapte les forces de torsion dans le canal en fonction de la pression exercée sur l'instrument, la lime est soit en rotation continue, soit en mouvement alternatif en fonction de la situation. Ce mouvement particulier diminuerait le tassement apical de débris de coupe et améliorerait la remontée des débris. Il semblerait que le profil de ces instruments diminue la production de boue dentinaire tout en améliorant l'efficacité de coupe et en diminuant l'effet de vissage (108) (109).

L'explication des moyennes de scores très bas obtenues, tous évaluateurs confondus et tous moyens d'activation des solutions d'irrigation confondus, repose peut-être sur l'utilisation du Système TF Adaptive™ qui produit moins de boues dentinaires comparativement aux autres instruments rotatifs de mise en forme canalaire.

La séquence instrumentale TF Adaptive™ préconisée par le fabricant SybronEndo® est également très simple d'utilisation puisqu'elle ne comprend que 3 instruments rotatifs de mise en forme canalaire.

3. Choix des lasers

Le laser Er : YAG est la dernière innovation en matière d'activation des solutions d'irrigation en endodontie.

Le choix des lasers s'est porté sur le LightWalker ATS™ de Fotona® car ce sont les premiers à avoir mis au point les embouts caméraux adaptés permettant de générer un onde photo-acoustique dans le canal (77). La technique PIPS est la plus étudiée dans la littérature et celle présentant les meilleurs résultats, c'est la référence en désinfection endodontique laser. Et la technique SWEEPS est la nouveauté chez Fotona®.

Le laser LiteTouch™ Syneron® a été également choisi car il est présent dans le service d'odontologie du CHU de Nice et qu'il permet de faire de la PIPS. Nous voulions étudier son efficacité avant de l'utiliser sur les patients du Centre puisque aucune étude indépendante n'a été faite avec ce laser.

Les autres moyens d'activation des solutions d'irrigation ne peuvent pas être amenés à la longueur de travail des racines courbes pour pouvoir nettoyer les derniers millimètres apicaux.

L'intérêt majeur de la PIPS ou de la SWEEPS et que le tip reste dans la chambre, nul besoin de descendre dans les canaux courbes pour espérer un nettoyage des derniers millimètres apicaux.

4. Observation au MEB : choix du grossissement et choix des zones d'observation

L'observation au MEB est la méthode de choix pour l'étude de la boue dentinaire. Le mode environnemental en vide partiel (10^{-4} Pa) a été choisi car il ne nécessite pas une métallisation de nos échantillons, et limite leur déshydratation.

Un grandissement de x 2000 au MEB permet de voir nettement les tubuli sur une surface suffisamment grande pour pouvoir juger de l'efficacité d'une technique dans l'élimination de la boue dentinaire. Les zones observées font environ $150 \times 110 \mu\text{m}$, sachant qu'un tubule fait moins de $3 \mu\text{m}$ de diamètre.

Selon les études, les grossissements varient de x 1000 à x 3000. Wang et Arselan réalisent leurs observations à x 1000. (106)(81) Ayranci à x 1500. (6) Suman à x 2000. (110) Et Mancini à x 300, x 1000 et x 3000. (4)

Le MEB utilisé pour l'étude est numérique et le grossissement est dépendant de la taille de l'écran. C'est pourquoi après comparaison avec des images obtenues dans les différents auteurs, nous avons choisi le grossissement x 2000 dont les images se rapprochaient le plus de celle des autres recherches sur les états de surface intra-canaulaire.

Nous avons choisi d'étudier les derniers millimètres apicaux de racines courbes car ce sont les endroits les plus difficiles d'accès à la désinfection et au nettoyage donc bien plus représentatif de la clinique, comparativement à des canaux droits.

En effet, Les 2/3 coronaires sont toujours propre quelques soit la technique utilisée. Le vrai challenge reste le tiers apical avec les courbures et les deltas apicaux. Les seringues ne peuvent pas descendre à la longueur de travail, ni les inserts ultra-sonores (à cause des risques d'extrusion ou de stripping). D'où l'intérêt d'avoir une technique moins risquée nous permettant un nettoyage du tiers apical des racines courbes tout en en restant dans la chambre pulpaire.

Les zones choisies pour l'acquisition des images étaient systématiquement représentative de la région. Elle était choisie après observation plus large de la région apicale, toujours entre 1 et 2 mm de l'apex, afin d'obtenir des données fiables et honnêtes pour l'étude.

5. Choix de l'opérateur

Le choix des dents, la mise en forme, l'irrigation et les protocoles d'irrigation finale et d'agitation des solutions d'irrigations ont été réalisées par l'auteure de cette thèse, qui était étudiante en 6^{ème} année d'Odontologie à Nice. Si l'opérateur avait été un endodontiste confirmé, les résultats obtenus auraient peut-être été différents.

6. Choix de la séquence d'irrigation

A propos de la séquence d'irrigation choisie pour cette étude, nous nous sommes inspirés des protocoles détaillés dans les études de Wang et al. de 2017, de Ayranci et al. de 2016 (6), de Mancini et al. (4), de Arslan et al. (81) ainsi que du protocole préconisé par Fotona®.

Nous avons fait un mélange des différents temps d'activation et de repos, ainsi que des quantités de solution d'irrigation utilisées pour finalement rédiger notre propre protocole. Protocole que nous avons choisi de conserver exactement identique pour chaque groupe.

Pour des raisons techniques évidentes, nous avons décidé de laisser les apex ouverts lors de la mise en forme et de l'irrigation finale. En effet, il est actuellement impossible de reproduire parfaitement en laboratoire les tissus parodontaux apicaux. En laissant les apex ouverts, nous avons observé une fuite des solutions d'irrigation et donc un temps d'application moindre que dans des conditions cliniques.

La discussion peut également se porter sur le fait d'avoir réalisé l'activation laser sous spray d'eau continu. Plusieurs essais préliminaires à l'étude nous montraient le problème posé par la vaporisation instantanée de la solution d'irrigation contenue dans la chambre pulpaire. Cette vaporisation nous obligeait à ajouter une quantité considérable d'irrigant durant l'activation laser. Cette quantité d'irrigant ne pouvait être reproduite sur les témoins positifs (groupe EndoActivator®) et témoins négatifs (groupe Seringue+Aiguille). C'est pourquoi, pour conserver la même quantité d'irrigant, les mêmes temps de pose et les mêmes temps d'activation dans chaque groupe, nous avons choisi de réaliser l'activation laser sous irrigation constante d'eau.

Peut-être aurions-nous pu faire un autre groupe témoin laser dans lequel nous faisons une activation laser de l'irrigation finale exclusivement à l'eau, sans solution d'irrigation.

7. Choix de la méthode des scores

Pour l'évaluation, nous avons choisi d'utiliser la méthode des scores établie par Rome (105). C'est une classification simple donnant une note comprise entre 0 et 3. Cependant, elle peut sembler restrictive car il a été parfois difficile de donner une note précise avec une échelle aussi réduite. Nous avons donc encouragé les évaluateurs à donner des 0,5. L'ajout de la grille divisant l'image en 10 zones notées individuellement permet d'obtenir une note moyenne par image plus représentative.

IX. APPLICATION CLINIQUE, INTERET ET FIABILITE

Le chirurgien-dentiste recherche constamment des nouvelles techniques et des matériels qui soient simples d'utilisation, rentables financièrement, efficaces, fiables et reproductibles.

Le but étant de garantir une qualité de soin. C'est pourquoi cette étude cherche à comparer la PIPS proposée par deux marques de lasers, dont celui présent au Pôle Odontologie du CHU de Nice, avec la SWEEPS et les techniques d'activations standards.

Pour l'agitation des solutions d'irrigation dans les racines courbes, l'EndoActivator® reste une technique de choix puisqu'elle présente une élimination correcte de la boue dentinaire au tiers apical, qu'elle est simple d'utilisation pour le chirurgien-dentiste et reste peu couteuse.

La PIPS de Fotona® présente les meilleurs résultats en termes d'élimination de la boue dentinaire au tiers apical des racines courbes. Même si elle reste simple d'utilisation, cette innovation a un coût non négligeable (environ 70 000 €) qui ne semble pas rentable financièrement pour un chirurgien-dentiste omnipraticien. Cette technique semble plus appropriée à une activité exclusive en endodontie.

Son avantage majeur réside dans l'absence de risque à devoir négocier les courbures puisque en plaçant le tip dans la chambre, le nettoyage du tiers apical des racines courbes est excellent.

D'un point de vue qualitatif, grâce à un meilleur nettoyage des parois canalaire du tiers apical, on peut espérer une obturation plus étanche et donc un meilleur taux de guérison et de succès des traitements endodontiques.

Cette étude a également permis de constater que l'effet Photoacoustique du laser LiteTouch™ de Syneron® présent au Pôle Odontologie du CHU de Nice ne montre pas les résultats escomptés. Des études complémentaires devront être menés pour assurer son efficacité avant de l'utiliser sur les patients du service.

X. CONCLUSION

Ce travail s'inscrit dans une logique d'amélioration de la qualité des soins d'endodontie conformément aux données actuelles de la science.

Lors du traitement endodontique, chaque étape opératoire est essentielle à son succès. Le taux d'échec peut s'en voir sensiblement augmenté si l'une d'entre elle n'est pas menée de façon adéquate (111). L'irrigation est une des clés essentielles dans la réussite du traitement endodontique, car une mauvaise désinfection est une des causes les plus fréquemment évoquées lors d'un échec (112).

Ce travail s'est spécialement focalisée sur l'étude de l'élimination des boues dentinaires dans le tiers apical des canaux courbes qui constitue un véritable challenge technique et clinique. Les TF Adaptive™, instruments de mise en forme canalaire utilisés, ont confirmés leur grande flexibilité et leur efficacité de coupe car les états de surfaces canalaires dans les canaux courbes étaient globalement propres quelle que soit la technique utilisée.

Les résultats extrêmement encourageants de la technique PIPS de Fotona® obtenus lors de cette étude tendent à montrer sa réelle efficacité dans le débridement de la complexité de l'anatomie canalaire et des derniers millimètres apicaux, avec pour énorme avantage de positionner simplement l'embout PIPS dans la chambre pulpaire.

Cette étude a également permis de constater que l'effet Photoacoustique du laser LiteTouch™ de Syneron® ne montre pas les résultats escomptés. Des études complémentaires devront être menés pour assurer son efficacité avant de l'utiliser sur les patients du Pôle Odontologie du CHU de Nice.

Au vu de ce travail, d'autres travaux expérimentaux doivent être menés pour valider cette technique d'activation des solutions d'irrigation afin d'obtenir des résultats reproductibles en clinique et de vérifier l'ergonomie de cette technique en pratique quotidienne.

XI. BIBLIOGRAPHIE

1. **McComb D, Smith DC.** *A preliminary scanning electron microscopic study of root canals after endodontic procedures.* J Endod. 1975. 1(7):238-42.
2. **Baumgartner JC, Mader CL.** *A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens.* J Endod. 1987. 13(4):147-57.
3. **Tay FR, Gu L-S, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L, Zhang K, et al.** *Effect of vapor lock on root canal debridement by using a side-vented needle for positive-pressure irrigant delivery.* J Endod. 2010. 36(4):745-50.
4. **Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Dall'Asta L, Cianconi L.** *FESEM evaluation of smear layer removal using different irrigant activation methods (EndoActivator, EndoVac, PUI and LAI). An in vitro study.* Clin Oral Investig. 2018. 22(2):993-9.
5. **Kimura Y, Wilder-Smith P, Matsumoto K.** *Lasers in endodontics: a review.* Int Endod J. 2000. 33(3):173-85.
6. **Ayranci LB, Arslan H, Akcay M, Capar ID, Gok T, Saygili G.** *Effectiveness of laser-assisted irrigation and passive ultrasonic irrigation techniques on smear layer removal in middle and apical thirds.* 2016. 38(2):121-7.
7. **Wang X, Cheng X, Liu B, Liu X, Yu Q, He W.** *Effect of Laser-Activated Irrigations on Smear Layer Removal from the Root Canal Wall.* Photomed Laser Surg. 2017. 35(12):688-94.
8. **Zehnder M.** *Root canal irrigants.* J Endod. 2006. 32(5):389-98.
9. **Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y.** *Irrigation in endodontics.* Br Dent J. 2014. 216(6):299-303.
10. **Silva LAB da, Leonardo MR, Assed S, Tanomaru Filho M.** *Histological study of the effect of some irrigating solutions on bacterial endotoxin in dogs.* Braz Dent J. 2004. 15(2):109-14.
11. **Spangberg L, Engström B, Langeland K.** *Biologic effects of dental materials. Toxicity and antimicrobial effect of endodontic antiseptics in vitro.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1973. 36(6):856-71.
12. **Kandaswamy D, Venkateshbabu N.** *Root canal irrigants.* J Conserv Dent JCD. 2010. 13(4):256-64.
13. **Rossi-Fedele G, Guastalli AR, Dođramacı EJ, Steier L, De Figueiredo J a. P.** *Influence of pH changes on chlorine-containing endodontic irrigating solutions.* Int Endod J. 2011. 44(9):792-9.
14. **Estrela C, Estrela CRA, Barbin EL, Spanó JCE, Marchesan MA, Pécora JD.** *Mechanism of action of sodium hypochlorite.* Braz Dent J. 2002. 13(2):113-7.
15. **Stojicic S, Zivkovic S, Qian W, Zhang H, Haapasalo M.** *Tissue dissolution by sodium hypochlorite: effect of concentration, temperature, agitation, and surfactant.* J Endod. 2010. 36(9):1558-62.
16. **Zou L, Shen Y, Li W, Haapasalo M.** *Penetration of sodium hypochlorite into dentin.* J Endod. 2010. 36(5):793-6.
17. **Kuga MC, Gouveia-Jorge É, Tanomaru-Filho M, Guerreiro-Tanomaru JM, Bonetti-Filho I, Faria G.** *Penetration into dentin of sodium hypochlorite associated with acid solutions.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2011. 112(6):155-159.
18. **Zehnder M, Schmidlin P, Sener B, Waltimo T.** *Chelation in root canal therapy reconsidered.* J Endod. 2005. 31(11):817-20.
19. **Carson KR, Goodell GG, McClanahan SB.** *Comparison of the antimicrobial activity of six irrigants on primary endodontic pathogens.* J Endod. 2005. 31(6):471-3.
20. **Guerreiro-Tanomaru JM, Morgental RD, Flumignan DL, Gasparini F, Oliveira JE, Tanomaru-Filho M.** *Evaluation of pH, available chlorine content, and antibacterial activity of*

- endodontic irrigants and their combinations against Enterococcus faecalis*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2011. 112(1):132-5.
21. **Garcia F, Murray PE, Garcia-Godoy F, Namerow KN.** *Effect of Aquatine Endodontic Cleanser on smear layer removal in the root canals of ex vivo human teeth*. J Appl Oral Sci Rev FOB. 2010. 18(4):403-8.
 22. **De Sermeño RF, da Silva LAB, Herrera H, Herrera H, Silva RAB, Leonardo MR.** *Tissue damage after sodium hypochlorite extrusion during root canal treatment*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2009. 108(1):46-49.
 23. *Chélation*. Wikipédia. 2017.
 24. **Calt S, Serper A.** *Smear layer removal by EGTA*. J Endod. 2000. 26(8):459-61.
 25. **Teixeira CS, Felipe MCS, Felipe WT.** *The effect of application time of EDTA and NaOCl on intracanal smear layer removal: an SEM analysis*. Int Endod J. 2005. 38(5):285-90.
 26. **Ballal NV, Kandian S, Mala K, Bhat KS, Acharya S.** *Comparison of the efficacy of maleic acid and ethylenediaminetetraacetic acid in smear layer removal from instrumented human root canal: a scanning electron microscopic study*. J Endod. 2009. 35(11):1573-6.
 27. **Perez F, Rouqueyrol-Pourcel N.** *Effect of a low-concentration EDTA solution on root canal walls: a scanning electron microscopic study*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2005. 99(3):383-7.
 28. **Sen BH, Ertürk O, Pişkin B.** *The effect of different concentrations of EDTA on instrumented root canal walls*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2009. 108(4):622-7.
 29. **Ballal N, Mala K, Bhat KS.** *Evaluation of the Efficacy of Various Concentrations of Maleic Acid and Edta in Removal of Smear Layer - An Sem Study*. Int J Clin Dent. 2010. 3:225-34.
 30. **Yılmaz Z, Aktemur S, Buzoglu HD, Gümüsderelioglu M.** *The effect of temperature and pH variations on the surface tension of EDTA solutions*. J Endod. 2011. 37(6):825-7.
 31. **Van der Waal SV, de Almeida J, Krom BP, de Soet JJ, Crielaard W.** *Diffusion of antimicrobials in multispecies biofilms evaluated in a new biofilm model*. Int Endod J. 2017. 50(4):367-76.
 32. **Singla MG, Garg A, Gupta S.** *MTAD in endodontics: an update review*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2011. 112(3):70-76.
 33. **Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M.** *Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions*. Int Endod J. 2003. 36(6):411-7.
 34. **Siqueira JF, Rôças IN, Paiva SSM, Guimarães-Pinto T, Magalhães KM, Lima KC.** *Bacteriologic investigation of the effects of sodium hypochlorite and chlorhexidine during the endodontic treatment of teeth with apical periodontitis*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2007. 104(1):122-30.
 35. **Ballal NV, Mala K, Bhat KS.** *Evaluation of decalcifying effect of maleic acid and EDTA on root canal dentin using energy dispersive spectrometer*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2011. 112(2):78-84.
 36. **Thé SD.** *The solvent action of sodium hypochlorite on fixed and unfixed necrotic tissue*. Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1979. 47(6):558-61.
 37. **Baumgartner JC, Cuenin PR.** *Efficacy of several concentrations of sodium hypochlorite for root canal irrigation*. J Endod. 1992. 18(12):605-12.
 38. **Trepagnier CM, Madden RM, Lazzari EP.** *Quantitative study of sodium hypochlorite as an in vitro endodontic irrigant*. J Endod. 1977. 3(5):194-6.
 39. **Konstantinidi E, Psimma Z, Chávez de Paz LE, Boutsoukis C.** *Apical negative pressure irrigation versus syringe irrigation: a systematic review of cleaning and disinfection of the root canal system*. Int Endod J. 2017. 50(11):1034-54.

40. **Perez R, Neves AA, Belladonna FG, Silva EJNL, Souza EM, Fidel S, et al.** *Impact of needle insertion depth on the removal of hard-tissue debris.* Int Endod J. 2017. 50(6):560-8.
41. **Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M.** *Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions.* Int Endod J. 2003. 36(6):411-7.
42. **De Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu M-K, Wesselink PR, van der Sluis LWM.** *Laser-activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization.* Int Endod J. 2009. 42(12):1077-83.
43. **Rödig T, Döllmann S, Konietzschke F, Drebenstedt S, Hülsmann M.** *Effectiveness of different irrigant agitation techniques on debris and smear layer removal in curved root canals: a scanning electron microscopy study.* J Endod. 2010. 36(12):1983-7.
44. **Siu C, Baumgartner JC.** *Comparison of the debridement efficacy of the EndoVac irrigation system and conventional needle root canal irrigation in vivo.* J Endod. 2010. 36(11):1782-5.
45. **Bronnec F, Bouillaguet S, Machtou P.** *Ex vivo assessment of irrigant penetration and renewal during the final irrigation regimen.* Int Endod J. 2010. 43(8):663-72.
46. **Sedgley CM, Nagel AC, Hall D, Applegate B.** *Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging in vitro.* Int Endod J. 2005. 38(2):97-104.
47. **Zmener O, Pameijer CH, Serrano SA, Palo RM, Iglesias EF.** *Efficacy of the NaviTip FX irrigation needle in removing post instrumentation canal smear layer and debris in curved root canals.* J Endod. 2009. 35(9):1270-3.
48. **Abarajithan M, Dham S, Velmurugan N, Valerian-Albuquerque D, Ballal S, Senthilkumar H.** *Comparison of Endovac irrigation system with conventional irrigation for removal of intracanal smear layer: an in vitro study.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2011. 112(3):407-11.
49. **Schoeffel GJ.** *The EndoVac method of endodontic irrigation: safety first.* Dent Today. 2007. 26(10):92, 94, 96 passim.
50. **Brunson M, Heilborn C, Johnson DJ, Cohenca N.** *Effect of apical preparation size and preparation taper on irrigant volume delivered by using negative pressure irrigation system.* J Endod. 2010. 36(4):721-4.
51. **Desai P, Himel V.** *Comparative safety of various intracanal irrigation systems.* J Endod. 2009. 35(4):545-9.
52. **De Gregorio C, Paranjpe A, Garcia A, Navarrete N, Estevez R, Esplugues EO, et al.** *Efficacy of irrigation systems on penetration of sodium hypochlorite to working length and to simulated uninstrumented areas in oval shaped root canals.* Int Endod J. 2012. 45(5):475-81.
53. **Nielsen BA, Craig Baumgartner J.** *Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals.* J Endod. 2007. 33(5):611-5.
54. **Susin L, Liu Y, Yoon JC, Parente JM, Loushine RJ, Ricucci D, et al.** *Canal and isthmus debridement efficacies of two irrigant agitation techniques in a closed system.* Int Endod J. 2010. 43(12):1077-90.
55. **Saber SE-D, Hashem AAR.** *Efficacy of different final irrigation activation techniques on smear layer removal.* J Endod. 2011. 37(9):1272-5.
56. **Da Silva LAB, Nelson-Filho P, da Silva RAB, Flores DSH, Heilborn C, Johnson JD, et al.** *Revascularization and periapical repair after endodontic treatment using apical negative pressure irrigation versus conventional irrigation plus triantibiotic intracanal dressing in dogs' teeth with apical periodontitis.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 2010. 109(5):779-87.
57. **Townsend C, Maki J.** *An in vitro comparison of new irrigation and agitation techniques to*

- ultrasonic agitation in removing bacteria from a simulated root canal.* J Endod. 2009. 35(7):1040-3.
58. **Gu L, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR.** *Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices.* J Endod. 2009. 35(6):791-804.
59. **Cunningham WT, Balekjian AY.** *Effect of temperature on collagen-dissolving ability of sodium hypochlorite endodontic irrigant.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1980. 49(2):175-7.
60. **Sirtes G, Waltimo T, Schaetzle M, Zehnder M.** *The effects of temperature on sodium hypochlorite short-term stability, pulp dissolution capacity, and antimicrobial efficacy.* J Endod. 2005. 31(9):669-71.
61. **Bartolo A, Koyess E, Camilleri J, Micallef C.** *Model assessing thermal changes during high temperature root canal irrigation.* Healthc Technol Lett. 2016. 3(3):247-51.
62. **Çiçek E, Keskin Ö.** *The effect of the temperature changes of EDTA and MTAD on the removal of the smear layer: a scanning electron microscopy study.* 2015. 37(3):193-6.
63. **Caron G, Nham K, Bronnec F, Machtou P.** *Effectiveness of different final irrigant activation protocols on smear layer removal in curved canals.* J Endod. 2010. 36(8):1361-6.
64. **Ahmad M, Pitt Ford TJ, Crum LA.** *Ultrasonic debridement of root canals: acoustic streaming and its possible role.* J Endod. 1987. 13(10):490-9.
65. **Jensen SA, Walker TL, Hutter JW, Nicoll BK.** *Comparison of the cleaning efficacy of passive sonic activation and passive ultrasonic activation after hand instrumentation in molar root canals.* J Endod. 1999. 25(11):735-8.
66. **Van der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR.** *Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature.* Int Endod J. 2007. 40(6):415-26.
67. **Van der Sluis LWM, Gambarini G, Wu MK, Wesselink PR.** *The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation.* Int Endod J. 2006. 39(6):472-6.
68. **De Castro FPL, Pinheiro SL, Duarte MAH, Duque JA, Fernandes SL, Anchieta RB, et al.** *Effect of time and ultrasonic activation on ethylenediaminetetraacetic acid on smear layer removal of the root canal.* Microsc Res Tech. 2016. 79(11):1062-8.
69. **Mohammadi Z, Shalavi S, Giardino L, Palazzi F, Asgary S.** *Impact of Ultrasonic Activation on the Effectiveness of Sodium Hypochlorite: A Review.* Iran Endod J. 2015. 10(4):216-20.
70. *Recommandations HAS traitement endodontique.* 2017. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/portail/upload/docs/application/pdf/2009-01/rapport_traitement_endodontique.pdf
71. **Weichman JA, Johnson FM, Nitta LK.** *Laser use in endodontics. II.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1972. 34(5):828-30.
72. **Kenneth L., Swick M.** *The Use of Lasers in Dentistry - A Clinical Reference Guide for the Diode810nm&Er:YAG.* 2009.
73. **Salman MI, Baumann MA, Hellmich M, Roggendorf MJ, Termaat S.** *SEM evaluation of root canal debridement with Sonicare CanalBrush irrigation.* Int Endod J. 2010. 43(5):363-9.
74. **Meire MA, Poelman D, De Moor RJ.** *Optical properties of root canal irrigants in the 300-3,000-nm wavelength region.* Lasers Med Sci. 2014. 29(5):1557-62.
75. **George R, Walsh LJ.** *Apical extrusion of root canal irrigants when using Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers with optical fibers: an in vitro dye study.* J Endod. 2008. 34(6):706-8.
76. **Esteves-Oliveira M, de Guglielmi CAB, Ramalho KM, Arana-Chavez VE, de Eduardo CP.** *Comparison of dentin root canal permeability and morphology after irradiation with Nd:YAG, Er:YAG, and diode lasers.* Lasers Med Sci. 2010. 25(5):755-60.
77. **DiVito E, Peters OA, Olivi G.** *Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial*

- and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci.* 2012. 27(2):273-80.
78. **Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca J-P, Medioni E, Vescovi P.** *Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer.* *Lasers Med Sci.* 2014. 29(1):69-75.
79. **Topçuoğlu HS, Köseoğlu M.** *Effect of Er:YAG and Nd:YAG lasers on the mineral content of root canal dentin.* *Lasers Med Sci.* 2015. 30(2):809-13.
80. **Arslan D, Kustarci A.** *Efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming on apically extruded debris with different preparation systems in curved canals.* *Int Endod J.* 2018. 51(1):65-72.
81. **Arslan H, Akcay M, Ertas H, Capar ID, Saygili G, Meşe M.** *Effect of PIPS technique at different power settings on irrigating solution extrusion.* *Lasers Med Sci.* 2015. 30(6):1641-5.
82. **G. Olivi.** *Laser Use in Endodontics: Evolution from Direct Laser Irradiation to Laser-Activated Irrigation.* *J Laser Dent.* 2013. Disponible sur: http://laser-eryag.com/wp-content/uploads/2016/10/Olivi_G_2013_J_Laser_Dent_13_58-71.pdf
83. **Fonseca MB, Júnior POT, Pallota RC, Filho HF, Denardin OVP, Rapoport A, et al.** *Photodynamic therapy for root canals infected with Enterococcus faecalis.* *Photomed Laser Surg.* 2008. 26(3):209-13.
84. **Komine C, Tsujimoto Y.** *A small amount of singlet oxygen generated via excited methylene blue by photodynamic therapy induces the sterilization of Enterococcus faecalis.* *J Endod.* 2013. 39(3):411-4.
85. **Paschoal MA, Tonon CC, Spolidório DMP, Bagnato VS, Giusti JSM, Santos-Pinto L.** *Photodynamic potential of curcumin and blue LED against Streptococcus mutans in a planktonic culture.* *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2013. 10(3):313-9.
86. **Bago I, Plečko V, Gabrić Pandurić D, Schauerl Z, Baraba A, Anić I.** *Antimicrobial efficacy of a high-power diode laser, photo-activated disinfection, conventional and sonic activated irrigation during root canal treatment.* *Int Endod J.* 2013. 46(4):339-47.
87. **Siddiqui SH, Awan KH, Javed F.** *Bactericidal efficacy of photodynamic therapy against Enterococcus faecalis in infected root canals: a systematic literature review.* *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2013. 10(4):632-43.
88. **Muhammad OH, Chevalier M, Rocca J-P, Brulat-Bouchard N, Medioni E.** *Photodynamic therapy versus ultrasonic irrigation: interaction with endodontic microbial biofilm, an ex vivo study.* *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2014. 11(2):171-81.
89. **Blanken J, De Moor RJG, Meire M, Verdaasdonk R.** *Laser induced explosive vapor and cavitation resulting in effective irrigation of the root canal. Part 1: a visualization study.* *Lasers Surg Med.* 2009. 41(7):514-9.
90. **Seema D., Shraddha G., Pradnya B., Shirish K., Madhri W., Chetan A.** *Photon Induced Photo-Acoustic Streaming - Conquering the enemy within.* *Journal of Dental and Medical Sciences,*2016.
91. **Peeters HH, Gutknecht N.** *Efficacy of laser-driven irrigation versus ultrasonic in removing an airlock from the apical third of a narrow root canal.* *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc.* 2014. 40(2):47-53.
92. **DiVito E, Lloyd A.** *ER:YAG laser for 3-dimensional debridement of canal systems: use of photon-induced photoacoustic streaming.* *Dent Today.* 2012. 31(11):122, 124-7.
93. **Koch JD, Jaramillo DE, DiVito E, Peters OA.** *Irrigant flow during photon-induced photoacoustic streaming (PIPS) using Particle Image Velocimetry (PIV).* *Clin Oral Investig.* 2016. 20(2):381-6.

94. **Lloyd A, Uhles JP, Clement DJ, Garcia-Godoy F.** *Elimination of intracanal tissue and debris through a novel laser-activated system assessed using high-resolution micro-computed tomography: a pilot study.* J Endod. 2014. 40(4):584-7.
95. **Akyuz Ekim SN, Erdemir A.** *Comparison of different irrigation activation techniques on smear layer removal: an in vitro study.* Microsc Res Tech. 2015. 78(3):230-9.
96. **Lukač N, Gregorčič P, Jezeršek M.** *Optodynamic Phenomena During Laser-Activated Irrigation Within Root Canals.* Int J Thermophys. 2016. 37(7):66.
97. **Golob BS, Olivi G, Vrabec M, El Feghali R, Parker S, Benedicenti S.** *Efficacy of Photon-induced Photoacoustic Streaming in the Reduction of Enterococcus faecalis within the Root Canal: Different Settings and Different Sodium Hypochlorite Concentrations.* J Endod. 2017. 43(10):1730-5.
98. **Nejc Lukac.** *Photoacoustic Endodontics Using the Novel SWEEPS Er:YAG Laser Modality.* Journal of the Laser and Health Academy. 2017.
99. **Schneider SW.** *A comparison of canal preparations in straight and curved root canals.* Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1971. 32(2):271-5.
100. **Bhagabati N, Yadav S, Talwar S.** *An in vitro cyclic fatigue analysis of different endodontic nickel-titanium rotary instruments.* J Endod. 2012. 38(4):515-8.
101. **Gambarini G, Grande NM, Plotino G, Somma F, Garala M, De Luca M, et al.** *Fatigue resistance of engine-driven rotary nickel-titanium instruments produced by new manufacturing methods.* J Endod. 2008. 34(8):1003-5.
102. **Fayyad DM, Elhakim Elgendy AA.** *Cutting efficiency of twisted versus machined nickel-titanium endodontic files.* J Endod. 2011. 37(8):1143-6.
103. **Hashem AAR, Ghoneim AG, Lutfy RA, Foda MY, Omar GAF.** *Geometric analysis of root canals prepared by four rotary NiTi shaping systems.* J Endod. 2012. 38(7):996-1000.
104. **El Batouty KM, Elmallah WE.** *Comparison of canal transportation and changes in canal curvature of two nickel-titanium rotary instruments.* J Endod. 2011. 37(9):1290-2.
105. **Rome WJ, Doran JE, Walker WA.** *The effectiveness of Gly-Oxide and sodium hypochlorite in preventing smear layer formation.* J Endod. 1985. 11(7):281-8.
106. **Wang X, Cheng X, Liu B, Liu X, Yu Q, He W.** *Effect of Laser-Activated Irrigations on Smear Layer Removal from the Root Canal Wall.* Photomed Laser Surg. 2017. 35(12):688-94.
107. **Ordinola-Zapata R, Bramante CM, Duarte MAH, Cavenago BC, Jaramillo D, Versiani MA.** *Shaping ability of reciproc and TF adaptive systems in severely curved canals of rapid microCT-based prototyping molar replicas.* J Appl Oral Sci Rev FOB. 2014.22(6):509-15.
108. **Silva EJNL, Tameirão MDN, Belladonna FG, Neves AA, Souza EM, De-Deus G.** *Quantitative Transportation Assessment in Simulated Curved Canals Prepared with an Adaptive Movement System.* J Endod. 2015. 41(7):1125-9.
109. **Gergi R, Arbab-Chirani R, Osta N, Naaman A.** *Micro-computed tomographic evaluation of canal transportation instrumented by different kinematics rotary nickel-titanium instruments.* J Endod. 2014. 40(8):1223-7.
110. **Suman S, Verma P, Prakash-Tikku A, Bains R, Kumar-Shakya V.** *A Comparative Evaluation of Smear Layer Removal Using Apical Negative Pressure (EndoVac), Sonic Irrigation (EndoActivator) and Er:YAG laser -An In vitro SEM Study.* J Clin Exp Dent. 2017. 9(8):981-7.
111. **Bogaerts P SJ.** *Lésions réfractaires après traitement endodontique adéquat. Réalités Cliniques Vol 7, n°3. 1996. 323-339*
112. **Martin D.** *L'ignorance des problèmes infectieux ; Pourquoi tant d'échecs en endodontie ?* Quintessence. 2004.

XII. SERMENT D'HIPPOCRATE

Serment d'Hippocrate

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

Je promets et je jure, au nom de l'Être Suprême, d'être fidèle aux lois de l'Honneur et de la probité dans l'exercice de La Médecine Dentaire.

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

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

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

Je garderai le respect absolu de la vie humaine dès sa conception.

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

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

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

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.

XIII. APPROBATION



Faculté de Chirurgie dentaire
Odontologie

Approbation – Improbation

Les opinions émises par les dissertations présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, sans aucune approbation ou improbation de la Faculté de Chirurgie dentaire (1).

Lu et approuvé,

Vu,
Nice, le

Le Président du jury,

Le Doyen de la Faculté de
Chirurgie Dentaire de l'UNS

Professeur

Professeur Laurence LUPI

(1) Les exemplaires destinés à la bibliothèque doivent être obligatoirement signés par le Doyen et par le Président du Jury.