



HAL
open science

Le laser en endodontie : un outil indispensable ?

Basile Vincent

► **To cite this version:**

Basile Vincent. Le laser en endodontie : un outil indispensable ?. Sciences du Vivant [q-bio]. 2023. hal-04517099

HAL Id: hal-04517099

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-04517099v1>

Submitted on 22 Mar 2024

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
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES
UNIVERSITAIRES**

AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact bibliothèque : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

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

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

ACADEMIE DE NANCY-METZ
UNIVERSITE DE LORRAINE
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2023

N°12889C

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 11/04/2023

Par

Basile VINCENT

Né le 06/05/1997 à Chalon-sur-Saône (71)

LE LASER EN ENDODONTIE : UN OUTIL INDISPENSABLE ?

Composition du jury :

Président :

Pr Eric MORTIER

Membres :

Dr Jeanne DAVRIL

Dr Rémy BALTHAZARD

Dr Marin VINCENT

Directeurs de thèse :

Dr Rémy BALTHAZARD

Dr Jeanne DAVRIL

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

Présidente : Docteur Héléne BOULANGER

Doyen : Docteur Kazutoyo YASUKAWA

Vice-Doyens : Dr Charlene KICHENBRAND – Dr Rémy BALTHAZARD – Dr Marin VINCENT

Membres Honoraires : Dr L. BABEL – Pr. S. DURIVAUX – Pr A. FONTAINE – Pr G. JACQUART – Pr D. ROZENCWEIG - Pr ARTIS

Doyens Honoraires : Pr J. VADOT, Pr J.P. LOUIS

Département odontologie pédiatrique Sous-section 56-01	Mme JAGER Stéphanie	Maître de conférences *
	M. PREVOST Jacques	Maître de conférences
	Mme HERNANDEZ Magali	Maître de conférences *
	M. HAINOT Raphaël	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme HILT Léa	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme HOMBOURGER Morgane	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. MASSON Maximilien	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département orthopédie dento-faciale Sous-section 56-01	M. VANDE VANNET Bart	Professeur des universités *
	Mme DAMERDJI-BENHABIB Zaheira	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux ass. *
	M. FAWAZ Paul	Chef de clinique des universités associé *
Département prévention, épidémiologie, économie de la santé, odontologie légale Sous-section 56-02	Mme CLÉMENT Céline	Maître de conférences *
	M. BAUDET Alexandre	Maître de conférences *
	Mme CAIONE Mariette	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. VEYNACHTER Thomas	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
Département parodontologie Sous-section 57-01	Mme BISSON Catherine	Professeur des universités *
	M. JOSEPH David	Maître de conférences *
	Mme BERBE Ludivine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	Mme VITALI Marine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département chirurgie orale Sous-section 57-01	Mme GUILLET-THIBAUT Julie	Maître de conférences *
	M. BRAVETTI Pierre	Maître de conférences
	Mme KICHENBRAND Charlene	Maître de conférences *
	Mme PHULPIN Bérengère	Maître de conférences *
	M. CLERC Sébastien	Praticien hospitalier universitaire *
	Mme BECKER Alice	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme PEREIRA Laure	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
Département biologie orale Sous-section 57-01	Mme EGLOFF-JURAS Claire	Maître de conférences *
	M. MARTRETTE Jean-Marc	Professeur des universités *
	M. YASUKAWA Kazutoyo	Maître de conférences *
Département dentisterie restauratrice, endodontie Sous-section 58-01	M. MORTIER Éric	Professeur des universités *
	M. ENGELS-DEUTSCH Marc	Professeur des universités *
	M. AMORY Christophe	Maître de conférences
	M. BALTHAZARD Rémy	Maître de conférences *
	M. VINCENT Marin	Maître de conférences*
	M. GIESS Renaud	Maître de conférences associé*
	M. DAL MAGRO Claire	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	Mme DAVRIL Jeanne	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*
	M. LESIEUR François	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux
	M. DE MARCH Pascal	Maître de conférences
	Mme CORNE Pascale	Maître de conférences *
M. SCHOUVER Jacques	Maître de conférences	
Mme VAILLANT Anne-Sophie	Maître de conférences *	
M. HIRTZ Pierre	Enseignant universitaire	
Mme GERBER Caroline	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux*	
M. JONVEAUX Maxime	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
Mme MOUGEL Armande	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
M. PERRIN Tom	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
M. SYDA Paul-Marie	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
Mme WILK Sabine	Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux	
Département fonction-dysfonction, imagerie, biomatériaux Sous-section 58-01	Mme STRAZIELLE Catherine	Professeur des universités *
	Mme MOBY (STUTZMANN) Vanessa	Maître de conférences *
	M. SALOMON Jean-Pierre	Maître de conférences

Souligné : responsable de département

* temps plein

Mis à jour le 07 novembre 2022

Remerciements

À NOTRE PRÉSIDENT DE THÈSE

Monsieur le Professeur Éric MORTIER

Docteur en chirurgie dentaire

Docteur de l'université Henri Poincaré en physique-chimie de la matière et des matériaux

Habilité à diriger des recherches

Professeur des universités – praticien hospitalier

Responsable du département de dentisterie restauratrice, endodontie

Chef du service d'odontologie du CHRU de Nancy

Nous vous sommes très reconnaissant d'avoir accepté de présider notre jury de thèse. Nous vous remercions pour la qualité de vos enseignements en odontologie conservatrice tout au long de notre cursus ainsi que vos travaux pratiques qui nous ont donné le goût pour cette profession.

Veillez trouver ici l'expression de mon respect et de ma reconnaissance

À NOTRE JUGE ET DIRECTEUR DE THÈSE

Monsieur le docteur Rémy BALTHAZARD

Docteur en Chirurgie Dentaire

Docteur de l'Université de Lorraine en sciences des matériaux

Lauréat de l'Académie nationale de Chirurgie Dentaire

Maitre de Conférences – Praticien Hospitalier

Vice-Doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine

Nous vous remercions pour l'honneur que vous nous fait de diriger ce travail.

Merci pour tous vos conseils et votre disponibilité qui nous ont été offerts pendant la rédaction de ce manuscrit et au cours de mes années d'études.

Nous vous remercions pour, vos bons conseils, votre investissement et votre disponibilité en cours et en clinique qui ont su nous guider jusqu'à ce jour nous donner l'envie d'exercer cette profession.

À NOTRE JUGE ET DIRECTRICE DE THÈSE

Madame la doctoresse Jeanne DAVRIL

Docteur en chirurgie dentaire

Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux

Nous vous remercions de l'honneur que vous nous avez fait en acceptant de co-diriger notre thèse, de la disponibilité et du dynamisme dont vous avez fait preuve ainsi que de l'expertise et du temps que vous avez mis à notre disposition à cette occasion.

Merci d'avoir fait preuve de beaucoup de patience.

Que ce travail nous permette d'exprimer tout notre respect et notre reconnaissance.

À NOTRE INVITÉ

Monsieur le docteur Marin VINCENT

Docteur en chirurgie dentaire

Maître de conférences – praticien hospitalier

Docteur de l'université de Lorraine en mécanique et énergétique

Vice-doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine

Nous vous remercions et sommes honorés de votre présence dans notre jury.

Soyez assuré de notre plus grand respect et de notre gratitude pour l'implication dont vous faites preuve tout au long de notre formation, en clinique comme en travaux pratiques.

Soyez certain de notre estime et notre sympathie.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTES DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION

1. LE LASER

2. L'INTERET DU LASER EN ENDODONTIE

3. TABLEAU DE SYNTHESE DE L'UTILISATION DES LASERS EN ENDODONTIE

CONCLUSION

TABLE DES MATIERES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES ELECTRONIQUES

Listes des figures

Figure 1 : schéma simplifié de la composition d'un atome (source : www.centredessciencesdemontreal.com)	19
Figure 2 : spectre électromagnétique (source : www.electromagnetique.info)	20
Figure 3 : schéma simplifié de l'absorption et des émissions spontanée et stimulée d'un atome (source : www.optique-ingenieur.org)	20
Figure 4 : schéma simplifié d'un laser (source : schéma personnel)	22
Figure 5 : schéma récapitulatif des interactions du laser avec la matière (source : schéma personnel)	24
Figure 6 : diagramme d'absorption des rayonnements lasers par l'hémoglobine, la mélanine, l'eau et l'hydroxyapatite (source : Rey et coll., 2016)	25
Figure 7 : schéma simplifié des différents effets du laser sur les tissus (source : Rey et coll., 2016)	27
Figure 8 : profondeur de pénétration des différents lasers dans les tissus mous : les lasers He/ne, diode et Nd : YAG sont dits pénétrants alors que les lasers Nd : YAP, erbium et CO ² sont dits absorbés (source : Rey et coll., 2016)	29
Figure 9 : laser diode WISER3 Dr Smile [®] (source : internet, www.gacd.fr)	30
Figure 10 : Laser diode Gemini evo [®] 810+980 (source : internet, www.ultradent.com)	31
Figure 11 : PerioLaser [®] MVP-7r Laser Nd : YAG (source : internet, www.lanap.com)	32
Figure 12 : LUMIX [®] SURGERY DENTAL laser Nd : YAG (source : internet, www.fisioline.com)	32
Figure 13 : Laser dentaire Pulser 2 évolutions Er : YAG (source : www.kaelux.com)	34
Figure 14 : laser dentaire AdvErL Evo Morita [®] Er : YAG (source : www.morita.com)	34
Figure 15 : laser LOKKI [®] Nd : YAP (source : www.Cyclcadent.com)	35
Figure 16 : laser Er : Cr YSGG Waterlase iplus biolase [®] (source : www.biolase.com)	36

Figure 17 : laser CO ₂ de la marque DEKA® (source : www.dekalaser.fr)	37
Figure 18 : risque des différentes classes de laser sur les yeux et la peau (source : Parker, 2007).....	38
Figure 19 : pictogramme obligatoire pour les salles de soin utilisant un laser (source : www.securinorme.com)	40
Figure 20 : lunettes de protection Doctor Smile® pour laser diode dont la longueur d'onde du faisceau est comprise entre 660 et 1080nm (source : documents personnel)	41
Figure 21 : photographies cliniques du groupe ayant été traité par laser (a) saignement de la pulpe exposée (b) surface pulpaire irradiée au laser CO ₂ (source : Suzuki et coll., 2019).	44
Figure 22 : protocole de coiffage pulpaire direct : (a) radio préopératoire (b) exposition pulpaire lors de l'éviction carieuse (c) application du MTA® (d) restauration d'usage à la résine composite. L'utilisation du laser est effectuée entre la phase (b) et (c) pour le groupe concerné (source : Kermanshah et coll., 2020).	45
Figure 23 : photographies de canaux préparés par traitement laser : absence de cône d'arrêt (à gauche) et présence du cône d'arrêt (à droite) (source : Ali et coll., 2005)	50
Figure 24 : diagramme de l'augmentation du volume du canal en fonction des différents paramètres d'irradiations appliqués (source : Kokuzawa et coll., 2012) ...	51
Figure 25 : photographie SEM (scanning electron microscopy) d'une dent du groupe 1 (score 0) où le cône d'arrêt est clairement formé par la préparation au laser Er : YAG (source : Matsuoka et coll., 2000).....	52
Figure 26 : photographie à fort grossissement de l'effet de cavitation provoqué par une fibre laser de 300 microns dans un liquide (source : Blanken et coll., 2009)	56
Figure 27 : schéma des différents modes d'activation par le laser Er : YAG (Source : www.ijce.in)	57
Figure 28 : photographies présentant la pénétration du bleu de méthylène après les différentes techniques d'activation dans le tier apical, coronaire et médian du canal (MDA= activation manuelle, PUI= ultrasonique, EDDY= sonique, PIPS et SWEEPS= laser Er : YAG selon 2 modes différents) (source : Galler et coll., 2019).....	59

Figure 29 : diagramme présentant la quantité de différentes bactéries présentes en fonction de la puissance d'irradiation appliquée au laser Er : YAG (source : Noiri et coll., 2008).....	66
Figure 30 : photographie de coupes transversales et longitudinales de deux incisives permanentes obturées montrant la présence d'espaces à l'interface gutta-percha/parois canalaires (flèches noires - image B) A : activation de la solution d'irrigation à l'aide d'un laser diode. B : irrigation sans activation (source : Wang et coll., 2005).....	70
Figure 31 : photographies de coupes transversales de deux dents. A gauche, avec activation laser Nd : YAG lors de la phase d'irrigation et à droite sans activation L'image de gauche montre une percolation du colorant depuis l'apex sur plusieurs millimètres. Aucune pénétration n'est visible sur la photographie de droite (source : Goya et coll., 2000)	72
Figure 32 : radiographie post-opératoire d'une dent obturée à l'aide du laser Nd : YAG. Les flèches orange montrent la propulsion du ciment par le delta apical et les canaux accessoires (source : Rey et Missika, 2015).....	73
Figure 33 : coupes transversales de dents traitées classiquement (E et N) et traitées à l'aide laser Nd : YAG (NL et EL) montrant la profondeur de pénétration du ciment au sein des canalicules dentinaires à 2 et 5mm de l'apex (source : Moon et coll., 2012).....	74
Figure 34 : photographies SEM de la zone apicale de deux dents traitées endodontiquement. a. traitement canalaire assisté par laser Nd : YAG ; b. traitement canalaire conventionnel. L'image a. montre une parfaite adaptation du matériau d'obturation contrairement à l'image b. où la présence de vides est mise en évidence par les flèches blanches (source : Moura-Netto et coll., 2007).....	74
Figure 35 : photographies SEM présentant les débris d'obturation résiduels sur les parois canalaires aux différents tiers du canal selon la méthode d'activation des solutions d'irrigation testées. On remarque des parois plus propres lorsque le laser est utilisé (source : Shian Jiang et coll., 2016)	78
Figure 36 : scanner SEM (x1000) des parois radiculaires des différents tiers du canal en fonction des techniques d'activation étudiées. On remarque un meilleur nettoyage et une ouverture accrue des tubulis dentinaires en méthode PIPS. Les	

flèches rouges nous montrent les débris d'obturation encore présents dans le canal (source : Yang et coll., 2021)..... 79

Figure 37 : photographies d'une coupe longitudinale d'un canal après désobturation au laser à 50mJ/pulsation. On remarque l'absence de matériaux résiduels et des marques de carbonisation de la dentine. (source : Gorduysus et coll., 2019) 80

Figure 38 : photographie d'une coupe longitudinale d'un canal après désobturation aux ultrasons. On remarque la présence de matériaux résiduels (source : Gorduysus et coll., 2019)..... 80

Figure 39 : photographies de coupes longitudinales en stéréomicroscopie (x18) de dents désobturées à l'aide un laser Er, Cr : YSGG. On note la présence de zones de carbonisation pour le canal retraité avec le laser Er, Cr : YSGG à 3W (en bas) par rapport à celui traité avec le laser à 1,5W de puissance (en haut) (source : Abduljalil et Kalender, 2019) 81

Figure 40 : photographies de coupes longitudinales des dents de chaque groupe et des résidus d'obturation présents en fin de retraitement (A) Nd : YAP réciproque, (B) réciproque seul, (C) Nd : YAP + Mtwo, (D) Mtwo seul, (E) Nd : YAP + Mtwo + limes H, (F) Mtwo + limes H, (G) Nd : YAP + limes H, (H) limes H. On remarque un meilleur nettoyage de A par rapport à B, de C par rapport à D, de E par rapport à F et de G par rapport à H (source : Cheng et coll., 2021)..... 83

Figure 41 : radiographie au cours de l'utilisation d'un laser Nd : YAP pour le retrait d'un instrument de type Pro Taper® Next X2 cassé : (A) radiographie pré-opératoire avant présence du bris instrumental ; (B) radiographie avec présence du bris instrumental ; (C) radiographie du bris résiduel après 5 tirs laser. On remarque une diminution de la longueur de l'instrument fracturé après 5 tirs (source : Zhang et Wang, 2021) 85

Figure 42 : photographie en stéréomicroscopie d'un Pro Taper® Next X2 fracturé dans un canal après 5 tirs laser : une fusion de la dentine est présentée par la flèche noire et une zone de cratérisation par la flèche rouge (source : Lu Zhang et coll., 2021) 86

Figure 43 : photographie en stéréomicroscopie du tube d'étain et de la lime K soudés après le tir au laser Nd : YAG de 400mJ à 10 pulsations/s (source : Hagiwara et coll., 2013)..... 87

Figure 44 : photographie à fort grossissement d'une coupe transversale d'une dent montrant la fonte dentinaire et la destruction partielle de l'instrument provoqués par le laser Nd : YAG utilisé à 2W et 20 pulsations pendant 72s (source : Yu et coll., 2000)

..... 88

Liste des tableaux

Tableau 1 : avantages et inconvénients de différents lasers utilisés dans le coiffage pulpaire (source : komabayashi et coll., 2008)	43
Tableau 2 : réglages de puissances appliqués en fonction du type de fibre (source : Matsuoka et coll., 2000).....	52
Tableau 3 : récapitulatif des différentes techniques d'activation laser (source : Piétri, 2018)	57
Tableau 4 : tableau présentant la quantité de résidus de matériaux d'obturation présent à la fin du retraitement en fonction des différentes techniques d'activation des solutions d'irrigation testées (source : Jiang et coll., 2016).....	77
Tableau 5 : tableau présentant le volume (mm ³) de matériau éliminé du canal pour chaque technique d'activation des solutions d'irrigation testées (source : Jiang et coll., 2016)	77
Tableau 6 : résultats et temps de travail de l'élimination des limes fracturées par le laser selon les 3 paramètres de puissance du laser Nd : YAG appliqués (source : Yu et coll., 2000)	88

Liste des abréviations

- CO₂ : dioxyde de carbone
- EDTA : acide éthylènediaminetétraacétique
- Er : YAG : erbium : grenat d'yttrium – aluminium
- Er, Cr : YSGG : erbium, chrome : grenat d'yttrium-scandium-gallium
- HeNe : hélium-néon
- KTP : potassium-titanyl-phosphate
- LAI : *laser activated irrigation*
- LTA : acide lipoteichoic
- MEOPA : mélange équimolaire oxygène protoxyde d'azote
- MTA : *mineral triphosphate aggregate*
- NaOCl : hypochlorite de sodium
- Nd : YAG : Néodyme : grenat d'yttrium-aluminium
- Nd : YAP : Néodyme : perovskite d'yttrium-aluminium
- Nm : nanomètre
- PDT : thérapie photodynamique (*photo dynamic therapy*)
- PIPS : *photon-induced photoacoustic streaming*
- S : Seconde
- SEM : *scanning electron microscopy*
- SWEEPS : *shockwave enhanced emission photoacoustic streaming*
- W : Watt

Introduction

Depuis son invention en 1960, le laser fait partie intégrante de nos vies. Il trouve ses applications dans de nombreux domaines comme l'industrie, l'automobile, l'aérospatiale mais aussi au sein des objets du quotidien comme les télécommandes, les écrans plats ou encore les lecteurs de codes-barres.

Il trouve également de nombreuses indications en médecine comme en dermatologie, en ophtalmologie, en chirurgie vasculaire, en oncologie, en chirurgie générale et réparatrice ou encore en neurochirurgie. Il remplace parfois même l'usage des bistouris traditionnels et se place comme un *gold standard* dans de nombreux traitements.

En Odontologie, cette technologie a mis plus de temps à faire sa place. Actuellement, on trouve des applications du laser en chirurgie osseuse et muco-gingivale, pour la décontamination des poches parodontales, l'éclaircissement dentaire, la coagulation et la décontamination des sites d'extraction et plus récemment en endodontie.

Le traitement endodontique constitue l'un des piliers de notre pratique quotidienne et requiert un savoir-faire et une méthodologie rigoureuse.

Selon la HAS : « Le traitement endodontique a pour objectif de traiter les maladies de la pulpe et du péri-apex et ainsi de transformer une dent pathologique en une entité saine, asymptomatique et fonctionnelle sur l'arcade dentaire » (HAS, Traitement endodontique, 2008).

Cela passe, entre autres, par l'élimination la plus complète possible du contenu canalaire via une instrumentation manuelle et mécanisée (débridement physique) en association avec une solution d'irrigation antimicrobienne et solvante pour le tissu organique (débridement chimique). On parle de préparation chimio-mécanique.

Pour remplir l'ensemble de ces objectifs, il convient de réaliser le traitement selon différents axes établis par la triade endodontique de Schilder (1974) :

Une mise en forme conique et régulière de l'entrée du canal jusqu'à l'apex

Un nettoyage et une désinfection du système canalaire

La mise en place d'un matériau d'obturation étanche et biocompatible, qui permettra la cicatrisation tissulaire (Simon et coll., 2012).

Le retraitement endodontique, quant à lui, se définit comme la réalisation d'un nouveau traitement à la suite d'un traitement initial ayant échoué (Prada et coll., 2019).

Ces échecs sont liés à la présence des bactéries et de leurs toxines dans le réseau canalaire ; ces irritants diffusent vers les tissus parodontaux par toutes les voies de communication disponibles (foramen principal, canaux latéraux, canaux secondaires, etc.).

Différentes causes peuvent expliquer la présence de bactéries dans l'endodonte à la suite d'un traitement :

Une recolonisation du système canalaire en post-opératoire : la percolation bactérienne survient par défaut d'étanchéité, du traitement en lui-même ou de la restauration coronaire

Un défaut de désinfection per-opératoire : la persistance de micro-organismes est liée, entre autres, à l'incapacité d'instrumenter l'ensemble du système canalaire et d'y acheminer les solutions d'irrigation. On estime que 30% des surfaces restent non instrumentées à la suite d'un traitement endodontique, en partie du fait de la complexité de l'anatomie canalaire : ramifications, isthmes, canaux latéraux, secondaires et accessoires (Peters et coll., 2001).

De nombreux dispositifs d'optimisation des solutions d'irrigation ont été développés dans le but de désinfecter chimiquement les zones inaccessibles au débridement mécanique : activation au moyen d'un cône de gutta-percha calibré, de systèmes sonores ou ultra sonores, de limes mécanisées spécifiques ou encore d'un système d'irrigation par pression négative. Ces systèmes ont permis une amélioration de la désinfection canalaire cependant, leur efficacité est encore trop aléatoire et dépendante de nombreux facteurs (Nagendrababu et coll., 2018).

La qualité de la désinfection canalaire, reste malgré tout encore insuffisante. Le laser, du fait de son potentiel de décontamination et d'activation des solutions d'irrigation, pourrait être une alternative efficace afin de potentialiser la désinfection canalaire et permettre une diminution significative de la charge microbienne. Il pourrait également être intéressant dans bien d'autres applications.

Dans une première partie, nous aborderons les généralités sur les différents types de laser disponibles dans le domaine de l'odontologie.

Dans un deuxième temps nous verrons à travers différentes études les diverses applications cliniques du laser en endodontie.

Enfin, nous présenterons un tableau récapitulatif des différents lasers en fonction de leurs indications cliniques.

1. Le laser

1.1 Fonctionnement du laser

1.1.1 Historique

Laser signifie « *Light amplification by stimulated emission of radiation* » traduit en français par « amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement ».

Il a été développé en 1960 par Theodore Maiman, un physicien américain qui a été le premier à décrire le fonctionnement du laser à rubis, devenu indispensable dans l'industrie, la médecine, la recherche mais également dans notre vie quotidienne.

Le concept d'émission stimulée et d'amplification de la lumière a été évoqué par Albert Einstein en 1917. Il introduit l'idée que la lumière est constituée de « paquets d'énergie » qui seront par la suite appelés photons. Il pose l'hypothèse selon laquelle l'excitation d'un atome peut aboutir à l'émission d'un photon possédant une longueur d'onde et une direction unique.

Einstein a donc posé les bases théoriques qui permettront à ses successeurs de donner naissance au concept de laser (Gross et coll., 2007).

1.1.2 Principe de fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement d'un laser, il faut tout d'abord considérer la matière à l'échelle d'un atome. Un atome est constitué d'un noyau, formé de protons et de neutrons, autour duquel gravitent des électrons (figure 1) (Bogdan Allemann et Kaufman, 2011).

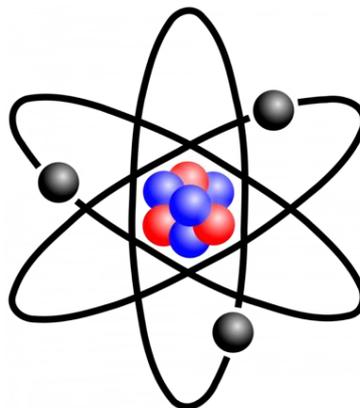


Figure 1 : schéma simplifié de la composition d'un atome (source : www.centredessciencesdemontreal.com)

Un atome est capable de recevoir de l'énergie, via l'absorption d'un photon défini comme une entité capable de transporter de l'énergie électromagnétique (figure 2).

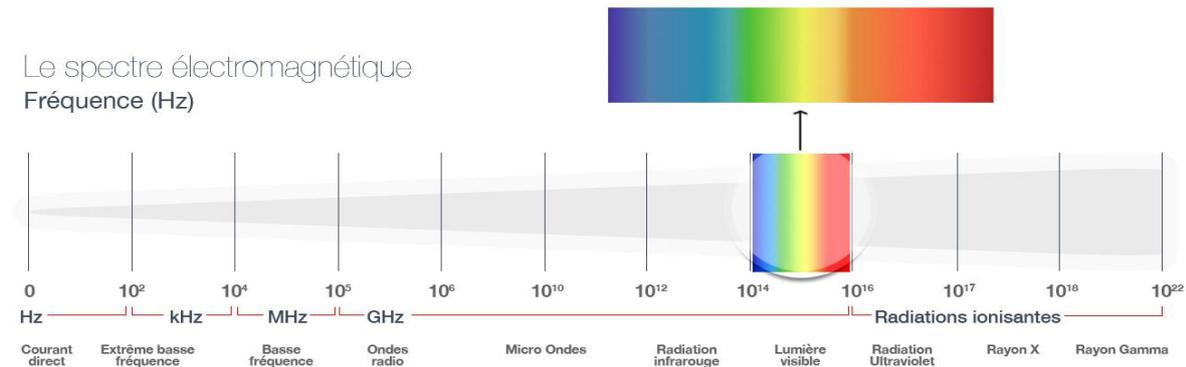


Figure 2 : spectre électromagnétique (source : www.electromagnetique.info)

Un photon est caractérisé par une longueur d'onde, une fréquence ou une énergie. Il est capable d'absorber un ou plusieurs photons et donc son/leur énergie. Il passe alors d'un état fondamental à un état excité : c'est **l'absorption**.

Un atome excité peut se désexciter spontanément en émettant un photon et ainsi revenir à son état fondamental : c'est le principe de **l'émission spontanée**.

Un dernier phénomène peut se produire, lorsque qu'un atome excité reçoit l'énergie d'un photon incident. L'atome est alors perturbé et poussé à se désexciter en émettant un photon. Ce dernier sera en phase avec le photon incident et possèdera la même fréquence. Il s'agit de **l'émission stimulée**, qui permet ainsi de dupliquer un photon (figure 3) (Cagnac et coll., 2002).

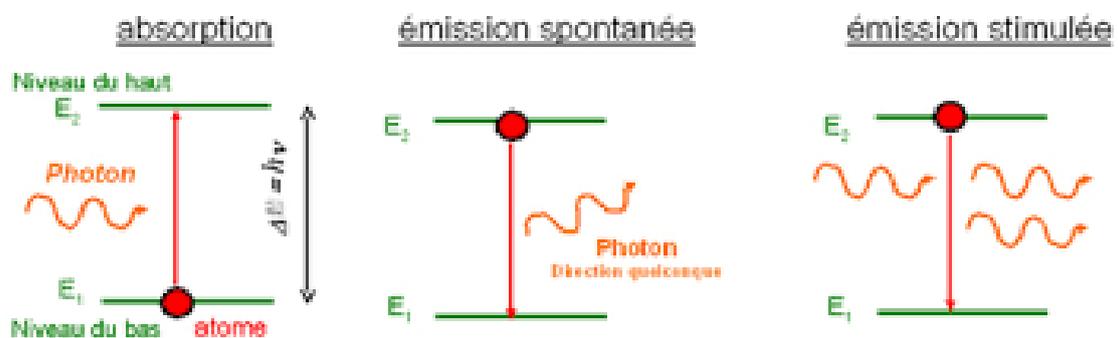


Figure 3 : schéma simplifié de l'absorption et des émissions spontanée et stimulée d'un atome (source : www.optique-ingenieur.org)

La laser utilise le principe de l'émission stimulée et nécessite donc la présence d'atomes dans un état excité. Au sein d'une population d'atome, il y aura plus d'atomes non excités que d'atomes excités. Il est alors nécessaire de réaliser une inversion de population, c'est-à-dire de faire passer les atomes d'un état de basse énergie à un état de haute énergie : c'est ce qu'on appelle l'**amplification** (Balembois, 2016).

Le fonctionnement d'un laser peut se définir de la manière suivante (figure 4) :

La source d'énergie permet d'alimenter le milieu amplificateur en photons excités. La sortie du milieu amplificateur est reliée à un système de miroirs : c'est ce qui va permettre l'amplification. Ces deux miroirs se font face, l'un totalement réfléchissant et l'autre semi-réfléchissant qui sera le miroir de sortie, capable de laisser passer des photons d'une longueur d'onde précise (photons constituant le faisceau laser). La lumière émise va donc être réfléchié successivement par le jeu de miroirs dans le milieu amplificateur. Une fois la longueur d'onde visée atteinte, le miroir semi réfléchissant laissera passer une petite fraction de la puissance lumineuse de la cavité qui constituera **le faisceau laser** (Schwob, 2010).

Les éléments composant un laser sont donc (figure 4) :

- Une source d'énergie, qui correspond au système d'excitation des atomes.
- Un milieu actif (ou amplificateur), qui sera alimenté par la source de pompage dans un état où il peut émettre de la lumière grâce à l'émission stimulée. Il constitue donc une réserve d'électrons. Il peut être de nature gazeuse (argon, CO₂...) ou cristalline (rubis, cristal, saphir...) ou encore formé par un colorant (rhodamine...) ou une diode semi conductrice.
- Une cavité optique de résonance qui permet le bouclage du processus et qui décide de la direction et de la fréquence du faisceau. Elle laissera passer seulement les photons en phase et dans une direction unique. Une partie de l'énergie lumineuse présente dans la cavité s'échappe pour donner le faisceau laser.

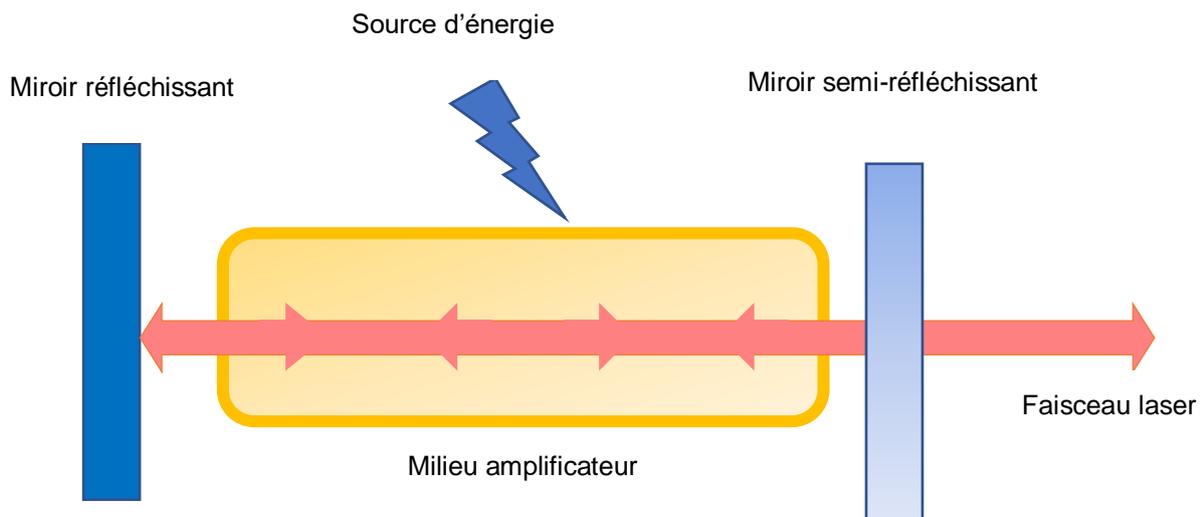


Figure 4 : schéma simplifié d'un laser (source : schéma personnel)

1.1.3 Caractéristiques de la lumière et du rayon laser

La lumière est constituée d'un ensemble d'ondes électromagnétiques caractérisées par une longueur d'onde. Les longueurs d'ondes visibles par l'œil humain se situent entre 380 et 780nm (Rigaudière et coll., 2009).

La lumière laser quant à elle est composée d'une seule longueur d'onde (ou fréquence) qui la caractérise. Elle est cohérente, monochromatique et unidirectionnelle, en opposition à la lumière classique qui est incohérente, multichromatique et multidirectionnelle (Schwob, 2010).

1.2 Effets du laser sur les tissus

Lorsqu'un rayonnement laser entre en contact avec un tissu cible, plusieurs phénomènes peuvent survenir. Ces effets influenceront la pénétration et l'absorption du rayonnement laser au travers de ces tissus.

Lors de l'interaction entre le tissu et la matière, 5 types d'interaction peuvent se produire (figure 5).

- La réflexion : le rayon incident est réfléchi sans pénétration dans le tissu cible et sa direction est modifiée. L'énergie et la longueur d'onde restent inchangées.
- La diffusion : le rayon incident rencontre une particule ou un milieu non homogène, modifiant alors sa direction et l'énergie de celui-ci. Ces changements sont dépendants de la taille des particules du milieu. Pour un milieu donné un coefficient de diffusion est défini.
- L'absorption : l'énergie du rayon incident est absorbée par le tissu cible et convertie en chaleur dans la plupart des cas. Il est possible de définir pour un milieu donné, un coefficient d'absorption.
- La transmission (ou pénétration) : le rayon incident traverse la matière. La nature de celle-ci n'a pas d'influence sur la direction, l'énergie et la longueur d'onde du faisceau transmis
- La fluorescence : le rayon incident est transformé en chaleur au lieu d'être réémis (Pang et coll., 2012).

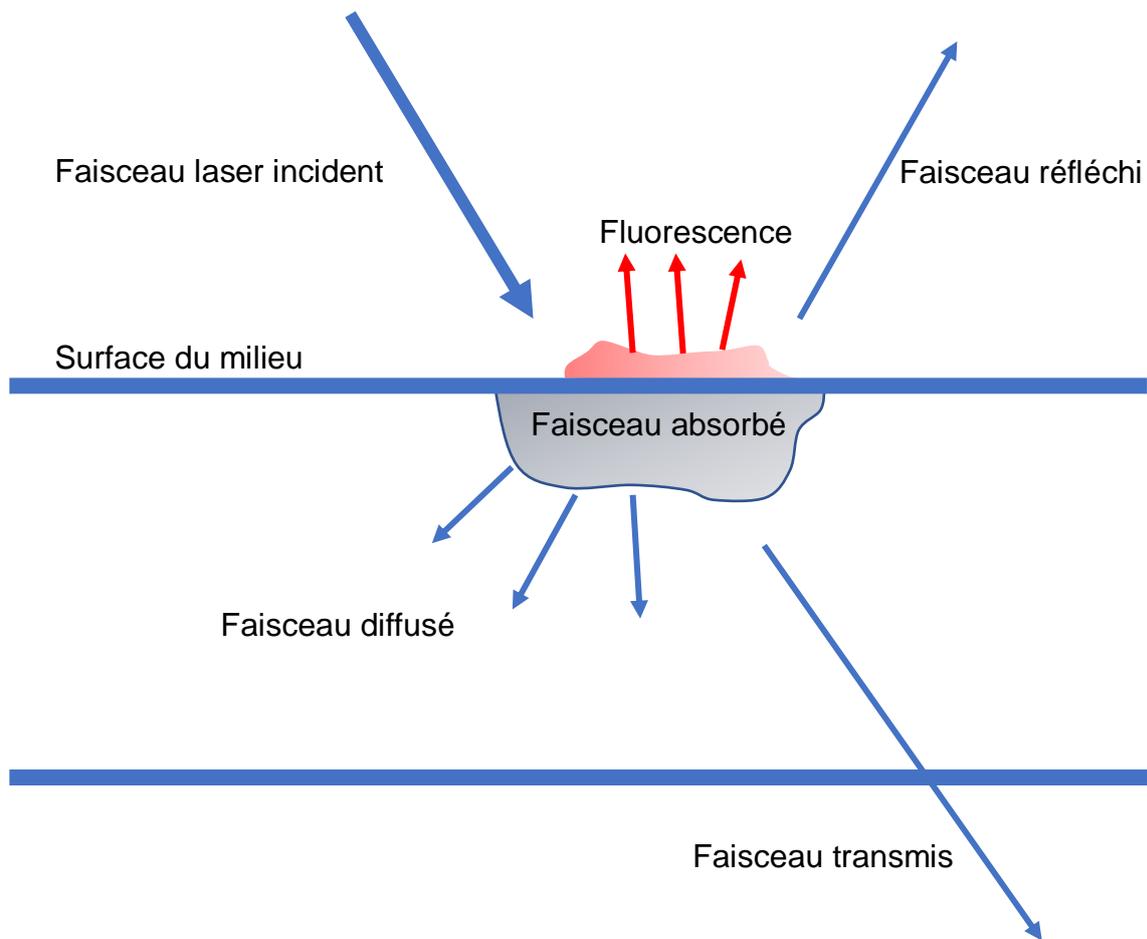


Figure 5 : schéma récapitulatif des interactions du laser avec la matière (source : schéma personnel)

Sur les tissus vivants, l'effet du rayonnement laser dépend du tissu cible et de ses caractéristiques, de la transmission aux couches inférieures ainsi que des caractéristiques propres du laser utilisé.

Un volume d'action pourra donc être défini pour chaque laser au sein d'un tissu spécifique en fonction de sa teneur en eau, mélanine, hydroxyapatite et hémoglobine (figure 6) (Rey et coll., 2016).

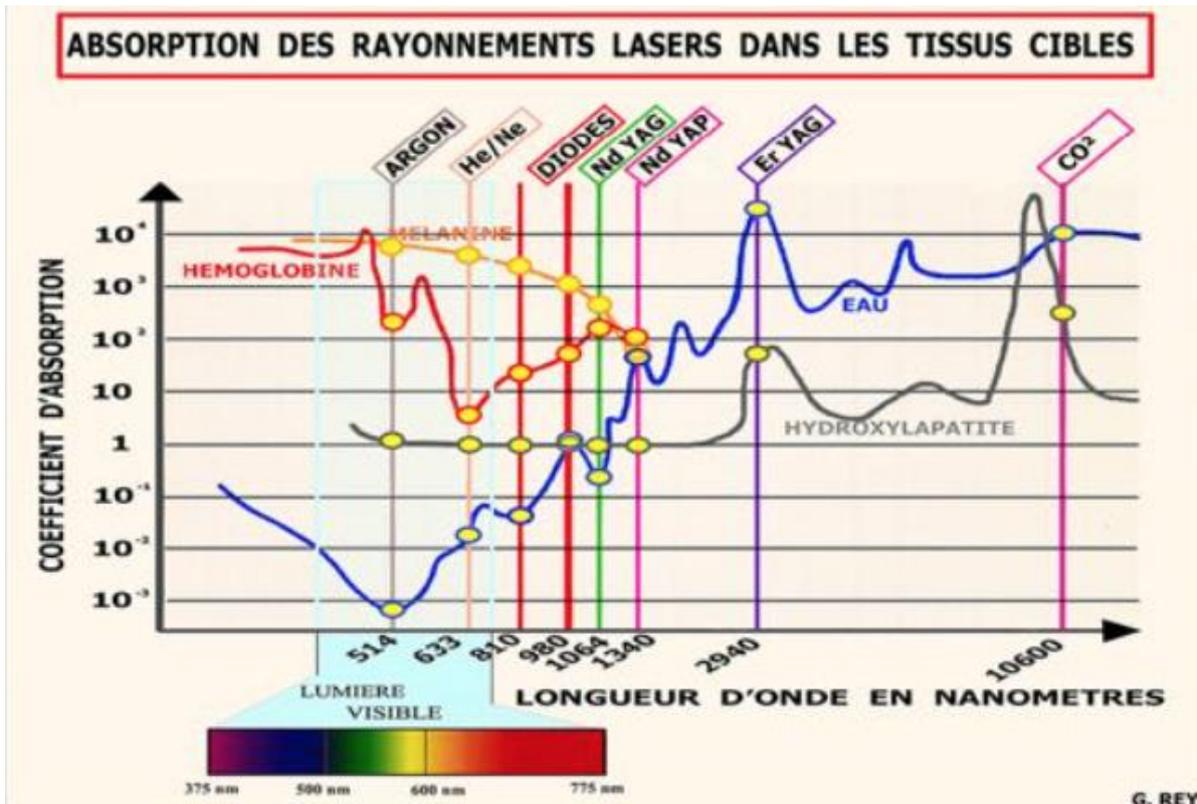


Figure 6 : diagramme d'absorption des rayonnements lasers par l'hémoglobine, la mélanine, l'eau et l'hydroxyapatite (source : Rey et coll., 2016)

Sur les tissus vivants, les effets peuvent être les suivants (figure 7) :

- Les effets photochimiques

- La **photobiostimulation** ou **biostimulation** : c'est la capacité du rayon laser à agir sur les cellules par modification de leur activité enzymatique et de leur potentiel de prolifération. Cet effet favorise la cicatrisation, la réduction de l'inflammation ou de l'œdème et permet dans certains cas l'éclaircissement dentaire par activation d'un gel photosensible à base de peroxyde d'hydrogène (Mester, 2013).
- La **photothérapie dynamique** : c'est la capacité du rayonnement à décontaminer les tissus infectés (os, gencive, dent...). En fonction de la longueur d'onde, certaines cibles tels que les constituants intra-cellulaires peuvent être touchés de façon très sélective. Cela permet de détruire certains éléments de la cellule pouvant entraîner son apoptose. En médecine cet effet est de plus en plus utilisé dans le traitement des cancers. On utilise des colorants photosensibles qui se fixent à la surface des cellules

tumorales pour être spécifiquement détruites par le rayon laser (Donohoe et coll., 2019). D'un point de vue dentaire, ce mécanisme sera utile pour la décontamination des surfaces comme les parois canales en endodontie par ciblage des bactéries et virus présents dans l'endodonte (Vendramini et coll., 2020).

- Les effets photothermiques :

Il s'agit du principal effet du rayonnement laser. Les effets photothermiques dépendent du spectre d'absorption des différents tissus et du volume interactif (zone dans laquelle se produit la transformation énergétique en chaleur au sein du tissu).

On retrouve :

- **La vasodilatation** : en dessous de 50°C, elle entraîne un afflux de sang et de facteurs de croissances dans la zone ciblée pour permettre une meilleure cicatrisation.
- **La coagulation** : entre 55 et 70°C, elle dénature les protéines contenues dans le sang et entraîne une hémostase.
- **La carbonisation** : entre 75 et 85°C, elle génère une déshydratation et par la suite la mort des cellules ciblées (Park et coll., 2021 ; Yamasaki et coll., 2008).

- Les effets photoablatifs ou effets de coupe :

Ils n'entraînent pas de nécrose des tissus cibles. Les lasers sont utilisés à haute intensité avec des temps d'application très courts. La laser joue ainsi le rôle d'un bistouri (Sutter et coll., 2019).

- Les effets photomécaniques et photoacoustiques (appelés également effets « canon ») :

Ils sont présents sur des lasers qui fonctionnent par impulsion. Ils provoquent des micro-explosions dans les tissus durs ainsi qu'une évaporation des molécules d'eau au sein de ceux-ci. Les effets photomécaniques peuvent être utilisés pour l'éviction carieuse (Olivi et coll., 2011) et le décollement des pièces prothétiques de types facettes/inlay/onlay car ils provoquent un éclatement des

liaisons inter-prismatiques présentes au niveau de la zone de collage (Ghazanfari et coll., 2019).

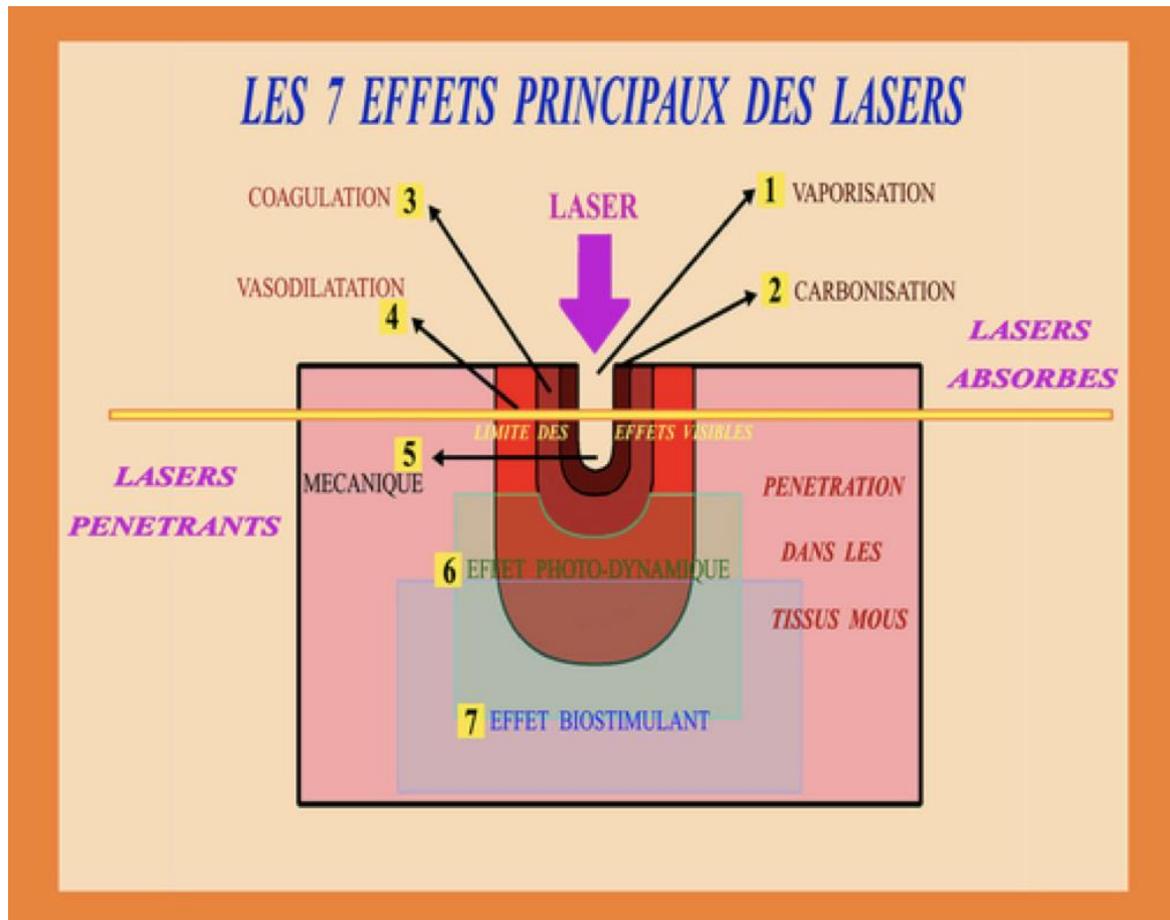


Figure 7 : schéma simplifié des différents effets du laser sur les tissus (source : Rey et coll., 2016)

1.3 Les différents types de laser

Il existe six familles différentes de laser définies en fonction de la nature du milieu amplificateur (Forget et coll., 2010).

On retrouve ainsi :

- Les lasers à gaz (argon, CO₂, HeNe),
- Les lasers à solide (rubis, Er : YAG, Nd : YAG, Er-CR YSGG, Nd : YAP, KTP, etc.),
- Les lasers à liquide (stilbène, coumarine, rhodamine...)
- Les lasers semi-conducteur (diode),
- Les lasers à vapeur métallique (cuivre, or),
- Électrons libres.

En endodontie, se sont principalement les lasers cristallins (Nd : YAP, Nd : YAG, Er : YAG, Er-Cr), diode et à gaz (CO₂, argon, HeNe) qui sont utilisés.

Certains lasers sont dits pénétrants (laser HeNe, diode, Nd : YAG) c'est-à-dire qu'ils peuvent agir en profondeur sans agir sur les tissus superficiels. Ils sont donc peu absorbés par les tissus. Ils serviront par exemple à la vasodilatation, la biostimulation ou encore à la décontamination.

D'autres lasers sont dits absorbés (Nd : YAP, erbiums et CO₂), ils sont capables de traiter en surface sans pénétrer dans les tissus sous-jacents. On les utilisera pour la chirurgie de tissus mous ou durs et pour la vasodilatation ou volatilisation des tissus de surface (figure 8) (Parker et coll., 2020).

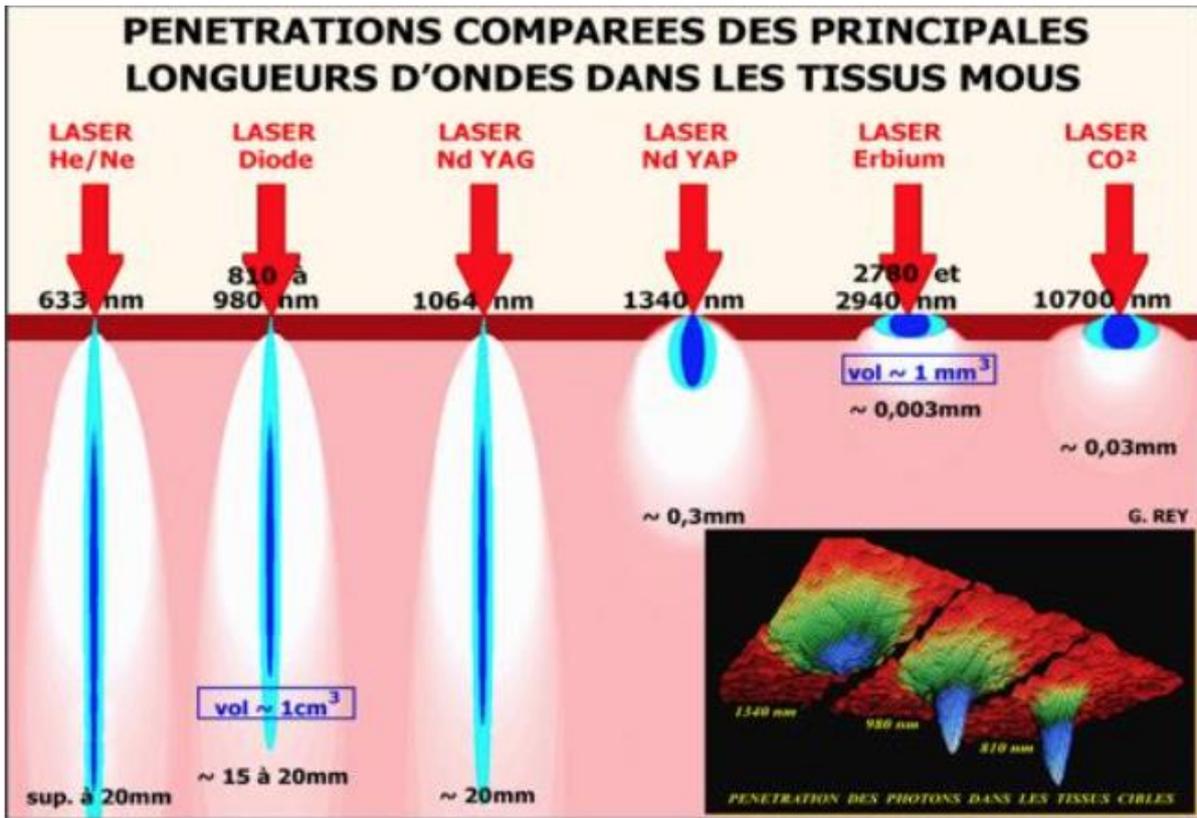


Figure 8 : profondeur de pénétration des différents lasers dans les tissus mous : les lasers He/ne, diode et Nd : YAG sont dits pénétrants alors que les lasers Nd : YAP, erbium et CO² sont dits absorbés (source : Rey et coll., 2016)

La profondeur de pénétration des lasers varie en fonction des tissus cibles et de leur teneur en protéines, hémoglobine, eau, mélanine, collagène et hydroxyapatite (Figure 6). Le laser diode est peu absorbé dans l'eau et l'hydroxyapatite, il sera donc plus utile pour la coagulation et la vasodilatation. Au contraire, le laser Er : YAG, qui lui a son maximum d'absorption dans l'eau, pourra être utile pour la chirurgie osseuse par exemple (Rey et Missika, 2016).

1.3.1 Les lasers pénétrants

- **Le laser diode**

Le laser diode fonctionne avec des matériaux semi-conducteurs tels que le gallium, l'arséniure, l'aluminium ou encore l'indium.

L'intérêt de ce laser est qu'il convertit directement l'électricité en lumière avec un rendement d'environ 50% (Nathan, 1966).

La lumière émise est monochromatique cohérente, elle varie entre plusieurs longueurs d'onde, les plus courantes étant 660nm, 810nm, 880nm et 980nm.

La puissance varie généralement de 2 à 20 W.

Les rayonnements du laser diode sont très peu absorbés dans l'hydroxyapatite et l'eau mais possèdent une bonne absorption dans l'hémoglobine (Rey et Missika, 2016).

Deux longueurs d'onde se sont distinguées ces dernières années en dentisterie : 810 et 980nm (Asnaashari et coll., 2016). Du fait de son rayonnement pénétrant et de ces longueurs d'onde proches de l'infrarouge, le laser diode est souvent utilisé en parodontologie et en chirurgie des tissus mous (coagulation...). Il convient aussi pour la biostimulation (accélération de la cicatrisation, analgésie...) et la décontamination des sites opératoires et des canaux en endodontie. Les avantages de ce laser sont sa faible encombrement, sa facilité d'utilisation, sa polyvalence et son prix modéré (Ortega-Concepción et coll., 2017).

Les figures 9 et 10 montrent des exemples de lasers diode disponibles sur le marché.



Figure 9 : laser diode WISER3 Dr Smile® (source : internet, www.gacd.fr)



Figure 10 : Laser diode Gemini evo® 810+980 (source : internet, www.ultradent.com)

- **Le laser Nd : YAG**

Le laser Nd : YAG est un laser qui fonctionne grâce au grenat d'yttrium et d'aluminium (yttrium aluminium garnet), un solide cristallin dont les ions Y^{3+} sont substitués par des ions néodymes (Nd^{3+}).

Il émet dans le domaine de l'infrarouge à 1064 nm. Son système d'émission se compose d'une fibre optique montée sur une pièce à main.

Le laser Nd : YAG s'utilise à une puissance comprise en moyenne entre 1 et 3 watts (Bergmans et coll., 2006).

Il s'agit d'un laser pénétrant dans les tissus mous, ce qui lui permet d'être utilisé pour obtenir l'hémostase mais également lors des procédures de décontamination. Il est bien absorbé dans les tissus pigmentés ou vascularisés et très peu dans l'eau (Rey et Missika, 2016). Il sera ainsi utilisé pour la chirurgie des tissus mous, les traitements parodontaux, la coagulation et la désinfection des sites chirurgicaux et endodontiques (Ding et coll., 2015).

Les figures 11 et 12 montrent quelques exemples de laser Nd : YAG disponibles sur le marché.



Figure 11 : PerioLaser® MVP-7r Laser Nd : YAG (source : internet, www.lanap.com)



Figure 12 : LUMIX® SURGERY DENTAL laser Nd : YAG (source : internet, www.fisioline.com)

- **Le laser hélium-néon**

Il contient un milieu actif composé de 85% d'hélium et de 15% de néon.

Les rayonnements de ce laser ont une longueur d'onde comprise entre 630 et 1000nm et sa puissance varie de 1 à 50mW.

Le laser hélium néon est pénétrant, ce qui lui confère un effet antalgique, anti-inflammatoire (Rubio et coll., 2010), myorelaxant et des propriétés intéressantes pour améliorer la cicatrisation des tissus mous (Sobouti et coll., 2015).

1.3.2 Les lasers absorbés

- **Le laser Er : YAG**

Dans ce système, le cristal d'yttrium est dopé à l'erbium et la longueur d'onde de son rayonnement est relativement élevée (2940 nm).

Ses impulsions sont discontinues et très courtes : de 150 à 240 microsecondes entrecoupées de périodes de repos. La fréquence peut varier de 4 à 50Hz.

Il est peu pénétrant et trouve son maximum d'absorption dans l'eau et l'hydroxyapatite. Il ne peut donc pas pénétrer profondément et les rayonnements sont directement absorbés à la surface du tissu cible. Son absorption rapide entraîne un effet d'élévation thermique important.

Au niveau des tissus durs, il provoque la création de micro-cratères, il faut donc être vigilant lors de son utilisation sur les tissus dentaires et notamment en endodontie pour éviter le risque de cratérisation voire de perforation. Dans ce cadre, des longueurs d'onde et des fréquences plus faibles sont recommandées (Olivi et Genovese, 2011).

Le laser Er : YAG est utilisé en odontologie conservatrice pour l'éviction carieuse et en endodontie pour la décontamination canalaire et l'activation des solutions d'irrigation (partie 2.3 et 2.4). Il est aussi utilisé en chirurgie pour le débridement et la décontamination des poches parodontales, pour les frénectomies, les élongations coronaires, les chirurgies osseuses, les résections apicales, etc. Il est considéré comme le laser le plus polyvalent en omnipratique (Bader et Krejci, 2006).

Les figures 13 et 14 montrent quelques exemples de laser Er : YAG disponibles sur le marché.



Figure 13 : Laser dentaire Pulsar 2 évolutions Er : YAG (source : www.kaelux.com)



Figure 14 : laser dentaire AdvErL Evo Morita® Er : YAG (source : www.morita.com)

- **Le laser Nd : YAP**

Le laser Nd : YAP utilise un cristal d'yttrium, d'aluminium et de pérovskite dopé au néodyme.

Sa longueur d'onde est de 1340nm.

Son rayonnement est fortement absorbé par l'eau, faiblement par l'hémoglobine, la mélanine et l'hydroxyapatite (Rey et coll., 2016). Il est absorbé au sein de tissus mous et possède une bonne efficacité de coupe notamment sur le tissu gingival et pulpaire. Il a aussi un fort potentiel de coagulation que ce soit au niveau de la pulpe, de l'os ou encore de la gencive. Il sera également très bon en matière de décontamination qu'elle soit canalaire ou parodontale (Namour et coll., 2016).

Le laser Nd : YAP fonctionne par impulsion : son effet « *canon* » permet, par un mécanisme de surpressions centrifuges et de dépressions centripètes, de déstructurer et de décoller les phases minérales et organiques des boues dentinaires générées lors de l'instrumentation canalaire. Son effet « *souffle* » permettrait le nettoyage de l'endodonte et la propulsion du ciment d'obturation dans l'endodonte. Ces deux mécanismes permettent par conséquent une amélioration qualitative de l'obturation, du nettoyage et l'assèchement de l'endodonte en plus de son effet décontaminant (Mansouri, 2018) (Al et coll.,2015).

La figure 15 montre un exemple de laser Nd : YAP disponible sur le marché.



Figure 15 : laser LOKKI® Nd : YAP (source : www.Cyclcadent.com)

- **Le laser Er-Cr : YSGG**

Le laser Er-Cr : YSGG possède un milieu actif d'yttrium scandium gallium grenat dopé avec des ions erbium et chrome.

Sa longueur d'onde avoisine les 2780nm.

Il s'agit d'un laser très peu pénétrant. Ses rayonnements sont presque tous absorbés à la surface du tissu cible et ne pénètrent que sur quelques micromètres.

En endodontie, son mode de fonctionnement impulsif permet la propulsion des solutions d'irrigation et du matériau d'obturation dans les canaux (Van As, 2004).

La figure 16 montre un exemple de laser Er-Cr : YSGG disponible sur le marché.



Figure 16 : laser Er : Cr YSGG Waterlase iplus biolase® (source : www.biolase.com)

- **Laser à dioxyde de carbone**

Son milieu actif est composé de 10% de CO₂, 10% d'azote et de 80% d'hélium. Le gaz est alimenté par une décharge électrique.

La longueur d'onde de ce laser varie de 9300 à 10060nm, dans le domaine de l'infrarouge et sa puissance est de 5W.

Il peut fonctionner en mode continu ou pulsé. C'est un laser très peu pénétrant et il est totalement absorbé par l'eau, l'hydroxyapatite et l'hémoglobine (Sutter et coll., 2019).

Il est donc indiqué en chirurgie des tissus durs ou mous mais également pour la coagulation. Il peut également être utile dans la décontamination.

Son usage présente cependant un risque important d'échauffement des tissus cibles (Simon et coll., 2021) (Deppe et Horch, 2007).

La figure 18 montre un exemple de laser CO₂ disponible sur le marché.



Figure 17 : laser CO₂ de la marque DEKA® (source : www.dekalaser.fr)

1.4 Risques de l'utilisation du laser

Les lasers sont classés depuis 2003 dans diverses catégories relatives à leur dangerosité et au niveau de protection nécessaire à leur usage. Ils se déclinent en catégories 1, 1M, 2, 2M, 3R, 3B et 4 (figure 18) (Parker, 2007).

	Short time exposure (t)		Long time exposure (T)		Specular reflection of beam	Skin exposure to beam
	Magnified exposure	Unprotected eye	Magnified exposure	Unprotected eye		
I						
IM						
II						
IIM						
IIIR						
IIIB						
IV						

	No risk from exposure to laser beam		Caution required to prevent exposure to beam		Maximal protection required. Laser beam is dangerous
--	-------------------------------------	--	--	--	--

Figure 18 : risques des différentes classes de laser sur les yeux et la peau (source : Parker, 2007)

Les lasers à usage dentaire se situent dans la catégorie IV et nécessitent des moyens de protection complets, tout particulièrement au niveau des yeux.

Ces risques sont encourus aussi bien par le praticien que par le patient et l'assistante, ou toute personne présente dans la salle de soins de manière générale (Parker, 2007).

- **Risques oculaires**

Le principal risque lors de l'utilisation d'un laser est la création de lésions irréversibles au niveau de l'œil, par mauvais usage du dispositif et/ou par insuffisance de protection. En effet, les rayonnements laser peuvent provoquer des brûlures au niveau de la cornée, du cristallin et de la rétine de manière directe mais aussi de manière indirecte.

Initialement, les atteintes ne seront pas forcément douloureuses car la rétine est dépourvue de nocicepteurs (responsables de la douleur).

Ces lésions pourront provoquer à terme une diminution de l'acuité visuelle, l'apparition de tâches, d'une cataracte (opacification du cristallin) ou encore la cécité totale dans les formes les plus graves.

Ce sont principalement les rayonnements infrarouges qui possèdent un fort pouvoir de pénétration au niveau de l'œil.

Le port de lentilles de contact est déconseillé car les rayonnements peuvent engendrer la combustion de ces dernières (Linton et coll., 2019).

- **Risques pour la peau**

Les risques pour la peau sont moins importants que pour les yeux.

Le risque provient essentiellement de l'énergie thermique dégagée par les lasers qui peuvent générer des brûlures allant d'un érythème (rougeur au niveau de la peau) à des ampoules ou cloques.

Les ultra-violets et les infra-rouges étant fortement absorbés à la surface de la peau, ils peuvent engendrer des mutations au niveau cellulaire responsables d'effets allant d'un vieillissement prématuré de la peau à l'apparition de pathologies plus graves telles que des lupus, des mélanomes ou encore des carcinomes (Dudelzak et Goldberg, 2011).

- **Autres risques**

Le laser, comme beaucoup d'outils présents au cabinet dentaire, possède des composants électroniques : il y a donc des risques liés aux accidents d'origine électrique. Pour prévenir ces risques, le laser doit être disposé et utilisé dans un endroit sec. Il doit également être révisé et entretenu par du personnel compétant (le fabricant de préférence) de façon régulière.

Il y a également un risque d'incendie lorsqu'il y a présence de produits inflammables et réfléchissants à proximité.

Le laser ne doit pas être utilisé en présence d'un gaz inflammable, c'est pourquoi il est fortement déconseillé de pratiquer des traitements au laser dans une salle où des traitements sous MEOPA (mélange équimolaire d'oxygène et de protoxyde d'azote) sont en cours.

Il existe également un risque de propagation de virus par la vaporisation de ces derniers dans l'air ambiant (Dudelzak et Goldberg, 2011).

1.5 Précautions d'usage

Lors de l'achat d'un laser, il faut tout d'abord vérifier que celui-ci est conforme aux normes de la communauté européenne et comporte par conséquent le marquage « CE » attestant qu'il répond aux différentes normes de sécurité et d'environnement.

Le laser est soumis, pour une utilisation professionnelle, au décret 2010-750 du 2 juillet 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les rayonnements optiques artificiels (Décret n° 2010-750, 2010).

- **Les protections collectives**

La salle de soin dans laquelle le laser est utilisé doit afficher le pictogramme avertissant du danger lié à l'utilisation d'un laser (figure 19). Il doit être inscrit « rayonnement laser - exposition dangereuse de l'œil ou de la peau au rayonnement direct ou diffus – appareil à laser de classe 4 ».

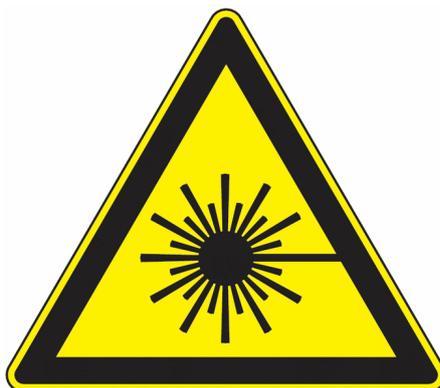


Figure 19 : pictogramme obligatoire pour les salles de soin utilisant un laser (source : www.securinorme.com)

Il est également recommandé d'installer un dispositif de type signal lumineux à l'extérieur de la salle de soin, s'activant lorsque le laser est en cours d'utilisation (INRS, 2018).

- **Les protections individuelles**

Afin de prévenir le risque oculaire, l'assistante, le praticien ainsi que le patient doivent porter des lunettes de protection. Celles-ci doivent correspondre à la norme EN207 et comporter les lettres D pour le mode continu et IRM pour le mode pulsé. Elles doivent correspondre à la longueur d'onde du laser utilisé. La paire de lunettes

doit également comprendre des protections latérales. Elles ne doivent en aucun cas être rayées, ce qui rendrait la protection inefficace. Le marquage CE et le nom du fabricant doivent également être mentionnés (figure 20) (Daggett et coll., 2020).



Figure 20 : lunettes de protection Doctor Smile® pour laser diode dont la longueur d'onde du faisceau est comprise entre 660 et 1080nm (source : documents personnel)

Concernant le risque de vaporisation des virus, le personnel soignant autour du patient doit porter un masque, de préférence de type FFP2. Certaines bactéries et champignons peuvent également être vaporisés. Il est aussi conseillé de travailler sous aspiration placée dans l'idéal à 1cm de la zone cible (Dudelzak et Goldberg, 2011).

1.6 Conduite à tenir en cas d'accident

En cas d'incident lié au fonctionnement du laser, la LSO (*laser safety officer*) doit être prévenue. Le laser en question ne doit plus être utilisé jusqu'à ce que la raison de la panne ou du dysfonctionnement soit mis en évidence par un service technique compétant. Les personnes amenées à utiliser ce laser doivent être avertis de l'incident et une déclaration précise devra être faite ainsi qu'une ouverture d'enquête si cela s'avère nécessaire (Barat, 2003).

2. L'intérêt du laser en endodontie

2.1 Le coiffage pulpaire

Le coiffage pulpaire direct est réalisé lorsque, au cours de l'éviction d'une lésion carieuse ou à la suite d'un traumatisme, une effraction pulpaire survient. Le principe du coiffage direct est d'appliquer un matériau bioactif au contact de la plaie pulpaire, avant la réalisation de la restauration coronaire d'usage de la dent. L'objectif étant de favoriser la cicatrisation de la plaie pulpaire et de la protéger par création d'une barrière minéralisée. Cette barrière sera créée à partir de cellules odontoblastiques recrutées par le matériau de coiffage au contact de la plaie pulpaire. Le coiffage pulpaire permettra, en cas de succès, de conserver la vitalité pulpaire et d'éviter le traitement endodontique (Bjørndal et Mjör, 2001).

Plusieurs biomatériaux ont été décrits pour le coiffage pulpaire direct. Le MTA[®], la Biodentine[®] et l'hydroxyde de calcium sont les matériaux les plus utilisés actuellement et les plus aptes à permettre une cicatrisation pulpaire. Ils se doivent d'avoir un potentiel antiseptique, anti-inflammatoire et hémostatique (Kunert et Lukomska-Szymanska, 2020).

Le succès thérapeutique dépendra en majorité du potentiel de régénération pulpaire, qui est plus élevé chez un sujet jeune. Plusieurs études montrent que le traitement par coiffage direct avec un matériau comme Biodentine[®] a environ 90% de chance de réussite chez un patient de moins de 40 ans, contre 74% chez un sujet plus âgé (Lipski et coll., 2018).

Le laser présente un potentiel de désinfection, de coagulation de surface et de biostimulation permettant le recrutement cellulaire nécessaire à la création d'une matrice de cicatrisation dentinaire, comme les matériaux de coiffages.

Nous allons voir à travers différentes études quels lasers peuvent être utilisés pour cette indication et quelles sont les résultats espérés.

Dans une revue de littérature publiée en 2015 par Komabayashi et coll. plusieurs lasers ont été comparés (Komabayashi et coll., 2015).

Les avantages de chacun des lasers les plus fréquemment utilisés en odontologie sont exposés dans le tableau 1. Les lasers les plus intéressants en ce qui concerne la coagulation, l'ablation des tissus mous, la décontamination ainsi que la biostimulation sont les lasers diode, Nd : YAG, Er : YAG, Er, Cr : YSGG et CO₂.

Tableau 1 : avantages et inconvénients de différents lasers utilisés dans le coiffage pulpaire (source : komabayashi et coll., 2008)

Type de laser	Longueur d'onde	Puissance	Temps	Indication	Mode d'utilisation	Avantages	Désavantages	Références
CO ₂	10600 nm	0,5 -1 W Continu et pulsé	0,5-3 s	Tissus mous	Continu et/ou pulsé	Hémostase forte Décontaminant Photobioestimulant Prix peu élevé	Élévation thermique importante (risque de carbonisation) Pas de fibre optique (moins précis) Boitier encombrant	Meker et coll. Suzuki et coll. Anic et coll. Moritz et coll.
Nd : YAG	1064 nm	1,75-2 W 20 pps	0,5-20 s	Tissus mous	Continu et/ou pulsé	Hémostase forte Décontaminant Photobioestimulant Embouts en fibre optique	Élévation thermique importante (risque de carbonisation) Prix élevé Boitier encombrant	Anic et coll. Odabas et coll. Santucci et coll.
Er : YAG	2936 nm	25-200 mJ/pulse 2-20 pps	5-15 s	Tissus dur / mous	Continu et/ou pulsé	Hémostase faible à modérée Décontaminant Photobioestimulant Peu de changement thermique Embouts en fibre optique	Prix élevé Boitier encombrant	Hasheminia et coll. Jayawardena et coll. Wigdor et coll. Olivi et coll. Huth et coll.
Er,Cr : YSSG	2780 nm	0,25-0,5 W (25mJ/pulse, 10-20 pps)	5-15 s	Tissus dur / mous	Continu et/ou pulsé	Hémostase faible à modérée Décontaminant Photobioestimulant Peu de changement thermique Embouts en fibre optique	Prix élevé Boitier encombrant	Olivi et coll. Toomarian et coll. Blanken et coll.
Diode	810-980 nm	0,7-5 W Continu	1-2 s	Tissus mous	Continu et/ou pulsé	Hémostase forte Décontaminant Photobioestimulant Prix peu élevé Large sélection d'embouts en fibre optique	Élévation thermique importante (risque de carbonisation)	Yilmaz et coll. Yazfandar et coll.

- Le laser à CO₂

Dans leur étude, Moritz et coll. (1998) ont montré que sur 100 patients chez qui un coiffage pulpaire a été réalisé à l'aide d'un laser CO₂ et d'hydroxyde de calcium, 93% des pulpes sont restées vivantes à 18 mois contre 68% dans le groupe témoin traité seulement avec de l'hydroxyde de calcium (Moritz et coll., 1998).

Une étude plus récente menée par Suzuki et coll. (2019) a montré que la couche dentinaire présente au contact de la pulpe après 12 mois avait la même épaisseur sur les dents traitées uniquement par ajout d'hydroxyde de calcium (Dycal®) au contact de la plaie pulpaire que sur les dents traitées uniquement par le laser CO₂. Le laser a été utilisé en mode super-pulsé à une puissance de 0,5W pendant 15sec en effectuant de petits mouvements circulaires autour de la plaie pulpaire afin d'obtenir l'hémostase, la désinfection et la coagulation de la pulpe.

La figure 21 ci-dessous montre le résultat de l'irradiation sur une pulpe exposée du groupe traité par le laser CO₂ (Suzuki et coll., 2019).

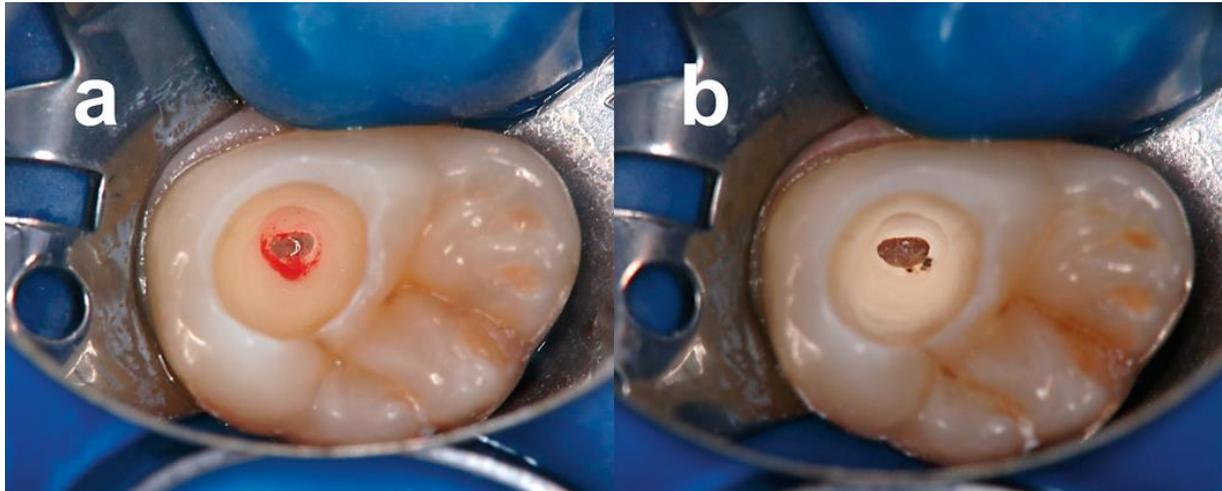


Figure 21 : photographies cliniques du groupe ayant été traité par laser (a) saignement de la pulpe exposée (b) surface pulpaire irradiée au laser CO₂ (source : Suzuki et coll., 2019)

D'après ces études, le laser CO₂ semble apporter une amélioration du taux de succès du coiffage pulpaire direct lorsqu'il est utilisé en complément d'un matériau bioactif, cependant il n'y pas de différence significative lorsqu'il est utilisé seul.

- Le laser Nd : YAG

L'étude de Santucci et coll. (1999) a montré que sur 29 dents où une pulpotomie a été réalisée avec matériau de coiffage seul (Dycal[®] - hydroxyde de calcium), 43% des dents restaient vitales à 54 mois contre 90,3% sur les 64 dents traitées en complément avec le laser Nd : YAG. Ce laser était utilisé à une puissance de 1.75W à 20pulses/s pendant 20s (Santucci et coll., 1999).

Le laser Nd : YAG semble augmenter le taux de survie pulpaire même s'il n'est pas utilisé avec un matériau de coiffage bioactif. De plus amples études concernant ce laser seraient nécessaires pour démontrer sa supériorité vis-à-vis de l'hydroxyde de calcium.

- Le laser Er : YAG

En 2015, l'étude de Stefanovaa et coll. a montré que la préparation des surfaces périphériques bordant la plaie pulpaire au laser Er : YAG favorisait l'adaptation du matériau de coiffage du fait de la suppression des boues dentinaires, offrant par conséquent un meilleur joint dent-matériau (Stefanova et coll., 2015).

En 2020, Wang et coll. ont mené une étude sur 47 patients présentant une lésion carieuse juxta-pulpaire indiquant la réalisation d'un coiffage direct. Après 12 mois, le taux de vitalité pulpaire était de 62,8% dans le groupe témoin où le coiffage était réalisé avec du Dycal® (hydroxyde de calcium) seul et de 91,7% dans le groupe où le laser avait été utilisé en complément de l'hydroxyde de calcium. Le laser a été utilisé à 15Hz et 30mJ durant 15sec avec 3 répétitions (Wang et coll., 2020).

À l'inverse, une autre étude menée en 2020 par Kermanshah et coll. a montré que parmi les 14 patients du groupe témoin où les coiffages ont été réalisés avec du MTA®, 93% des dents sont restées vitales après 3 mois contre 75% dans le groupe où le laser a été utilisé en complément. Le laser a été utilisé à 10Hz avec des pulsations de 450 ms pendant 10 secondes. La figure 22 décrit le protocole mis en place lors de l'étude. Dans le cadre de cette étude, le traitement laser associé au MTA donne de moins bons résultats en termes de vitalité pulpaire que le MTA utilisé seul (source : Kermanshah et coll., 2020).



Figure 22 : protocole de coiffage pulpaire direct : (a) radio préopératoire (b) exposition pulpaire lors de l'éviction carieuse (c) application du MTA® (d) restauration d'usage à la résine composite. L'utilisation du laser est effectuée entre la phase (b) et (c) pour le groupe concerné (source : Kermanshah et coll., 2020)

D'après les deux premières études, le laser Er : YAG utilisé en complément d'un matériau bioactif (hydroxyde de calcium, MTA[®]) augmenterait le taux de succès du coiffage pulpaire direct et permettrait également un meilleur contact entre le matériau et les tissus bordant la plaie pulpaire. À l'inverse, l'étude de Kermanshah et coll. montre quant à elle, des résultats inférieurs à ceux du coiffage pulpaire classique avec du MTA. De nouvelles études sont donc nécessaires afin de pouvoir statuer sur l'intérêt du laser ER : YAG dans la thérapeutique du coiffage pulpaire.

- Laser Er-Cr : YSGG

En 2016, Cengiz et coll. ont réalisé une étude incluant 60 patients divisés en 4 groupes selon la méthode de coiffage pulpaire direct choisie : 2 groupes traités séparément par hydroxyde de calcium ou Theracal[®] (résine modifiée au silicate tricalcique) et 2 autres traités avec mêmes matériaux mais en y ajoutant un traitement laser au préalable (laser Er-Cr : YSGG). Dans les deux premiers groupes traités avec Theracal et hydroxyde de calcium (sans utilisation du laser), on retrouve respectivement un taux de vitalité à 6 mois de 73,3% et de 66,6%. Dans les groupes utilisant le laser, on retrouve un taux de succès de 100%. Le laser était ici utilisé à 0,5W avec une fréquence de 20Hz à 140ms par pulsation pendant 10sec (Cengiz et Yilmaz, 2016).

Une autre étude conduite par Olivi et coll. (2007) a quant à elle comparé le coiffage « traditionnel » (sans utilisation du laser) aux coiffages à l'aide de lasers Er : YAG et Er-Cr : YSGG. Le taux de succès en méthode classique était de 63% contre 80% et 75% respectivement avec les lasers Er-Cr : YSGG et Er : YAG (Olivi et coll., 2007).

D'après ces études, le laser Er-Cr : YSGG semble permettre une amélioration du taux de succès du coiffage pulpaire direct lorsqu'il est utilisé en complément d'un matériau de coiffage.

- Le laser diode

Yazdanfar et coll. (2020) ont comparé les effets du coiffage direct à l'aide de Theracal[®] seul (résine modifiée au silicate tricalcique) et du coiffage réalisé avec du Theracal[®] couplé à l'utilisation d'un laser diode 808nm, utilisé à 1,5W de puissance

pour la coagulation et 1W pour la décontamination. Les résultats montrent qu'après 6 mois, toutes les pulpes ont conservé leur vitalité. D'autre part, ils ont pu observer radiographiquement une épaisseur significative de dentine néoformée au contact de la pulpe dans les deux groupes ($0.40\text{mm} \pm 0.19\text{mm}$). D'un point de vue clinique, le groupe « laser » montre de meilleurs résultats en termes de confort pour le patient : les suites et les sensibilités post-opératoires aux changements de températures étaient moins importantes lorsque le laser diode a été utilisé (Yazdanfar et coll., 2020).

Une autre étude menée par Zhang et coll. (2020) a également testé les effets du laser diode 808nm sur le coiffage pulpaire direct. Une centaine de patients a été répartie en deux groupes : les tests de vitalité se sont révélés positifs sur un plus grand nombre de cas dans le groupe où le laser diode a été utilisé en complément de la méthode traditionnelle de coiffage (89.4% de vitalité pulpaire contre 73.3% dans le groupe sans laser) (Zhang et coll., 2020).

D'après ces études, le laser diode augmenterait le taux de succès du coiffage pulpaire direct lorsqu'il est utilisé en complément d'un biomatériau et permettrait de réduire les sensibilités post-opératoires.

En conclusion, chacun de ces lasers a montré son efficacité dans les thérapeutiques de coiffage pulpaire lorsque son utilisation est combinée à l'emploi d'un biomatériau de coiffage. Les laser CO₂, Er : YAG, Nd : YAG, Er-Cr : YSGG et diode sont les plus utilisés pour cette indication. Cependant, le nombre d'études à ce sujet est encore insuffisant et les conclusions de celles-ci ne permettent pas de démontrer la supériorité d'un de ces laser par rapport à un autre. De plus, l'absence de protocoles cliniques et de réglages fixes pour chaque laser ne nous permet pas de définir le meilleur laser à utiliser pour le coiffage pulpaire.

Le laser se présente toutefois comme un atout pour la réussite du traitement puisque des résultats positifs aux tests de sensibilité sont obtenus dans plus de 80% des cas pour la plupart des études. Les sensibilités post-opératoires seraient diminuées grâce aux lasers diode et la qualité du joint entre la dentine bordant la plaie pulpaire et le matériau de coiffage semble également être améliorée.

De nouvelles études ainsi que des essais cliniques et comparatifs avec des matériaux plus récents tels que la Biodentine® et l'établissement de protocoles standardisés pour chacun de ces lasers seraient intéressants.

2.2 La préparation canalaire

Le traitement endodontique a pour objectif de mettre en forme le canal de manière à autoriser une irrigation efficace de l'ensemble de l'endodonte. Cette irrigation est classiquement réalisée à l'aide d'hypochlorite de sodium (concentration entre 2,5 et 5,25%) et d'EDTA (concentration entre 8 et 17%). Les instruments de mise en forme canalaire comprennent les limes manuelles et les instruments de mise en forme mécanisés en Nickel-Titane (ces derniers étant les plus efficaces à l'heure actuelle) (Simon et coll., 2012). Certains lasers, grâce à leurs effets photomécaniques, pourraient être utiles dans la préparation du canal et l'élimination de son contenu.

Nous allons voir à travers différentes études le réel intérêt du laser dans la préparation canalaire :

- Le laser Er-Cr : YSGG

Ali et coll. en 2005 ont étudié pour la première fois l'effet de ce laser sur l'élimination des débris et son impact sur le tissu dentinaire. 80 incisives permanentes maxillaires extraites ont été réparties aléatoirement en deux groupes égaux. Dans le premier groupe, les dents ont été préparées jusqu'à un diamètre de 0,30 mm avec des rinçages successifs à l'hypochlorite de sodium et à l'eau oxygénée, suivis d'un rinçage final à l'eau distillée. Le deuxième groupe quant à lui a été préparé jusqu'à 0,20mm puis le canal a été irradié au laser Er-CR : YSGG à 2W de puissance sous spray air/eau avec des fibres de 400, 320 et 200 micromètres de diamètre. Aucune irrigation n'a été réalisée pour ce deuxième groupe à l'exception du rinçage final à l'eau distillée. La figure 23 montre la partie apicale de deux dents traitées par laser avec une dentine propre et nettoyée de tout débris dentinaire dans les deux cas. La photographie de gauche montre cependant une altération de la constriction apicale contrairement à la dent présentée sur la photographie de droite (Ali et coll., 2005).

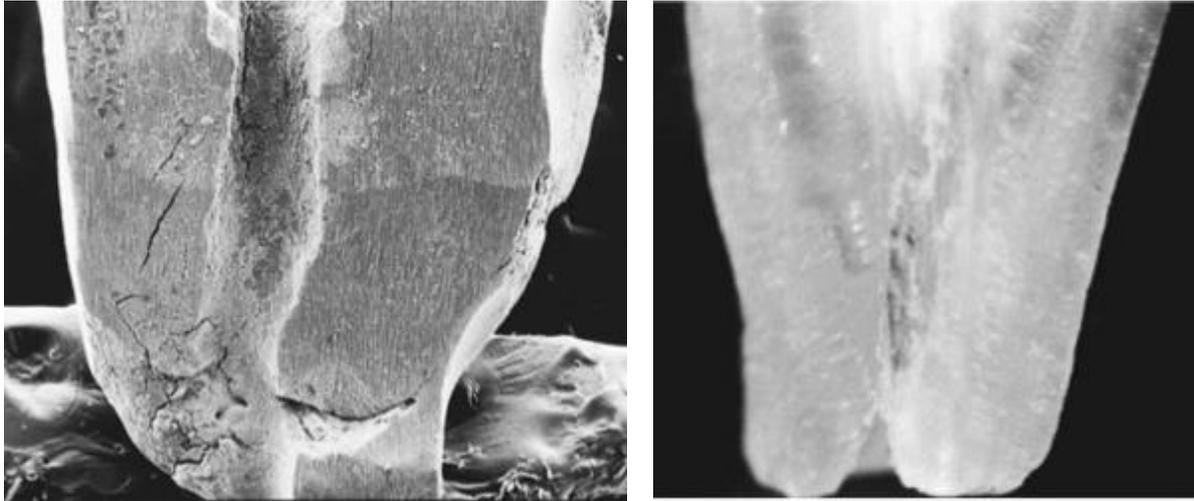


Figure 23 : photographies de canaux préparés par traitement laser : absence de cône d'arrêt (à gauche) et présence du cône d'arrêt (à droite) (source : Ali et coll., 2005)

Les résultats de cette étude ont montré des mises en forme canalaire significativement moins complètes avec le laser (52,50% du canal préparé contre 80% dans le groupe contrôle). Le groupe traité avec le laser montre un meilleur nettoyage et une meilleure élimination des boues dentinaires, cependant, la présence de perforations, de butées et de sur-préparations a été observé plus fréquemment que dans le groupe contrôle (27% de butée et 20% de sur-instrumentation contre 12,5% et 5% dans le groupe contrôle). L'instrumentation manuelle reste donc supérieure ici.

Matsuoka et coll. (2005) ont testé la capacité du laser Er : Cr : YSGG à préparer les canaux courbes. L'étude a été réalisée sur des incisives mandibulaires réparties en 2 groupes où les canaux sont courbés à 10° pour l'un et 15° pour l'autre. Les résultats ont montré que le laser était capable d'éliminer les débris et les boues dentinaires dans les canaux présentant une courbure inférieure à 10°. Au-delà de 10° en revanche, le risque de complications comme l'échauffement du parodonte ou la création de perforations était trop important (Matsuoka et coll., 2005).

Le laser Er : Cr : YSGG, d'après ces études, semble efficace pour la préparation des canaux droits mais ne semble pas apporter d'avantages considérables par rapport à la préparation manuelle classique. De plus, les risques d'échauffement et de perforation, notamment sur les canaux courbés, ainsi que d'altération de la zone de constriction apicale restent élevés lorsque ce laser est utilisé.

- Le laser Er : YAG

Kokuzawa et coll. (2012) ont cherché à mesurer l'augmentation du diamètre des canaux de dents traitées avec le laser Er : YAG. Six dents extraites ont été sélectionnées et les canaux ont été préparés à l'aide d'un foret de Gates dans la partie coronaire et à l'aide d'une lime de 0,25 mm de diamètre de pointe dans le reste du canal. Les canaux ont reçu 3 salves d'irradiation successives avec des fibres de 135 et de 200 microns de diamètre. Pour chacun des deux diamètres de fibre, les premières salves ont été les plus efficaces, notamment avec la fibre de 200 micromètres qui augmentent plus largement le volume du canal comme le montre la figure 24. Ils en ont conclu que la préparation peut être efficace quand les fibres du laser sont en contact direct avec la dentine et que l'augmentation du temps de travail ne permet pas d'améliorer significativement la préparation (Kokuzawa et coll., 2012).

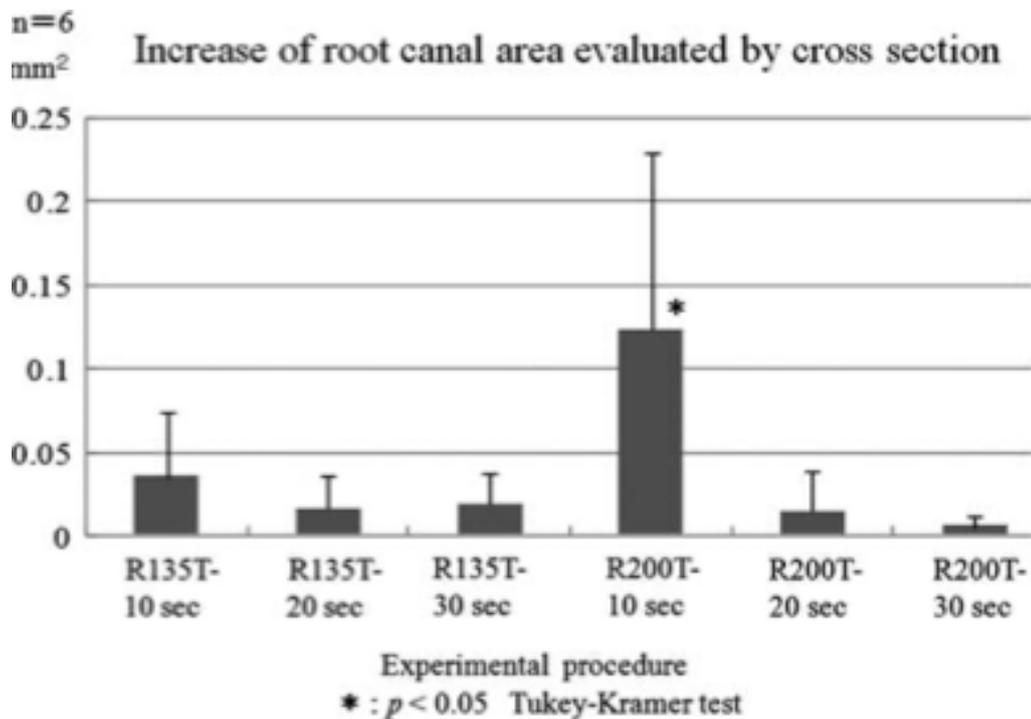


Figure 24 : diagramme de l'augmentation du volume du canal en fonction des différents paramètres d'irradiations appliqués (source : Kokuzawa et coll., 2012)

Matsuoka et coll. (2000) ont testé l'efficacité du laser Er : YAG sur 40 dents maxillaires monoradiculées extraites. Deux groupes ont été formés avec différents réglages et diamètres de fibre. Les résultats varient selon les réglages de puissance appliqués et les fibres utilisés (tableau 2). La capacité du laser à préparer le canal augmente en fonction de la puissance appliquée, cependant lorsque la puissance

augmente, la température au niveau de la dentine augmente également, risquant de fait, de générer une carbonisation de la dentine radulaire, de créer des perforations ou de détruire la constriction apicale (Matsuoka et coll., 2000).

Tableau 2 : réglages de puissances appliqués en fonction du type de fibre (source : Matsuoka et coll., 2000)

	Fibre A (0,285mm)	Fibre B (0,375mm)	Fibre C (0,470mm)
Groupe 1 (400mJ/pulse)	136 mJ/pulse	168 mJ/pulse	184mJ/pulse
Groupe 2 (500mJ/pulse)	170 mJ/ pulse	210 mJ/pulse	230 mJ/pulse

La figure 25 présente une photographie à fort grossissement d'une dent préparée avec le laser Er : YAG où un cône d'arrêt a bien été formé, on peut également remarquer que le canal est nettoyé des débris et de la boue dentinaire.

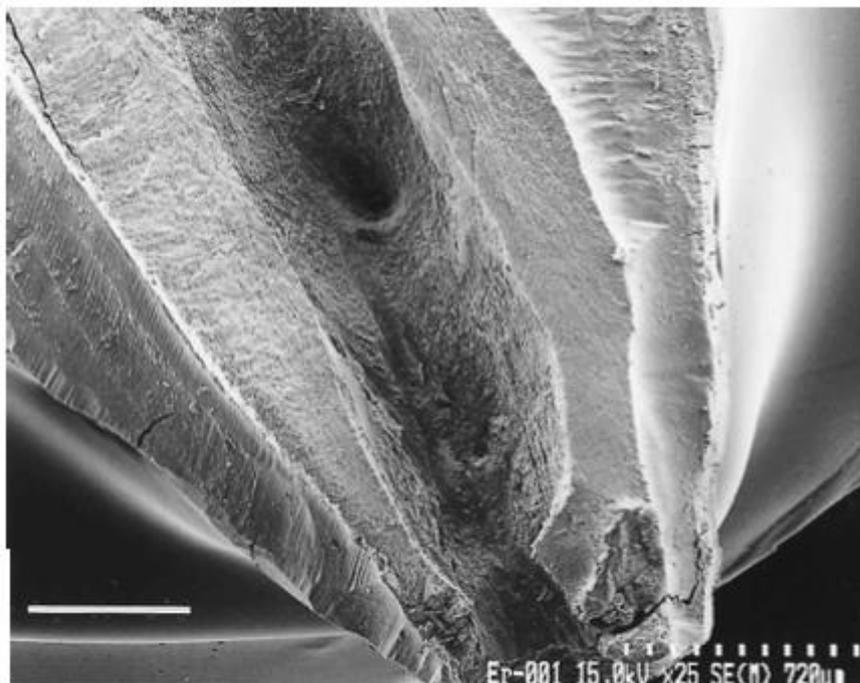


Figure 25 : photographie SEM (*scanning electron microscopy*) d'une dent du groupe 1 (score 0) où le cône d'arrêt est clairement formé par la préparation au laser Er : YAG (source : Matsuoka et coll., 2000)

Ces études montrent que le laser Er : YAG serait capable d'effectuer une préparation canalaire de qualité si les bons réglages et la bonne taille de fibre optique sont utilisés. Cependant, les résultats restent très variables et il persiste un risque non négligeable de carbonisation de la dentine, de perforation ou d'élargissement du foramen apical (20 à 30%).

- Le laser diode, Nd : YAG et CO₂

Les études concernant le laser diode, Nd : YAG et CO₂ sur la préparation canalaire sont trop peu nombreuses et leurs résultats ne permettent pas de conclure quant à leur efficacité sur la préparation canalaire.

- Le laser Nd : YAP

Moshonov et coll. (2003) ont comparé la préparation canalaire de 14 prémolaires monoradiculées extraites dont la moitié ont été préparés avec des limes K manuelles jusqu'à un diamètre de 0,35 mm et l'autre moitié avec un laser Nd : YAP (260mJ à 5Hz) après avoir préparé le canal avec une lime K de diamètre 0,20mm. Le groupe où le laser a été utilisé a obtenu un meilleur score de préparation et de nettoyage dans les parties médianes et apicales et un score quasi équivalent dans la partie coronaire du canal (Moshonov et coll., 2003).

D'après cette étude, le laser Nd : YAP semble améliorer la préparation et le nettoyage de certaines portions du canal, notamment la partie apicale. Des études complémentaires sont nécessaires pour confirmer l'utilité de ce laser pour la préparation canalaire.

Les résultats de ces différentes études semblent montrer que le laser n'est, à l'heure actuelle, pas un outil de choix pour effectuer la préparation canalaire. En effet, le laser ne semble pas montrer une réelle supériorité par rapport à l'instrumentation manuelle. De plus, aucune étude ne les compare à l'instrumentation mécanisée.

L'usage du laser semble également augmenter le risque de rupture de la constriction apicale, de création de butées, de perforations et d'échauffement, en particulier dans les canaux courbés.

Le laser semble cependant être un outil intéressant à utiliser en association avec une mise en forme mécanisée classique pour parfaire la préparation. Bien que de plus amples études soient nécessaires pour déterminer les meilleurs réglages et le bon type de fibre, les lasers Er : YAG, Er : Cr YSGG, Nd : YAP semblent être les plus prometteurs dans cette indication.

2.3 L'optimisation des solutions d'irrigation

Au cours du traitement endodontique, la phase d'irrigation est aussi importante, si ce n'est plus, que la phase de préparation canalaire. C'est cette étape qui permet de réduire la charge bactérienne et d'éliminer les boues dentinaires présentes au sein du canal dentaire (Siqueira, 2001).

La HAS recommande l'association d'une irrigation à l'aide d'hypochlorite de sodium à 2,5% et d'EDTA à 17%. L'hypochlorite de sodium a une action antibactérienne et agit sur les matières organiques et l'EDTA a une action chélatante et agit sur les composés minéraux. (HAS, Traitement endodontique, 2008) Il est conseillé d'activer les solutions d'irrigation pour permettre une amélioration de leur distribution dans les canaux et ramifications, une bonne remontée des débris et une pénétration accrue dans les canalicules dentinaires. De nombreux systèmes et techniques d'activation sont disponibles sur le marché, on retrouve notamment l'activation manuelle au moyen d'un cône de gutta-percha et les systèmes sonore et ultra-sonore (Simon et coll., 2012).

Le laser est également décrit comme un outil d'activation des solutions d'irrigation grâce à ses effets photomécaniques et photothermiques. L'activation assistée par laser génère un flux à grande vitesse qui provoque une agitation des molécules d'eau contenues dans le canal. L'effet photoacoustique provoque quant à lui une implosion et une expansion des molécules d'eau, créant un effet de cavitation (création de bulles de vapeur dans un liquide soumis à une forte pression). Cela permettra de désorganiser le biofilm et de décoller les boues dentinaires (figure 26) (Blanken et coll., 2009).

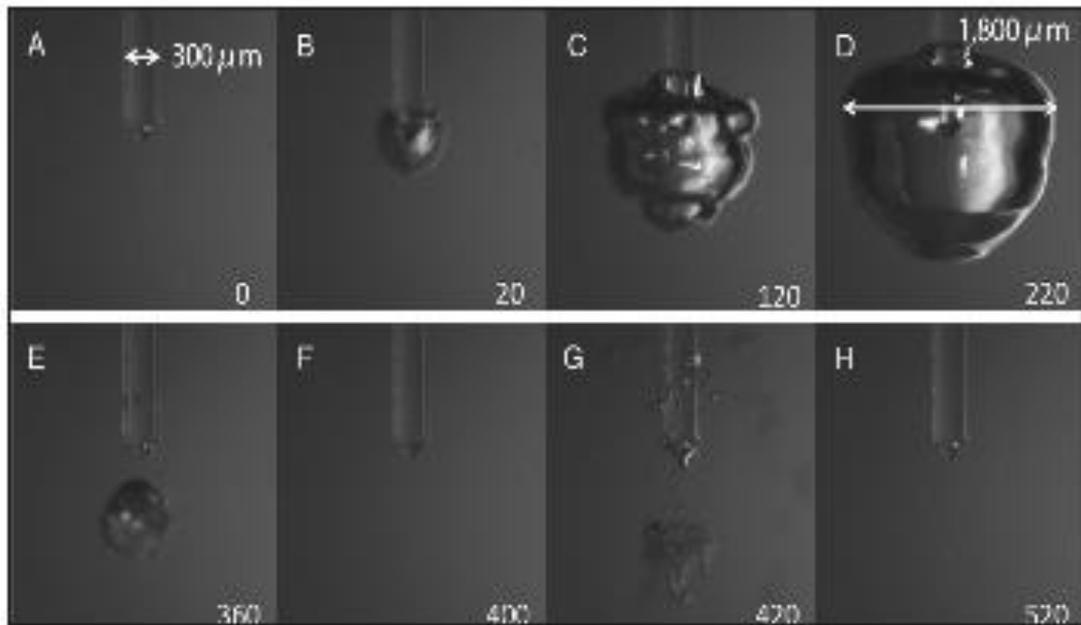


Figure 26 : photographie à fort grossissement de l'effet de cavitation provoqué par une fibre laser de 300 microns dans un liquide (source : Blanken et coll., 2009)

Plusieurs techniques d'activation ont été développées (Piétri, 2018) :

- Technique LAI (*laser activated irrigation*) : réalisée avec tous types de laser
- Technique PIPS (*photo induced photoacoustic streaming*) : réalisée seulement avec les laser erbiums
- Technique SWEEPS (*shock-wave enhanced emission photoacoustic streaming*) : réalisée seulement avec le laser erbiums

Dans la technique LAI, la longueur d'onde des lasers est absorbée par les molécules d'eau des solutions d'irrigation et engendre l'implosion et l'expansion de celles-ci. Ce phénomène entraîne un flux des fluides dans l'endodonte et un effet de cavitation (Kosarieh et coll., 2021). Concernant les techniques PIPS et SWEEPS (qui sont en fait des améliorations de la LAI) il suffit de placer la fibre du laser Er : YAG dans la chambre pulpaire grâce à des inserts spécifiques. Pour la LAI la fibre doit descendre à environ 5mm de l'apex (tableau 5). Il y a également la PDT (photodynamic therapy) qui sera réalisé avec un laser diode (cf. partie 2.4). La figure 27 schématise ces 3 techniques.

Tableau 3 : récapitulatif des différentes techniques d'activation laser (source : Piétri, 2018)

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	<i>End-firing</i>	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

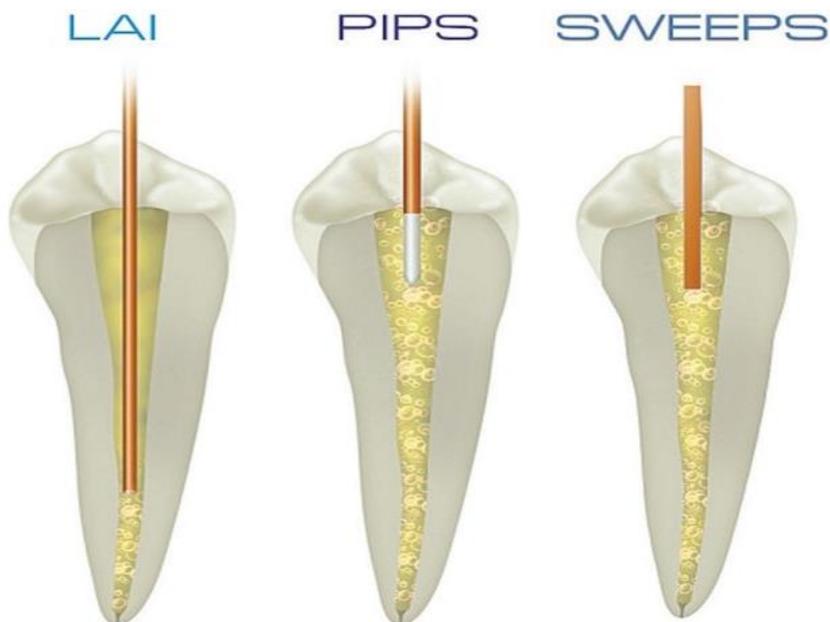


Figure 27 : schéma des différents modes d'activation par le laser Er : YAG (Source : www.ijce.in)

Nous avons analysé 11 études traitant de l'activation laser assistée. Ce sont pour la majorité, des études *in vitro* réalisées sur des dents extraites. Différentes solutions d'irrigation et différentes techniques d'activations ont été testés.

- Laser diode

Karunakar et coll. (2021) ont comparé l'efficacité du laser diode par rapport à l'activation manuelle, aux systèmes à pression négative et aux systèmes d'activation ultra-sonores. À ces fins, 40 dents monoradiculées extraites ont été divisées en 4 groupes selon la méthode d'activation choisie puis classées en fonction du taux d'élimination de la boue dentinaire et de l'ouverture des canalicules en fin de traitement radiculaire. Les résultats ont montré que le laser diode est aussi efficace que l'EndoVac® (système d'activation fonctionnant par pression négative) et plus efficace que le système ultrasonique et que l'activation manuelle pour l'élimination des boues dentinaires dans la partie apicale du canal (Karunakar et coll., 2021).

Ghasemi et coll. (2021) ont comparé l'efficacité du laser diode utilisé avec du bleu de méthylène par rapport à une irrigation conventionnelle (NaOCl et EDTA) pour l'élimination de la boue dentinaire. Ils ont conclu que le laser diode utilisé sans hypochlorite de sodium et sans EDTA est moins efficace pour le nettoyage des canaux que l'irrigation conventionnelle (Ghasemi et coll., 2021).

Le laser diode semble intéressant pour activer la solution d'irrigation et favoriser l'élimination des boues dentinaires seulement lorsqu'il est associé à de l'hypochlorite de sodium et à de l'EDTA.

- Laser Er : YAG

D'après Aldeen et coll. (2018), le laser Er : YAG est plus efficace que l'activation manuelle et ultrasonique pour éliminer les débris dans les zones coronaires et apicales du canal (Aldeen et coll., 2018).

D'après Guidotti et coll. (2014), le laser Er : YAG utilisé à 1W pendant 15s avec de l'EDTA à 17% et 15s avec du NaOCl à 2,5% est le meilleur moyen d'éliminer les boues dentinaires des canaux (Guidotti et coll., 2014).

Galler et coll. (2019) ainsi que Kosarieh et coll. (2018) ont étudié la profondeur de pénétration de la solution d'irrigation à l'intérieur des canalicules dentinaires (grâce à une coloration du canal au bleu de méthylène simulant la pénétration de la solution d'irrigation au sein des canalicules dentinaires). La pénétration de la solution est meilleure après une activation avec le laser Er : YAG en technique PIPS (*photo induced photoacoustic streaming*) que par l'activation sonore et ultrasonique. La technique SWEEPS (*shock-wave enhanced emission photoacoustic streaming*) n'a quant à elle pas montré d'amélioration par rapport à l'activation manuelle comme nous le montre la figure 28 (Galler et coll., 2019) (Kosarieh et coll., 2021).

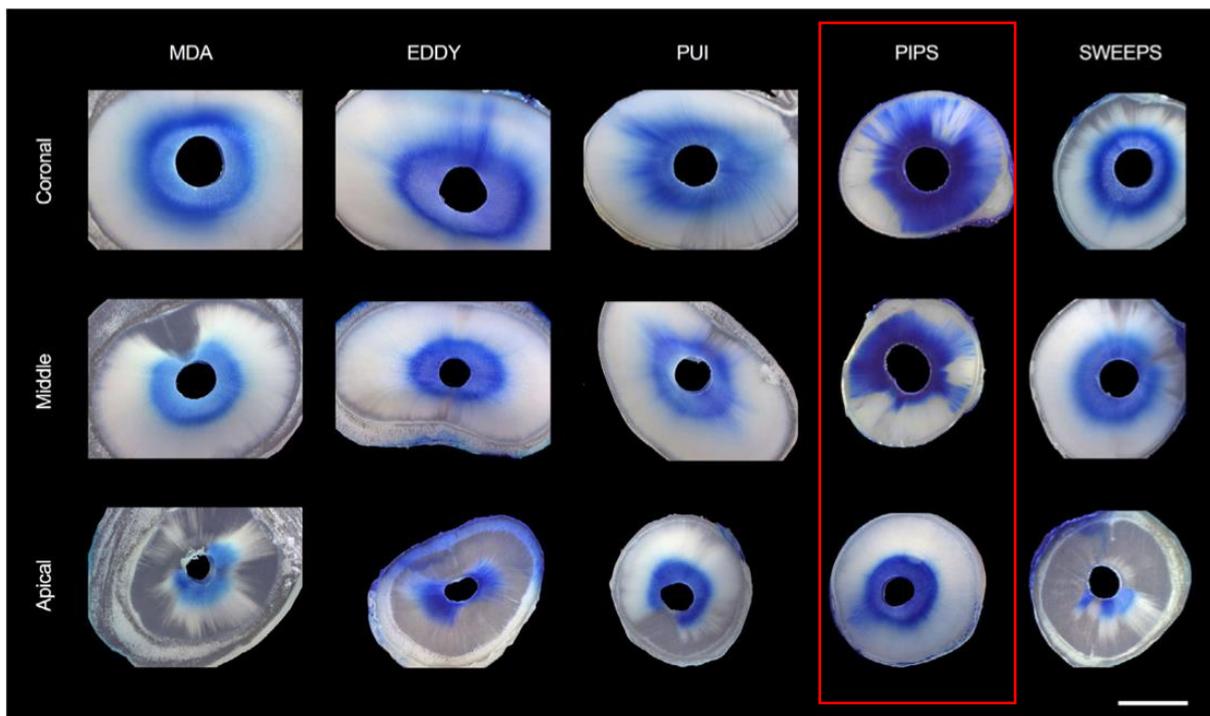


Figure 28 : photographies présentant la pénétration du bleu de méthylène après les différentes techniques d'activation dans le tier apical, coronaire et médian du canal (MDA= activation manuelle, PUI= ultrasonique, EDDY= sonore, PIPS et SWEEPS= laser Er : YAG selon 2 modes différents) (source : Galler et coll., 2019)

L'activation par laser Er : YAG semble être supérieur aux autres méthodes d'activation des solutions d'irrigation en particulier lorsque celui-ci est employé à l'aide de la technique PIPS.

- Laser Nd : YAG

Da Costa Lima et coll. (2015) ont comparé l'activation du NaOCl à l'aide d'un laser Nd : YAG avec l'activation manuelle, sonique et ultra sonique. L'activation avec le système ultrasonique est jugée la plus efficace car elle élimine totalement les boues dentinaires des parois canalaires. Le laser Nd : YAG et l'activation sonique éliminent également une grande partie des boues dentinaires par rapport à l'activation manuelle et au groupe contrôle (Da Costa Lima et coll., 2015).

Le laser Nd : YAG ne semble pas être supérieur au système ultrasonique pour l'élimination des boues dentinaires. D'autres études comparatives seraient cependant nécessaires.

- Comparatifs entre les différents lasers

D'après Takeda et coll. le laser Er : YAG utilisé seul est capable d'éliminer les boues dentinaires plus efficacement que l'EDTA, l'acide citrique et l'acide phosphorique utilisés seuls. De plus, le laser Er : YAG a obtenu de meilleurs résultats en termes d'élimination des boues dentinaires et permettrait d'ouvrir les canalicules dentinaires plus efficacement que le laser CO₂ (Takeda et coll., 1999).

George et coll. (2018) ont expérimenté l'action des lasers Er : Cr YSGG et Er : YAG sur l'élimination des boues dentinaires en faisant varier les solutions d'irrigation (EDTA, eau oxygénée, eau) ainsi que le type de fibre (plate ou conique). Les résultats montrent qu'il n'y pas de différences entre les deux lasers lorsque le même type de fibre et la même solution d'irrigation sont utilisés. Le groupe associant de l'EDTA à des fibres coniques obtient une meilleure élimination des boues dentinaires, peu importe le type de laser choisi (George et coll., 2008).

D'après Korkut et coll. (2018), le laser Er : YAG utilisé en méthode PIPS (*photon induced photoacoustic streaming*) associé au NaOCl est plus efficace que le NaOCl seul. Il est également supérieur aux lasers diode et Nd : YAG suivie d'un rinçage au NaOCl. De plus, l'activation de l'hypochlorite de sodium en méthode PIPS est moins invasive car elle se limite à la chambre pulpaire et limite par conséquent les risques de cratérisation et d'échauffement du parodonte (Korkut et coll., 2018).

Selon Ozbay et coll. (2018) les lasers Er, CR : YSGG ainsi que Nd : YAG et Er : YAG éliminent partiellement les boues dentinaires lorsque qu'ils sont utilisés pendant 40s pour activer de l'eau distillée. Lorsque ces mêmes lasers sont utilisés pour activer l'hypochlorite de sodium et l'EDTA pendant 20s, on obtient un bien meilleur nettoyage des parois radiculaires. Le groupe utilisant le laser Er : YAG et la technique PIPS est celui qui se révèle être le plus efficace pour éliminer les boues dentinaires (Ozbay et coll., 2018).

Les différentes études comparatives ci-dessus nous ont montré que le laser Er : YAG semble supérieurs aux autres types de laser pour l'élimination des boues dentinaires et l'ouverture des tubulis.

Ces études nous montrent que les lasers utilisés seuls (diode, Nd : YAG, Er : YAG, Er, Cr : YSGG) ou avec de l'eau distillée, sont moins efficaces sur le nettoyage des parois radiculaires que l'activation manuelle des solutions d'hypochlorite de sodium et d'EDTA. Les lasers doivent donc être impérativement utilisés avec du NaOCl ou de l'EDTA pour garantir et potentialiser leurs effets.

L'activation des solutions d'irrigation est, dans la majorité des cas, mieux réalisée par le laser Er : YAG qu'avec les autres systèmes d'activation. L'activation ultrasonique permet l'obtention de bons résultats.

Compte tenu du nombre d'études réalisées et des études comparatives avec les autres lasers, le laser Er : YAG semble être le plus performant à ce jour pour permettre une bonne élimination des boues dentinaires ainsi que pour ouvrir des tubulis dentinaires.

Il serait nécessaire de réaliser de nouvelles études comparatives, notamment *in vivo*, pour démontrer la supériorité réelle de ce type de laser par rapport aux autres moyens d'activation de la solution d'irrigation.

L'activation des solutions d'irrigation par le laser, et en particulier le laser Er : YAG, semble devenir une réelle alternative aux autres systèmes.

2.4 Désinfection canalaire

Le laser diode a la capacité d'agir sur les constituants intra-cellulaires et de provoquer une apoptose des cellules grâce à la thérapie photodynamique (PDT= photodynamic therapy). Il est utilisé en association avec un colorant photosensibilisateur, activé par la longueur d'onde du laser. Son activation entraîne la production de radicaux libres qui réagissent avec l'oxygène présent dans les canaux et génèrent la production de peroxyde d'hydrogène et d'oxygène singulet toxiques pour les bactéries. C'est ce phénomène, nommé thérapie photodynamique qui permet au laser d'avoir une action antiseptique (Trindade et coll., 2015).

Nous avons analysé 8 études traitant de la désinfection par thérapie photo dynamique en endodontie. Elles ont toutes été réalisées à l'aide d'un laser diode en utilisant du bleu de méthylène (ou bleu de toluidine pour l'étude de Garcez et coll., 2010) comme photosensibilisateur. Elles ont été réalisées pour la plupart sur dents extraites (mise à part les études de Juric et coll. et Rabello et coll. réalisées *in vivo*). Les conclusions suivantes ont été relevées :

Estrela et coll. en 2018, ont montré que la PDT réalisée avec le laser diode à 660nm est capable de réduire la charge bactérienne d'*E.faecalis* plus efficacement en présence de NaOCl à 2,5% qu'avec du bleu de méthylène uniquement (Estrela et coll., 2018).

Higuchi et coll. (2021), ont montré dans une étude réalisée *in vitro*, avec un laser diode 810nm, sur des dents d'origine porcine, que la PDT associée au NaOCl est capable de réduire de 98% la charge microbienne (*E. faecalis*) mais ne permet pas d'éliminer totalement les boues dentinaires (Higuchi et coll., 2021).

De Miranda et coll. (2018), ont réalisé une étude comparant l'efficacité de la PDT réalisée avec un laser diode à 660nm par rapport à une irrigation canalaire classique (NaOCl à 2,4 %) sur 32 dents présentant une infection. De meilleurs résultats ont été obtenus en ce qui concerne la guérison des lésions péri-apicales à 6 mois post-opératoire pour le groupe traité par le laser diode (De Miranda et Coll., 2018).

Camacho-Alonso et coll. (2017), ont testé l'efficacité de la désinfection canalaire par PDT effectuée avec un laser diode de 660nm associé au chitosane (composé possédant des propriétés antibactériennes). Cette technique montre une meilleure efficacité sur la réduction du taux d'*E.faecalis* par rapport à l'irrigation à l'hypochlorite de sodium seule (Camacho-Alonso et coll., 2017).

Garcez et coll. (2010) ont testé la désinfection par PDT réalisée avec du bleu de toluidine à partir d'un échantillon de 21 patients présentant des infections péri-apicales dont les bactéries en présence se sont montrées résistantes aux antibiotiques. Le groupe ayant reçu un traitement endodontique associé à la PDT a obtenu une meilleure réduction de la quantité de micro-organismes résistants par rapport au groupe ayant reçu un traitement endodontique classique (Garcez et coll., 2010).

Ng et coll. (2011) ont démontré que la PDT réalisée à l'aide d'un laser diode 665nm associée à un débridement chimio-mécanique classique permet une meilleure diminution du taux de bactéries gram+ et gram- présentes dans les canalicules dentinaires (Ng et coll., 2011).

Juric et coll. (2014) ont comparé les effets de la PDT réalisée avec un laser diode et du bleu de méthylène dans le cadre de retraitements endodontiques. Dans cette étude, 21 patients présentant des infections péri-apicales sur des dents précédemment traitées ont été sélectionnés. Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence une réduction plus significative des bactéries telles que *E. faecalis*, *peptostreptococcus*, *actinomyces naeslundii*, *porphyromonas* ou encore *veillonella* et *pseudomonas aeruginosa* sur les dents retraitées à l'aide du laser et de la PDT (Jurič et coll., 2014).

Rabello et coll. en 2017, ont cherché à montrer si l'ajout d'une deuxième séance de PDT effectuée à l'aide d'un laser diode permettait d'optimiser la désinfection canalaire. Les résultats ont montré que l'ajout d'une deuxième séance de PDT après une phase de temporisation à l'hydroxyde de calcium ne permet pas d'obtenir de résultats significativement supérieurs en termes de désinfection. Une seule séance paraîtrait donc suffisante pour obtenir l'effet escompté (Rabello et coll., 2017).

Pour chacune de ces études, nous pouvons remarquer que la désinfection photo-active semble efficace pour l'élimination des bactéries telles que *E. faecalis* retrouvées en grande majorité dans les infections endodontiques récidivantes mais également d'autres bactéries retrouvées au sein de la cavité buccale et de l'endodonte (Prada et coll., 2019). Le bleu de méthylène apparaît comme étant le photosensibilisateur le plus répandu. La PDT effectuée avec un laser diode associé au bleu de méthylène en fin de traitement (ou retraitement)

endodontique semble être une solution prometteuse et efficace pour la désinfection des canaux.

Les lasers (de tous type) peuvent également agir de façon autonome sur les bactéries par leurs effets photothermiques, photoacoustiques, mécaniques et de cavitation (sans avoir besoin de photosensibilisateurs). Les effets mécaniques et acoustiques vont produire une onde de choc dans les fluides capable de désorganiser les biofilms et les effets thermiques vont quant à eux désorganiser les constituants des parois bactériennes (protéines et peptidoglycanes), en particulier sur les bactéries gram- et provoquer leur apoptose (de Oliveira et coll., 2014).

Nous avons analysé 14 articles portant sur le sujet, la plupart des tests sont réalisées *ex vivo* sur des dents extraites mises à part pour les études de De Meyer et coll., 2017 et Noiri et coll., 2008) qui sont réalisées *in vitro* sur des modèles en résine et les études de Morsy et coll., 2018 et Preethee et coll., 2012) réalisées *in vivo*. Sur ces 14 études, 9 portent exclusivement sur la bactérie *Enterococcus Faecalis*, retrouvée en majorité dans les infections péri-radiculaires d'origine endodontique sur des dents souvent déjà traitées (Stuart et coll., 2006).

- Laser diode

Selon Zou et coll. (2021) la désinfection canalaire réalisée par le laser diode sans irrigant est capable de diminuer la charge bactérienne (*E. faecalis*) plus efficacement que la désinfection réalisée à l'aide d'hypochlorite de sodium sans utilisation du laser. *E. faecalis* étant la bactérie principalement responsable de la persistance des parodontites apicales (Zou et coll., 2021).

D'après Dai et coll. (2018) la combinaison du laser diode avec le NaOCl montre une bonne efficacité bactéricide contre *E. faecalis* sur des dents lactéales extraites et inoculées pendant 24j avec cette bactérie (Dai et coll., 2018).

D'après Morsy et coll. (2018) et Preethee et coll. (2012) les groupes traités par laser diode montre une réduction des douleurs post-opératoires après un traitement endodontique sur dent à pulpe nécrosée ainsi qu'une réduction la quantité de bactéries présentes dans les racines directement après ce traitement, en comparaisons aux groupes classiquement traités (Morsy et coll., 2018 ; Preethee et coll., 2012).

Le laser diode permettrait de réduire la charge bactérienne d'*E.faecalis* et des autres pathogènes présents dans les infections endodontiques lorsque qu'il est utilisé en complément de l'hypochlorite de sodium. Il semblerait également qu'il permette de réduire la recolonisation bactérienne et les douleurs post-opératoires grâce à son effet biostimulant anti-inflammatoire.

- Laser Er : YAG

De Meyer et coll. (2017) ont reproduit un biofilm sur des simulateurs en résine sur lesquels ils ont cultivé des bactéries telles qu'*Enterococcus faecalis* et *Streptococcus mutans*. Ils ont ensuite testé l'activation manuelle, ultrasonique et par laser Er : YAG de deux solutions d'irrigation (solution saline et NaOCl). Le groupe dont la désinfection a été réalisé à l'aide de du laser Er : YAG a obtenu la plus grande diminution bactérienne. Les autres groupes, quelle que soit l'activateur, n'ont pas montré de différence significative (De Meyer et coll., 2017).

Guidotti et coll. (2012) ont étudié l'efficacité du laser Er : YAG utilisé à 1W pendant 15s avec de l'EDTA 17% et 15s avec du NaOCl 2,5%. Cette combinaison semble être la plus efficace pour éliminer les bactéries au sein de l'endodonte, et en particulier de la zone apicale du canal (plus compliquée à atteindre et donc à désinfecter) en comparaison avec les groupes témoins n'utilisant pas le laser (Guidotti et coll., 2014).

Noiri et coll. (2008) ont testé l'efficacité du laser Er : YAG sur différentes cultures bactériennes. Les résultats montrent une réduction de la charge bactérienne de 3 bactéries gram + sur les 4 étudiées (*E. faecalis*, *A. naeslundii*, *P. acnes*) et de toutes les bactéries gram- présentes. Comme nous le montre la figure 29, la seule bactérie résistante est *L. casei* (Noiri et coll., 2008).

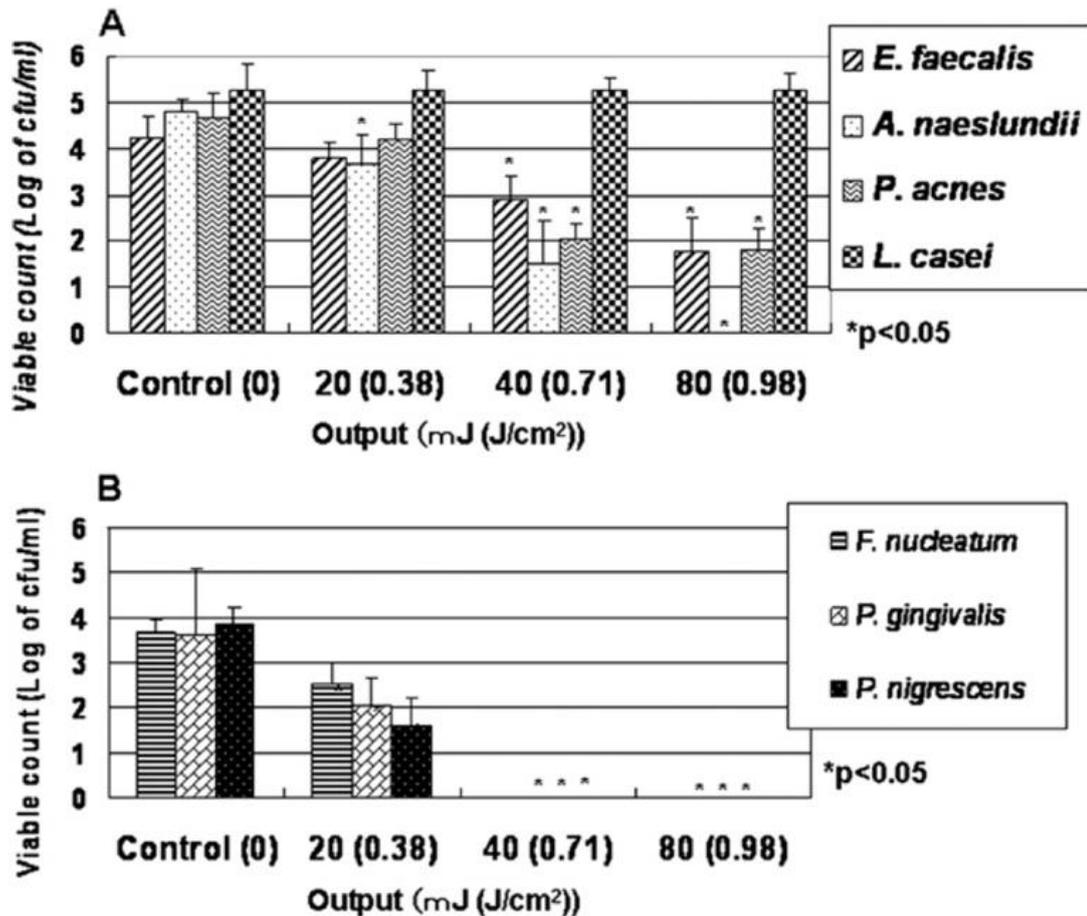


Figure 29 : diagramme présentant la quantité de différentes bactéries présentes en fonction de la puissance d'irradiation appliquée au laser Er : YAG (source : Noiri et coll., 2008)

Le laser Er : YAG semble capable de potentialiser l'effet décontaminant des solutions d'irrigation endodontiques et semble être actif sur un grand nombre de pathogènes retrouvés dans les infections endodontiques.

- Laser Er, Cr : YSGG :

L'étude de Suer et coll. (2020) montre que le laser Er, Cr : YSGG utilisé en complément du NaOCl peut éliminer plus efficacement les bactéries telles qu'*Enterococcus faecalis*. L'utilisation du laser seul montre une efficacité moins importante que le NaOCl utilisé seul, qu'il ait une concentration de 2,5 ou 5% (Suer et coll., 2020).

Arnabat et coll. (2010) ont montré que le laser Er, Cr : YSGG utilisé à 2W pendant 60s a un effet bactéricide égal au NaOCl concentré à 5% et qu'il est capable d'éradiquer la quasi-totalité des bactéries pathogènes (Arnabat et coll., 2010).

Betancourt et coll. (2020) montrent que le laser Er, Cr : YSGG est plus efficace pour potentialiser l'efficacité du NaOCl que le système ultrasonique sur un biofilm constitué d'*E. faecalis* (Betancourt et coll., 2020).

Le laser Er, Cr : YSGG semble également capable de potentialiser l'effet bactéricide de l'hypochlorite de sodium. Cependant son efficacité est limitée lorsqu'il est utilisé seul.

- Laser Nd : YAP

Liu et coll. (2018) ont testé le laser Nd : YAP à 360mJ et à 280mJ sans irrigation. Ce laser montre une bonne efficacité pour l'élimination des bactéries comme *Enterococcus faecalis* au niveau des canalicules dentinaires. L'utilisation de ce laser selon ces mêmes paramètres associés au NaOCl concentré à 5.25% a permis d'éliminer totalement *E. faecalis* des canalicules dentinaires (Liu et coll., 2019).

- Laser Nd : YAG

D'après Bergman et coll. (2006) le laser Nd : YAG n'est pas une alternative à l'hypochlorite de sodium mais peut en être un bon adjuvant puisqu'il permet à la solution d'irrigation de pénétrer d'environ 1mm plus profondément au sein de la dentine radiculaire qu'avec une irrigation classique (Bergmans et coll., 2006).

Les laser Nd : YAG et Nd : YAP semblent capables de potentialiser l'effet bactéricide de l'hypochlorite de sodium.

- Comparatif de différents lasers

Korkut et coll. (2018) ont montré que l'activation de la solution d'irrigation (NaOCl) à l'aide du laser Er : YAG en méthode PIPS (*photon induced photoacoustic streaming*) est plus efficace qu'avec les lasers diode et Nd : YAG pour l'élimination de *E. faecalis* (Korkut et coll., 2018).

L'effet bactéricide des 5 principaux lasers ont été comparés dans l'étude de Wang et coll. (2018) en mesurant leur capacité à éliminer *E. faecalis* des canaux de dents extraites et préalablement incubées avec cette bactérie. Les résultats montrent que tous les lasers associés au NaOCl ont une action supérieure au NaOCl seul. Les lasers erbium (Er ; YAG / Er : Cr YSGG) ont montré une diminution plus importante de la charge en *E. faecalis* que les lasers Nd : YAP, Nd : YAG et diode (Wang et coll., 2018).

Ces différentes études montrent que l'efficacité de la décontamination canalaire lorsqu'elle est réalisée à l'aide de lasers seuls est inférieure ou égale à celle permise par l'hypochlorite de sodium utilisée seule. Lorsque ceux-ci sont conjointement utilisés, on obtient dans la majorité des études des effets bactéricides nettement supérieurs, quel que soit le laser utilisé. La partie apicale des canaux serait plus facilement désinfectée et on obtiendrait une meilleure désinfection des canalicules dentinaires.

Les études comparant les différents lasers entre eux permettent d'observer une meilleure efficacité de décontamination avec les lasers erbium (Er : YAG et Er-Cr : YSGG) qu'avec les lasers néodyme (Nd : YAP et Nd : YAG) et diode.

Le laser diode semble tout de même avoir de bons résultats en termes de désinfection et serait par ailleurs capable de réduire les douleurs post-opératoires après un traitement endodontique sur dents à pulpe nécrosée avec une infection sous-jacente.

Nous pouvons donc en conclure que l'utilisation des lasers seuls ne permet pas une désinfection suffisante de l'endodonte. En revanche, les lasers sont capables de potentialiser les effets bactéricides des solutions d'irrigation et ainsi d'engendrer une plus forte diminution voire une élimination quasi-totale de certains types de bactéries. (Noiri et coll., 2008) Le laser se doit donc d'être utilisé dans le canal rempli d'hypochlorite pour lui permettre de pénétrer plus en profondeur et d'accentuer l'effet antimicrobien de la solution d'irrigation. De plus cela permettra de limiter les fortes élévations de températures au sein du canal.

Des études comparatives supplémentaires sont cependant nécessaires pour permettre de déterminer lequel est réellement le plus efficace.

2.5 L'obturation canalaire

La pérennité du traitement endodontique réside dans l'étanchéité de son obturation.

Le matériau le plus utilisé actuellement est la gutta-percha, développé par Edwin Meynard, un endodontiste américain, il y a plus de 170ans. C'est un biomatériau à base de caoutchouc faiblement allergisant et thermoplastique. La gutta-percha n'a cependant pas de propriétés adhésives, c'est pourquoi elle doit être associée à un ciment de scellement (Vishwanath et Rao, 2019).

Plusieurs techniques ont été développées pour réaliser cette étape d'obturation. On retrouve par exemple la condensation latérale à froid qui présente des lacunes, notamment en ce qui concerne l'obturation des canaux accessoires et autres zones anatomiques particulières et difficiles d'accès. Des techniques consistant à chauffer la gutta-percha ont été développées pour pallier ces manques et permettre un meilleur remplissage des volumes de l'endodonte (thermocompactage, systèmes avec tuteur etc.) D'autres méthodes, plus récentes, d'obturation à chaud, ont été décrites comme l'utilisation d'ultrasons pour ramollir la gutta-percha ou encore des lasers. Ces derniers seraient capable de ramollir la gutta-percha grâce à leurs effets photothermiques et de projeter le ciment de scellement dans tout le volume de l'endodonte grâce à leurs effets photomécaniques et photoacoustiques (Podolak et coll., 2020).

Pour que l'obturation soit réussie, il faut également que le canal soit nettoyé des boues dentinaires ou de tout autre débris organique ou minéral pouvant empêcher l'adhésion du ciment aux parois canalaires et entraîner la présence d'un hiatus.

Nous allons voir au travers de 7 études réalisées *in vitro*, en quoi l'obturation effectuée avec un laser ou après utilisation de celui-ci, apporte un avantage.

- Laser diode

Selon Wang et coll. (2005) le laser diode 980nm utilisé pour activer la solution d'irrigation (NaOCl et H₂O₂) permet d'éliminer plus efficacement les boues dentinaires que l'irrigation classique à l'aide d'une seringue. Il permet par conséquent une meilleure adaptation du cône de gutta-percha du fait de la pénétration du ciment facilité au sein des canalicules dentinaires. Une obturation moins dense et la présence d'espaces à la jonction gutta-percha/ciment de scellement/dentine radiculaire sont

retrouvées pour les canaux qui n'ont pas été traitées par laser (figure 30) (Wang et coll., 2005).

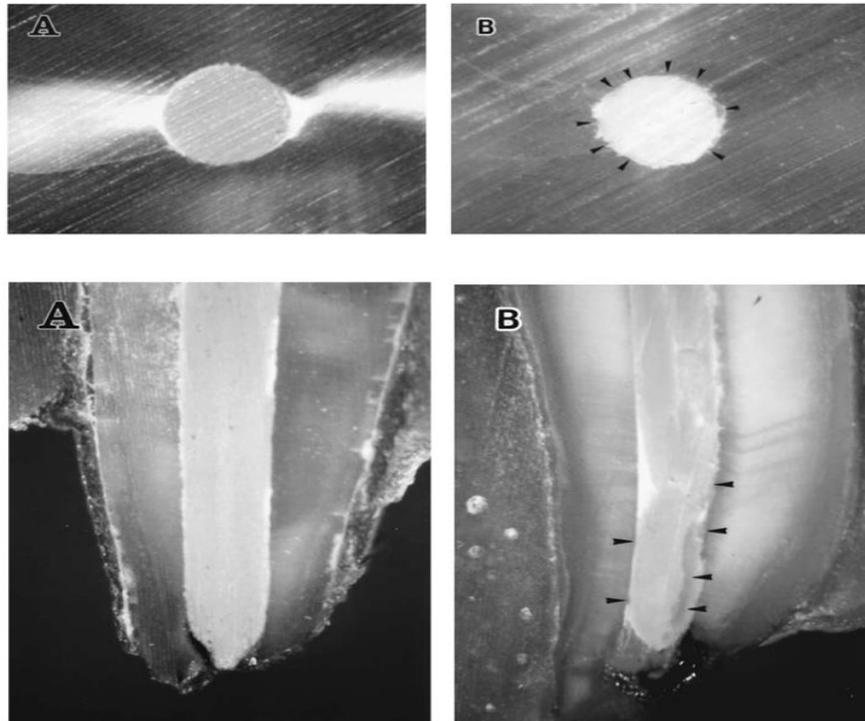


Figure 30 : photographie de coupes transversales et longitudinales de deux incisives permanentes obturées montrant la présence d'espaces à l'interface gutta-percha/parois canalaires (flèches noires - image B) A : activation de la solution d'irrigation à l'aide d'un laser diode. B : irrigation sans activation (source : Wang et coll., 2005)

Un traitement par laser diode serait donc intéressant pour permettre une meilleure obturation tridimensionnelle.

- Laser Er, Cr : YSGG

Selon Özer et Basaran (2010) le traitement du canal avec un laser Er-Cr : YSGG utilisé à 1 et 2W avant l'obturation permettrait d'améliorer le scellement apical et de réduire les fuites de ciment du fait d'une meilleure pénétration de celui-ci dans les canalicules dentinaires. Lorsque le réglage de la puissance du laser dépasse les 2.5W, des cracks dentinaires et des marques de carbonisation apparaissent sur la dentine (Özer et Basaran, 2013).

L'irradiation préalable à l'obturation par le laser Er, Cr : YSGG permettrait une meilleure adaptation des matériaux au sein du canal, cependant, il faut être vigilant quant aux paramètres de puissance appliqués pour ne pas générer d'effets délétères pour la dent. D'autres études sont cependant nécessaires afin de confirmer ces résultats.

- Laser Er : YAG

D'après Mello et coll. (2004) l'utilisation d'un laser Er : YAG pendant la phase d'irrigation permettrait une meilleure ouverture des canalicules dentinaires et par conséquent une meilleure adaptation du ciment endodontique avec la dentine. L'utilisation du laser couplé à une obturation avec un ciment AH plus[®] ou N-Rickert[®] permet d'obtenir un meilleur joint gutta/ciment/dentine que le Sealapex[®] et le Ketac endo[®] (Mello et coll., 2004).

Le laser Er : YAG utilisé pendant la phase d'irrigation semble autoriser une meilleure pénétration des différents ciments endodontiques au sein des canalicules dentinaires. De nouvelles études sont cependant nécessaires afin de confirmer ces résultats.

- Laser Nd : YAG

Selon Goya et coll. (2000) l'irradiation à l'aide un laser Nd : YAG en mode pulsé à 2W pendant l'irrigation permet d'obtenir une meilleure obturation des canalicules dentinaires. Après obturation, les dents utilisées pour cette étude ont été immergées dans du colorant afin d'analyser la pénétration à l'interface gutta-percha/parois canalaires. Les auteurs ont montré qu'il n'y avait pas de pénétration apicale de colorant dans le groupe traité avec le laser alors qu'il y avait une pénétration du colorant sur environ 30% de la hauteur pour les dents du groupe témoin. Une meilleure étanchéité de l'obturation est obtenue dans le groupe traité avec le laser par rapport au groupe témoin (figure 31) (Goya et coll., 2000).

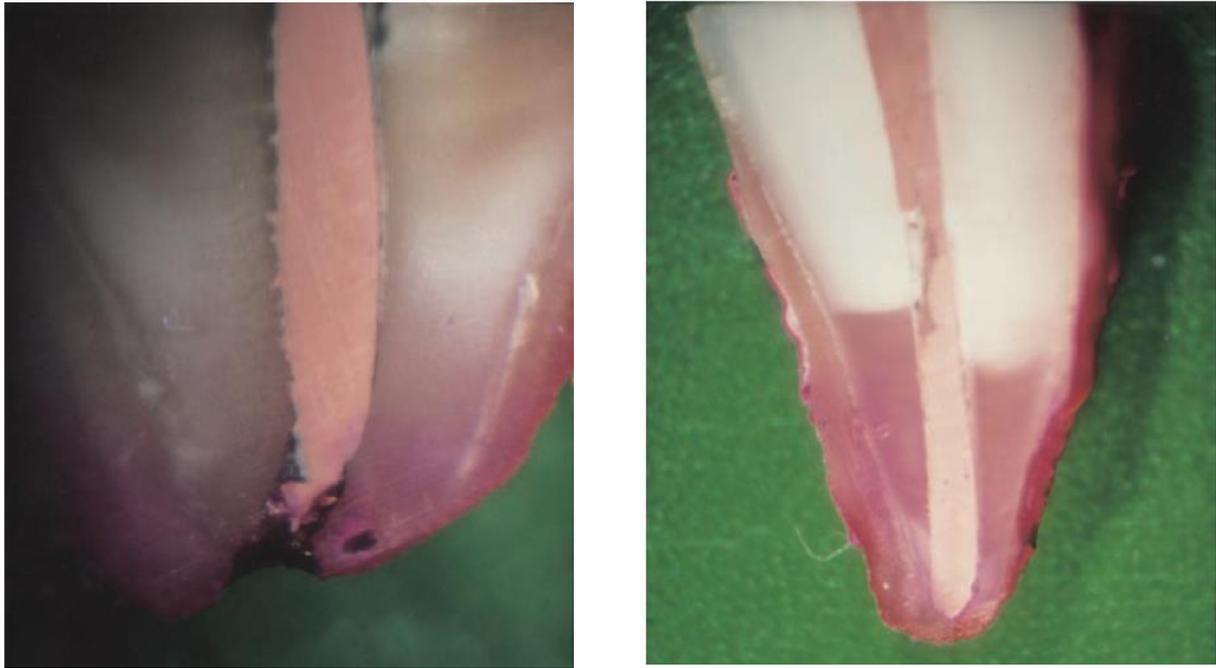


Figure 31 : photographies de coupes transversales de deux dents. A gauche, avec activation laser Nd : YAG lors de la phase d'irrigation et à droite sans activation. L'image de gauche montre une percolation du colorant depuis l'apex sur plusieurs millimètres. Aucune pénétration n'est visible sur la photographie de droite (source : Goya et coll., 2000)

D'après Rey et Missika. (2015), le laser Nd : YAG peut être utilisé pour sécher le canal en effectuant des tirs brefs (5Hz et 150mJ) tout en remontant en direction coronaire. Grâce à son « effet canon », il peut être utilisé pour propulser le ciment dans les canaux à l'aide de tirs brefs (5Hz à 200mJ pendant 0,5s pour le tiers apical et 5Hz à 150mJ pendant 1s pour le tiers moyen et coronaire). Pour cela, les parois sont enduites de ciment de consistance fluide jusqu'au tiers apical à l'aide d'un lentulo. La fibre laser est ensuite insérée à 1mm de l'apex et des tirs sont effectués tout en remontant sur le long du canal. Une fois cette étape terminée, un cône de gutta-percha calibré peut être introduit dans le canal pour terminer l'obturation (Figure 32). Le laser pourra également servir à ramollir la gutta-percha pour pouvoir la fouler à l'aide d'instruments manuels ou de la fibre elle-même (10Hz à 250mJ) (Rey et Missika, 2015).

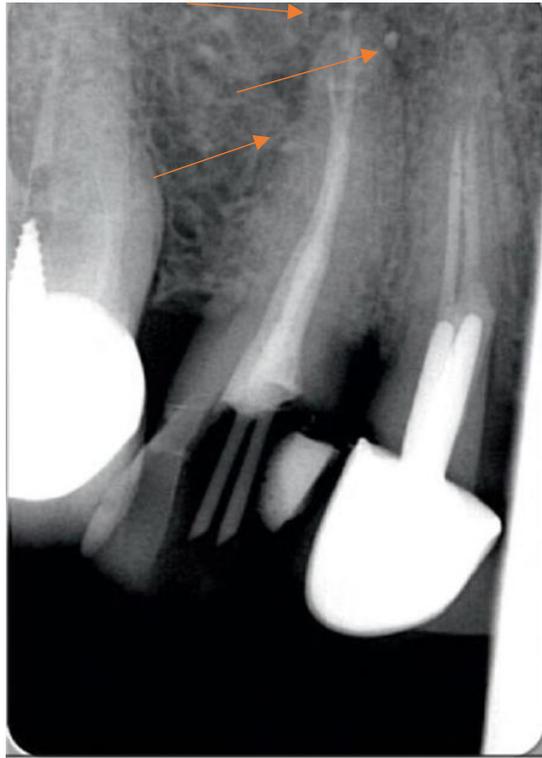


Figure 32 : radiographie post-opératoire d'une dent obturée à l'aide du laser Nd : YAG. Les flèches orange montrent la propulsion du ciment par le delta apical et les canaux accessoires (source : Rey et Missika, 2015)

Moon et coll. (2012) ont montré que le laser Nd : YAG utilisé comme activateur des solutions d'irrigation (NaOCl ou EDTA) augmentait la pénétration du ciment endodontique dans les canalicules dentinaires en comparaison aux groupes témoins n'ayant reçu qu'une activation à l'aide d'une seringue de l'EDTA ou du NaOCl. Sur les coupes transversales de dents obturés *in vitro* présentées en figure 33, on remarque que la pénétration du ciment est plus profonde à l'intérieur des canalicules dentinaires pour les groupes traités à l'aide du laser (Moon et coll., 2012).

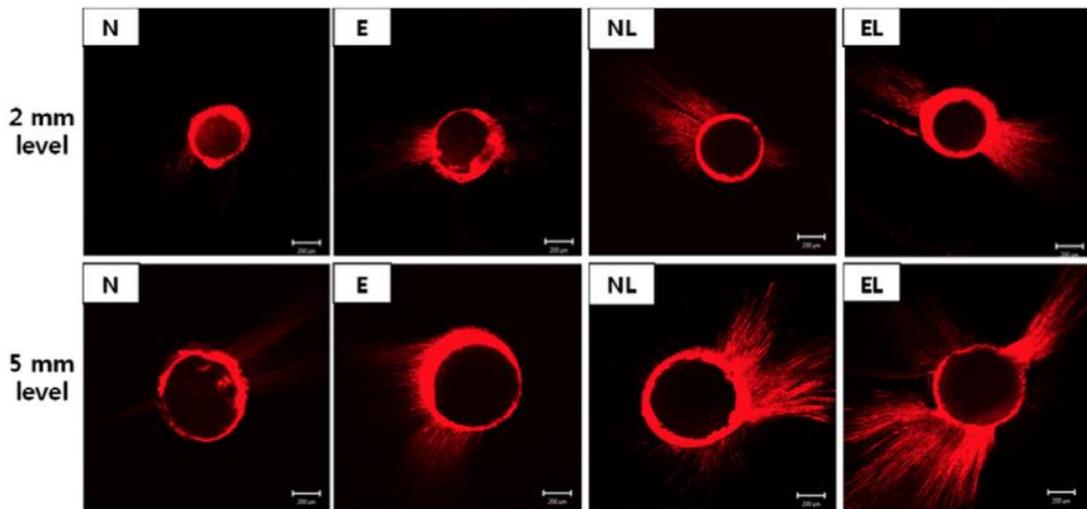


Figure 33 : coupes transversales de dents traitées classiquement (E et N) et traitées à l'aide laser Nd : YAG (NL et EL) montrant la profondeur de pénétration du ciment au sein des canalicules dentinaires à 2 et 5mm de l'apex (source : Moon et coll., 2012)

Selon Moura-Netto et coll. (2007), lorsqu'il est utilisé pendant le traitement endodontique, le laser Nd : YAG permet l'obtention d'une meilleure étanchéité à l'interface gutta-percha/parois canalaire. L'ouverture des canalicules dentinaire permet ainsi une pénétration accrue du ciment dans la dentine (Figure 34) (Moura-Netto et coll., 2007).

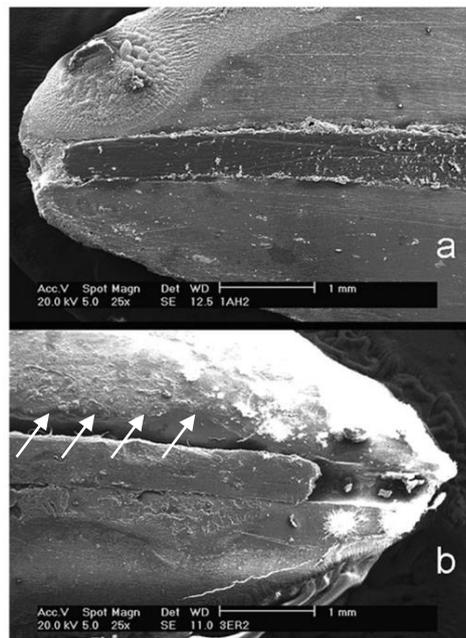


Figure 34 : photographies SEM de la zone apicale de deux dents traitées endodontiquement. a. traitement canalaire assisté par laser Nd : YAG ; b. traitement

canalaire conventionnel. L'image a. montre une parfaite adaptation du matériau d'obturation contrairement à l'image b. où la présence de vides est mise en évidence par les flèches blanches (source : Moura-Netto et coll., 2007)

Le laser Nd : YAG semble permettre une meilleure adaptation du ciment et de la gutta-percha au sein de l'endodonte et serait également utile pour le séchage du canal, la propulsion du ciment et la condensation de la gutta-percha.

Ces études ont permis de conclure que les lasers utilisés couramment en odontologie sont capables d'améliorer l'obturation canalaire en augmentant la pénétration pariétale du ciment notamment grâce à un meilleur nettoyage et une meilleure ouverture des canalicules dentinaires.

Il est cependant nécessaire d'être vigilant quant aux réglages du laser puisqu'une puissance trop élevée du dispositif peut avoir un effet thermique délétère au niveau de la dentine et du parodonte.

Le traitement laser permettrait donc de réduire le risque de recolonisation bactérienne d'une dent et d'améliorer la pérennité du traitement endodontique réalisé.

L'effet mécanique ou « effet canon » de certains lasers tels que le Nd : YAG permettrait le séchage des canaux et la propulsion du ciment d'obturation dans le volume de l'endodonte. Ils pourraient également servir à ramollir la gutta-percha en fin de traitement pour permettre de mieux la fouler et d'obtenir un traitement plus dense. D'autres lasers comme les erbiums sembleraient avoir la puissance nécessaire pour ces effets.

Des études complémentaires sont nécessaires en ce qui concerne l'obturation car très peu d'articles portent sur ce sujet.

2.6 Le retraitement canalair

Selon l'ANDEM (agence nationale pour le développement de l'évaluation médicale) « le retraitement endodontique (RTE) est indiqué face au constat d'échec du traitement endodontique initial et lorsqu'une pathologie péri-apicale ou péri-radicaire d'origine endodontique est diagnostiquée et met en cause une dent ou racine dont le traitement canalair a déjà été fait ». Le retraitement endodontique peut également être effectué en l'absence de pathologie apicale lorsque le renouvellement d'une obturation coronaire ou prothétique est envisagé et que l'obturation précédente n'est plus étanche et compromet le traitement radicaire en place. (ANDEM, 1996)

Les lasers, par leur effet bactéricide, permettent de décontaminer les canaux pendant et après la désobturation.

Ils permettraient également d'éliminer les matériaux d'obturation persistants grâce à « l'effet canon » ou effet photomécanique.

Enfin, les effets thermiques permettraient de ramollir la gutta-percha pour une élimination facilitée de l'ancien matériau d'obturation canalair.

Nous allons voir, au travers de 5 études réalisées *ex vivo*, si le laser apporte un avantage dans le retraitement endodontique par rapport aux techniques traditionnelles :

- Le laser Er : YAG

L'étude de Jiang et coll. (2016) a comparé l'efficacité de différents systèmes d'activation des solutions d'irrigation (sonique, ultrasonique et laser Er : YAG 2940nm en méthode PIPS) sur l'élimination des débris générés lors de la désobturation canalair. Pour évaluer ces différents systèmes, 28 premières prémolaires maxillaires monoradiculées extraites ont été mise en forme et obturées de la même manière (ciment AH Plus® et gutta-percha). Elles ont ensuite été stockées pendant une semaine dans un milieu humide et la désobturation a été réalisée à l'aide du système Pro Taper Universal® couplé aux différentes techniques d'activation citées (manuelle, sonique, ultrasonique et PIPS). Le laser utilisé à 1W, 20Hz et 50mJ par pulsation à l'aide d'une fibre de 300 microns donne les meilleurs résultats en termes de volume de matériau d'obturation éliminé et de résidus de ciments présents dans le canal (tableaux 4 et 5).

Le laser est plus efficace pour le nettoyage des parois radiculaires en comparaison aux autres méthodes d'activation comme le montre la figure 35 (Jiang et coll., 2016).

Tableau 4 : tableau présentant la quantité de résidus de matériaux d'obturation présent à la fin du retraitement en fonction des différentes techniques d'activation des solutions d'irrigation testées (source : Jiang et coll., 2016)

<i>Group</i>	<i>Coronal</i>	<i>Middle</i>	<i>Apical</i>	<i>Overall</i>
Control	$2.08 \pm 0.27^{\text{IV}}$	$2.56 \pm 0.32^{\text{IV}}$	$2.95 \pm 0.40^{\text{III}}$	$2.53 \pm 0.51^{\text{IV}}$
Sonic	$1.31 \pm 0.29^{\text{III}}$	$1.89 \pm 0.36^{\text{III}}$	$2.61 \pm 0.43^{\text{II}}$	$1.94 \pm 0.46^{\text{III}}$
Ultrasonic	$0.84 \pm 0.32^{\text{II}}$	$1.35 \pm 0.36^{\text{II}}$	$1.76 \pm 0.26^{\text{I}}$	$1.32 \pm 0.26^{\text{I}}$
PIPS	$0.35 \pm 0.32^{\text{I}}$	$0.75 \pm 0.31^{\text{I}}$	$1.65 \pm 0.33^{\text{I}}$	$0.92 \pm 0.22^{\text{I}}$

Tableau 5 : tableau présentant le volume (mm³) de matériau éliminé du canal pour chaque technique d'activation des solutions d'irrigation testées (source : Jiang et coll., 2016)

	<i>Sonic</i>	<i>Ultrasonic</i>	<i>PIPS</i>
Overall	$0.16 \pm 0.07^{\text{III}}$	$0.48 \pm 0.10^{\text{II}}$	$0.93 \pm 0.14^{\text{I}}$
Coronal	$0.07 \pm 0.04^{\text{III}}$	$0.25 \pm 0.09^{\text{II}}$	$0.56 \pm 0.11^{\text{I}}$
Middle	$0.06 \pm 0.03^{\text{III}}$	$0.14 \pm 0.06^{\text{II}}$	$0.26 \pm 0.08^{\text{I}}$
Apical	$0.03 \pm 0.01^{\text{II}}$	$0.09 \pm 0.03^{\text{I}}$	$0.11 \pm 0.04^{\text{I}}$

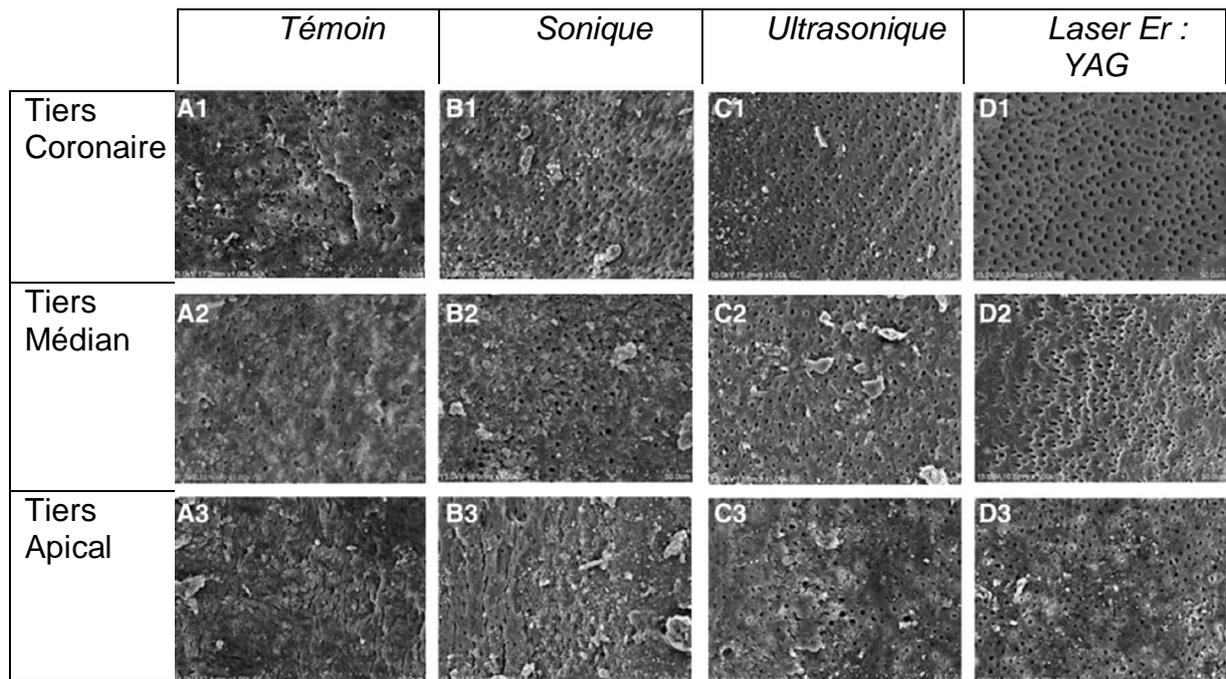


Figure 35 : photographies SEM présentant les débris d'obturation résiduels sur les parois canalaire aux différents tiers du canal selon la méthode d'activation des solutions d'irrigation testées. On remarque des parois plus propres lorsque le laser est utilisé (source : Shian Jiang et coll., 2016)

Yang et coll. (2021) ont comparé l'efficacité des ultrasons et du laser Er : YAG pour l'élimination du ciment et de la gutta-percha au cours d'un retraitement endodontique. Pour cela 36 dents monoradiculées extraites ont été obturées puis désobturées à l'aide du système Pro Taper Universal®. Les dents du groupe 1 ont été irriguées à l'aide d'une seringue et d'une aiguille de 30G (NaOCl + EDTA), pour les dents des groupes 2 et 3, l'activation a été réalisée respectivement à l'aide d'un système US et d'un Laser Er : YAG en méthode PIPS (NaOCl + EDTA). D'après les résultats obtenus, la méthode d'irrigation avec le laser permet d'éliminer plus efficacement les débris de l'ancienne obturation. Elle permet également de laisser le moins de matériaux résiduels à l'intérieur du canal et les parois radiculaires sont nettement plus propres avec le nettoyage assisté par le laser qu'avec les ultrasons et la seringue classique. Il y a une absence de débris d'obturation et une bonne ouverture des canalicules dentinaires lorsque le laser en technique PIPS est utilisé. Le nettoyage est moins bien

réalisé avec la seringue et les ultrasons comme nous le montre la figure 36 (Yang et coll., 2021).

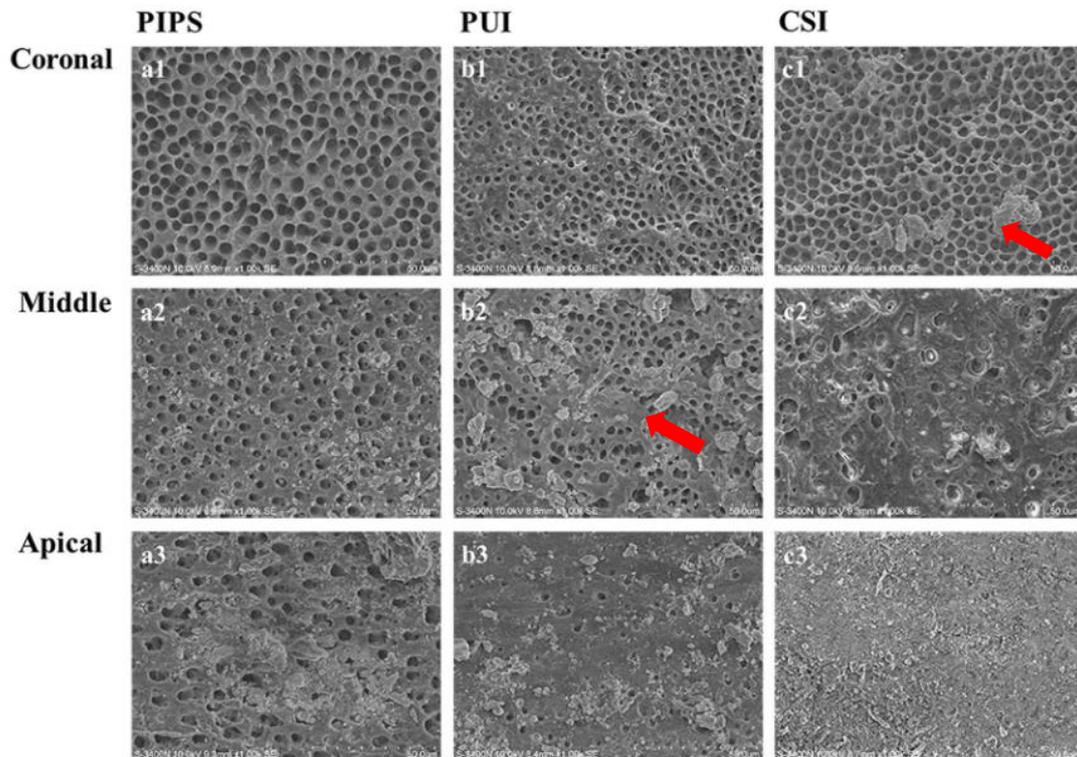


Figure 36 : scanner SEM (x1000) des parois radiculaires des différents tiers du canal en fonction des techniques d'activation étudiées. On remarque un meilleur nettoyage et une ouverture accrue des tubulis dentinaires en méthode PIPS. Les flèches rouges nous montrent les débris d'obturation encore présents dans le canal (source : Yang et coll., 2021)

Gorduysus et coll. (2019) ont évalué l'efficacité du laser Er : YAG 2940nm selon différentes intensités par rapport aux ultrasons pour éliminer les matériaux d'obturation. 21 prémolaires mandibulaires extraites ont été divisées en 3 groupes après que celles-ci aient été préparées et obturées. Les dents du groupe 1 ont été désobturées à l'aide d'inserts ultrasoniques (Satelec®) sous spray. Les dents du groupe 2 ont été désobturées avec le laser à une puissance de 40mJ sous spray et les dents du groupe 3 ont été désobturées avec le même laser à 50mJ sous spray.

La désobturation effectuée avec le laser est plus efficace qu'avec les ultrasons (figure 37 et 38) et il n'y a pas de différences significatives en termes d'élimination de la gutta-percha que le laser soit utilisé à 40 ou à 50mJ. Cependant, le laser a généré

des marques de carbonisation et de brûlures au niveau des parois canalaires (figure 38).

Les opérateurs ont rencontré des difficultés de pénétration dans les canaux courbes du fait du manque de flexibilité des fibres du laser et des inserts ultrasonores. (source : Gorduysus et coll., 2017)



Figure 37 : photographies d'une coupe longitudinale d'un canal après désobturation au laser à 50mJ/pulsation. On remarque l'absence de matériaux résiduels et des marques de carbonisation de la dentine. (source : Gorduysus et coll., 2019)



Figure 38 : photographie d'une coupe longitudinale d'un canal après désobturation aux ultrasons. On remarque la présence de matériaux résiduels (source : Gorduysus et coll., 2019).

Le laser Er : YAG semble permettre d'améliorer le retrait des matériaux d'obturation. Il persiste cependant un risque important d'échauffement et de brûlure de l'endodonte lorsque la puissance du laser est élevée.

- Laser Er, Cr : YSGG

Abduljalil et Kalender (2019) ont testé l'efficacité du laser Er, Cr : YSGG sur l'élimination des débris d'obturation et des boues dentinaires à la suite d'une reprise de traitement endodontique. Pour cela 84 prémolaires mandibulaires extraites ont été préparées à l'aide du système Pro Taper® et divisés en 6 groupes. Les groupes 1, 2

et 3 ont été obturées par condensation latérale à froid et les groupes 4, 5, 6 par condensation verticale à chaud avec du ciment AH Plus (Dentsply®) et de la gutta-percha. Ils ont ensuite tous été désobturés à l'aide du Pro Taper Universal® avec irrigation au NaOCl. Les groupes 1 et 4 servent de groupes témoins. Le laser a été utilisé à 1,5W (75mJ) de puissance dans les groupes 2 et 5 et à 3W (150mJ) de puissance dans les groupes 3 et 6 après la désobturation.

Les résultats ne montrent pas de différence significative quant à l'efficacité du nettoyage entre les différentes techniques de désobturation et ce quel que soit la technique d'obturation. Les parties coronaires et médianes des canaux sont mieux nettoyées avec le laser quelle que soit la technique d'obturation et de désobturation testée. L'élimination des débris à l'aide du laser utilisé à 3W montre une meilleure efficacité par rapport à une puissance de 1,5W, à l'exception de la partie apicale où les résultats sont équivalents. Cependant, on observe des marques de carbonisation lors de l'étude en microscopie pour les dents traitées à 3W de puissance (figure 39) (source : Abduljalil et Kalender, 2020).

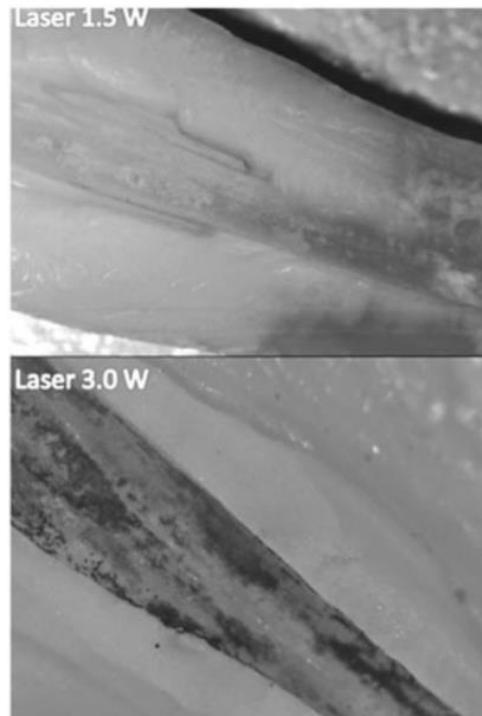


Figure 39 : photographies de coupes longitudinales en stéréomicroscopie (x18) de dents désobturées à l'aide un laser Er, Cr : YSGG. On note la présence de zones de carbonisation pour le canal retraité avec le laser Er, Cr : YSGG à 3W (en bas) par

rapport à celui traité avec le laser à 1,5W de puissance (en haut) (source : Abduljalil et Kalender, 2019)

Le laser Er, Cr : YSGG semble être capable d'éliminer efficacement les anciens matériaux obturation mais peut provoquer des brûlures de la dentine radicaire lorsqu'il est utilisé à forte puissance.

- Laser Nd : YAP

Cheng et Zhu. (2021) ont comparé l'efficacité de différents instruments de retraitement associés au laser Nd : YAP. Pour cela, 80 prémolaires extraites ont été préparées et obturées à l'aide de ciment AH Plus® et de gutta-percha. Elles ont ensuite été divisées en 8 groupes égaux. Les groupes A et B sont désobturés respectivement à l'aide du système réciproque R25 et R50 (VDW®), les groupes C et D respectivement à l'aide des systèmes Mtwo R 15 et 25 (VDW®) et les groupes E et F respectivement avec les Mtwo R 15 et 25 (VDW®) puis avec une lime H de taille 0,40mm. Les groupes G et H ont été désobturés avec des limes H manuelles de 0,15 à 0,40mm. Pour les groupes B, D, F et H la désobturation a été assistée avec un laser Nd : YAP

Les matériaux d'obturation des groupes qui ont reçu une irradiation laser en complément ont été plus efficacement éliminés par rapport aux mêmes groupes sans utilisation du laser. Le système de retraitement le plus efficace semblent être le système réciproque Mtwo R avec les limes H associés au laser Nd : YAP.

Les parois sont mieux nettoyées en associant le laser quelle que soit la technique de désobturation utilisée (figure 40) (Cheng et Zhu, 2021).

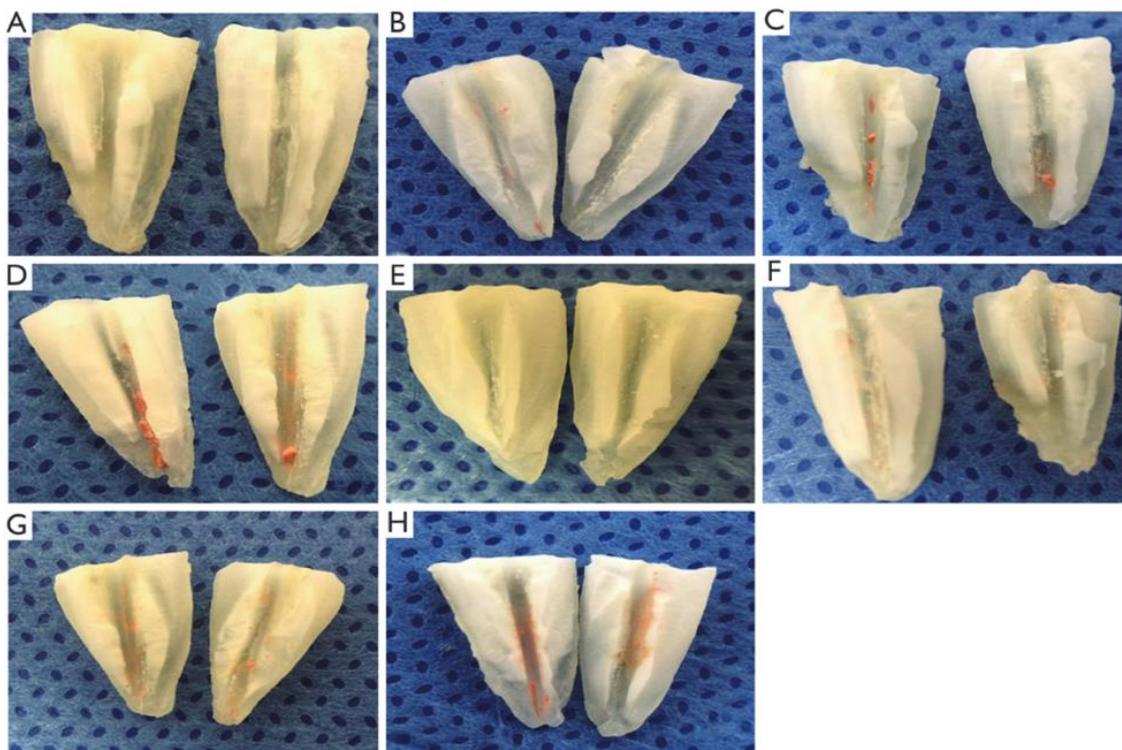


Figure 40 : photographies de coupes longitudinales des dents de chaque groupe et des résidus d'obturation présents en fin de retraitement (A) Nd : YAP réciproque, (B) réciproque seul, (C) Nd : YAP + Mtwo, (D) Mtwo seul, (E) Nd : YAP + Mtwo + limes H, (F) Mtwo + limes H, (G) Nd : YAP + limes H, (H) limes H. On remarque un meilleur nettoyage de A par rapport à B, de C par rapport à D, de E par rapport à F et de G par rapport à H (source : Cheng et coll., 2021)

Le laser Nd : YAP semble permettre d'améliorer l'élimination des anciens matériaux obturation lorsqu'il est utilisé en complément d'un débridement mécanique.

Les différentes études présentées ont démontré l'intérêt potentiel du laser dans le retraitement endodontique. Le laser Nd : YAP et les deux lasers erbium (Er : YAG et Er, Cr : YSGG) semblent être les seuls à avoir été étudié pour cette indication.

Bien que les effets des lasers semblent utiles à l'élimination des matériaux d'obturation, ils ne permettent pas une élimination complète desdits matériaux. Ils doivent donc être utilisés en association avec une instrumentation mécanique.

D'autre part, lorsque le laser est utilisé seul, un échauffement important est généré, pouvant entraîner des effets indésirables tels que la carbonisation ainsi que la brûlure des tissus dentinaires. Ces effets peuvent se répercuter sur le parodonte et fragiliser la dent ou créer des faux canaux dans les racines courbées (qui restent très compliquées à retraiter sans être délétère, que ce soit avec un laser ou des ultrasons). Le laser nécessite donc une utilisation précautionneuse et un bon contrôle de la puissance d'utilisation.

Des études complémentaires seraient également nécessaires afin de préciser les réglages à utiliser.

Le laser ne semble pas encore pouvoir remplacer nos moyens mécaniques de désobturation mais peuvent être utilisés en complément de ces derniers.

2.7 Le retrait des bris instrumentaux

Au cours d'un traitement ou retraitement endodontique, certains éléments peuvent bloquer l'accès au canal et à la zone apicale. Le canal peut être obstrué par un ancrage ou par un instrument fracturé (limes, lentulo, instrument mécanisé etc.). Cela empêche la réalisation du traitement car l'accès à la zone apicale est impossible, empêchant la désinfection et l'obturation correctes des canaux.

Nous allons voir au travers de différentes études en quoi le laser pourrait être un atout dans le retrait de ces éléments :

- Le laser Nd : YAP

Zhang et Wang (2021) ont testé l'efficacité du laser Nd : YAP pour le retrait des bris instrumentaux. Le laser Nd : YAP 1340nm a été utilisé à une puissance de 360mJ en 3 ou 5 pulsations. Plusieurs groupes ont été formés en fonction de l'instrument à éliminer (lime 10, lime15, Pro Taper® Next X1 et Pro Taper® Next X1 X2). Les résultats, après 5 tirs laser (1,8 W) ont montré une diminution de la longueur des instruments au sein du canal. Le laser permet de détruire l'instrument fracturé dans des canaux relativement droits. (Figure 41).

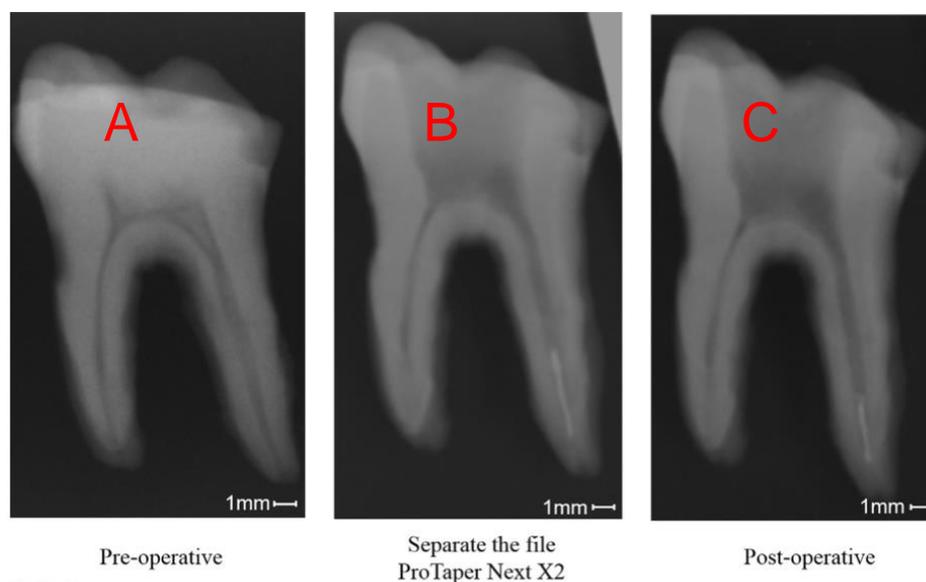


Figure 41 : radiographie au cours de l'utilisation d'un laser Nd : YAP pour le retrait d'un instrument de type Pro Taper® Next X2 cassé : (A) radiographie pré-opératoire avant présence du bris instrumental ; (B) radiographie avec présence du bris instrumental ; (C) radiographie du bris résiduel après 5 tirs laser. On remarque une diminution de la longueur de l'instrument fracturé après 5 tirs (source : Zhang et Wang, 2021)

Cette étude a également permis de mesurer les augmentations de température durant le temps de travail et leurs effets sur la dentine. Ils en ont conclu que la température augmentait avec le nombre de pulsations et qu'en dessous de 5 tirs, il n'y avait pas de risque pour la dent et les tissus parodontaux puisque l'augmentation de température restait inférieure à 10°C. Lorsque la fibre est placée parallèlement au canal, il y a une fusion de la dentine qui se crée, alors que lorsque celle-ci est placée perpendiculairement, une cratérisation pouvant aboutir à une perforation est observée (figure 42) (Zhang et Wang, 2021).



Figure 42 : photographie en stéréomicroscopie d'un Pro Taper® Next X2 fracturé dans un canal après 5 tirs laser : une fusion de la dentine est présentée par la flèche noire et une zone de cratérisation par la flèche rouge (source : Lu Zhang et coll., 2021)

Le laser Nd : YAP semble donc capable de détruire en partie les instruments fracturés au fur et à mesure des tirs. Il semble tout de même que la dentine avoisinante soit impactée par son usage car il y a un phénomène de fusion et de cratérisation de la dentine radiculaire.

- Laser Nd : YAG

Ebihara et coll. (2003) ont testé la capacité du laser Nd : YAG à éliminer les ancrages canaux et les bris instrumentaux. Pour cela 24 dents couronnées extraites ont été choisies. Les couronnes ont été retirées et les dents divisées en 3 groupes. Groupe 1 pour les dents avec présence d'inlay-cores, groupe 2 pour les dents avec un

traitement canalaire et groupe 3 pour les dents présentant une lime K fracturée dans le canal. Le laser a été utilisé à 900mJ sous spray pour retirer les différents éléments du canal. Le laser a permis de retirer tous les inlay-cores et la gutta-percha ainsi que 5/8 des instruments fracturés sur les dents du groupe 3. Les diamètres des canaux travaillés ont augmenté de 28%, 6% et 62% respectivement pour les groupes 1, 2 et 3 signifiant un retrait de dentine pendant le temps de travail. La dentine a un aspect fondu et recristallisé après passage du laser, cependant aucune fracture ou perforation n'est survenue au sein des 3 groupes (Ebihara et coll., 2003).

Hagiwara et coll. (2013) ont étudié le retrait d'instruments fracturés à l'aide d'une nouvelle méthode utilisant le laser Nd : YAG. Celle-ci consiste à englober l'extrémité coronaire de l'instrument fracturé à l'aide d'un petit tube en étain et d'introduire une fibre laser au contact de l'instrument. Un tir laser est ensuite effectué (1s à 400mJ et 10 pulsation/s) pour permettre à l'étain de fondre puis de se souder à l'instrument fracturé lors de son refroidissement. L'ensemble peut ensuite être retiré du canal. (Figure 43) (Hagiwara et coll., 2013).

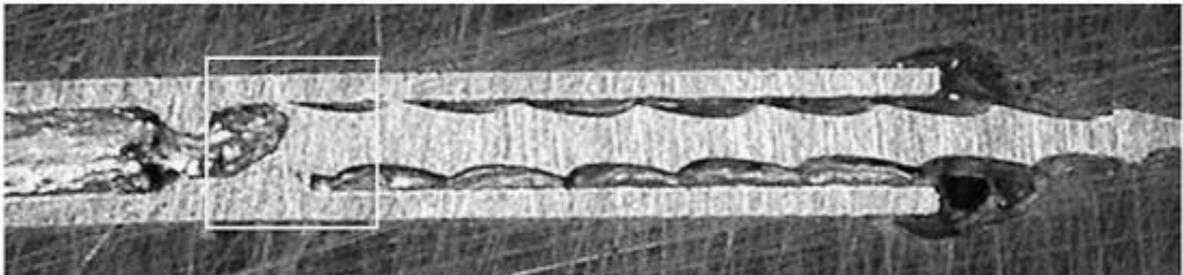


Figure 43 : photographie en stéréomicroscopie du tube d'étain et de la lime K soudés après le tir au laser Nd : YAG de 400mJ à 10 pulsations/s (source : Hagiwara et coll., 2013)

Yu et coll. (2000) ont testé l'efficacité du laser Nd : YAG pour l'élimination d'instruments fracturés. 36 dents monoradiculées extraites ont été incluses dans l'étude. Des limes H 0,25mm ; 0,40mm et 0,50mm ont été fracturées à 3mm de l'apex dans chacune des dents. Trois groupes ont été formés en fonction des réglages du laser : le groupe 1 utilise le laser à 1W avec 15 pulsations/ 3s, le groupe 2 à 2W avec 20 pulsations/2s et le groupe 3 à 3W avec 20 pulsations/2s.

Les résultats montrent que le tirs lasers à 2W et 3W sont capables de retirer les limes fracturées dans 4/6 cas contre 2/6 lorsque les tirs sont de 1W (tableau 6).

Tableau 6 : résultats et temps de travail de l'élimination des limes fracturées par le laser selon les 3 paramètres de puissance du laser Nd : YAG appliqués (source : Yu et coll., 2000)

<i>Output power (W)</i>	<i>Total time (sec)</i>	<i>Completely removed teeth (teeth number)</i>
1.0	478.0 ± 67.4	2/6
2.0	284.7 ± 46.7	4/6
3.0	134.0 ± 20.0	4/6

Il a été montré lors de cette étude que le laser permet de détruire les limes fracturées ou de faciliter la réalisation d'un bypass grâce à la fonte de la dentine bordant l'instrument. Toutefois, cela entraîne une forte augmentation de température et il y a des risques de perforation/ création de butée dans les canaux courbes (figure 44) (Yu et coll., 2000).

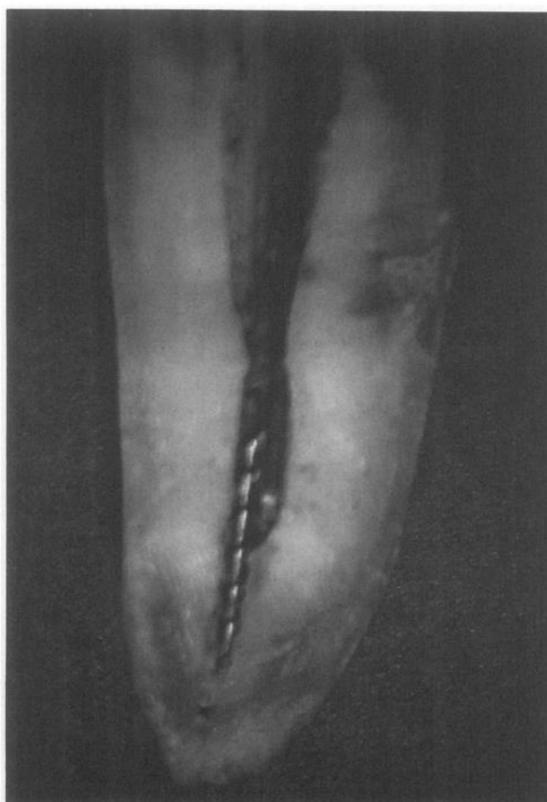


Figure 44 : photographie à fort grossissement d'une coupe transversale d'une dent montrant la fonte dentinaire et la destruction partielle de l'instrument provoqués par le laser Nd : YAG utilisé à 2W et 20 pulsations pendant 72s (source : Yu et coll., 2000)

Le laser Nd : YAG semble donc capable d'aider au retrait ou à l'élimination des bris instrumentaux. Les tirs laser sont capables de détruire partiellement ou totalement les petits instruments fracturés.

Il ressort de l'analyse de ces articles que les lasers Nd : YAG et Nd : YAP sont les lasers les plus efficaces pour la dépose d'instruments fracturés.

Le très faible nombre d'étude portant sur les autres types de lasers ne nous permet pas de conclure quant à leur efficacité réelle sur le sujet.

Le principal avantage du laser dans cette discipline est que les fibres optiques souples permettent d'aller au contact de l'instrument sans avoir un accès direct à celui-ci, contrairement au système ultra-sonique ou aux instruments de préhension.

Les laser seraient donc capables d'aider à mobiliser et à retirer ces instruments via la fonte de la dentine bordant l'instrument (effets photoacoustiques et photomécaniques). D'autres techniques fonctionnant avec les effets photothermiques ont été développées (Hagiwara et coll., 2013).

Les inconvénients de cette technique sont les risques de perforation, de création de butée et l'augmentation de température pouvant être délétères pour le parodonte.

Des nouvelles études avec d'autres lasers ainsi que des comparatifs avec les différents systèmes de retrait d'instrument seraient intéressants pour démontrer le réel intérêt du laser dans le retrait des bris instrumentaux.

3. Tableau de synthèse de l'utilisation des lasers en endodontie

	Coiffage pulpaire	Préparation canalaire	Activation de l'irrigation	Désinfection	Obturation	Retraitement	Retrait de bris instrumentaux
Nd : YAG	+	+	+	+	++		++
ND : YAP		+		+		++	++
Er : YAG	++	++	++	++	++	++	
Er, Cr : YSGG	+	++	+	++	++	++	
Diode	++		+	++	+		
CO ₂	+						

Conclusion

Comme nous avons pu le démontrer au cours de ce travail, le laser semble être un outil intéressant pour l'odontologie et tout particulièrement pour l'endodontie.

Il permettrait par exemple d'accroître la désinfection et le potentiel de cicatrisation pulpaire, d'améliorer l'élimination des boues et l'ouverture des canalicules dentinaires ainsi que de potentialiser l'effet décontaminant des solutions d'irrigation.

Pour ce qui concerne les traitements et retraitements ou encore la qualité de l'obturation canalaire, le faible nombre d'études disponible ne permet pas de conclure à un réel avantage du laser. Toutefois, l'obturation serait de meilleure qualité lorsque la préparation canalaire est assistée par laser.

Il est aujourd'hui très difficile de déterminer quel laser choisir pour sa pratique quotidienne de l'endodontie. Toutefois, à la vue des différentes études comparatives, le laser Er : YAG, de par sa polyvalence et les bons résultats obtenus, semble se démarquer des autres lasers. Il reste cependant relativement encombrant et assez onéreux.

Un autre laser se détache : le laser diode. Sa polyvalence associée à coût plus avantageux et à un plus faible encombrement que la laser Er : YAG en font un outil de choix en omnipratique. Il favorise la désinfection canalaire et participe à l'optimisation des solutions d'irrigation.

La plupart des études présentées sont réalisées *in vitro* ou *ex vivo* à partir de modèles ou de dents monoradiculées à canaux droit, il serait nécessaire de réaliser de nouveaux essais cliniques comparatifs notamment *in vivo*, avec un suivi à long terme des patients et en condition réelle de traitement, afin de définir si le laser est réellement en passe de devenir un outil indispensable en endodontie.

Références bibliographiques

1. Abduljalil M, Kalender A. Efficacy of Er,Cr:YSGG Laser with Different Output Powers on Removing Smear Layer After Retreatment of Two Different Obturation Techniques. *Photobiomodul Photomed Laser Surg.* 2020; 38(2): 84-90.
2. Agence Nationale pour le Développement de l'Évaluation Médicale. Recommandations et références dentaires 1996. Paris : ANDEM ; 1996. 167 p.
3. Rey G. Utilisation des lasers en endodontie : Principes physiques et protocoles opératoires. Courbevoie : Editions CdP ; 2014. XVII-162 p.
4. Aldeen RZ, Aljabban O, Milly H, Allouch A, Hamadah O. Effect of Er:YAG laser-activated irrigation on dentine debris removal from different parts of the root canal system: An *in vitro* study. *Dent Med Probl.* 2018; 55(2): 133-8.
5. Ali MN, Hossain M, Nakamura Y, Matsuoka E, Kinoshita JI, Matsumoto K. Efficacy of root canal preparation by Er,Cr:YSGG laser irradiation with crown-down technique *in vitro*. *Photomed Laser Surg.* 2005; 23(2): 196-201.
6. Arnabat J, Escribano C, Fenosa A, Vinuesa T, Gay-Escoda C, Berini L, et coll. Bactericidal activity of erbium, chromium:yttrium-scandium-gallium-garnet laser in root canals. *Lasers Med Sci.* 2010; 25(6): 805-10.
7. van As G. Erbium lasers in dentistry. *Dent Clin North Am.* 2004; 48(4): 1017-59.
8. Asnaashari M, Ebad LT, Shojaeian S. Comparison of Antibacterial Effects of 810 and 980- nanometer Diode Lasers on *Enterococcus Faecalis* in the Root Canal System: An *in vitro* study. *LASER Ther.* 2016; 25(3): 209-14.
9. Bader C, Krejci I. Indications and limitations of Er:YAG laser applications in dentistry. *Am J Dent.* 2006; 19(3): 178-86.
10. Barat K. Laser Accidents: Occurrence and Response. *Health Phys.* 2003; 84(5): S93.
11. Bergmans L, Moisiadis P, Teughels W, Van Meerbeek B, Quirynen M, Lambrechts P. Bactericidal effect of Nd:YAG laser irradiation on some endodontic pathogens *ex vivo*. *Int Endod J.* 2006; 39(7): 547-57.
12. Betancourt P, Merlos A, Sierra JM, Arnabat-Dominguez J, Viñas M. Er,Cr:YSGG Laser-Activated Irrigation and Passive Ultrasonic Irrigation: Comparison of Two Strategies for Root Canal Disinfection. *Photobiomodul*

- Photomed Laser Surg. 2020; 38(2): 91-7.
13. Bjørndal L, Mjör IA. Pulp-dentin biology in restorative dentistry. Part 4: Dental caries: characteristics of lesions and pulpal reactions. Quintessence Int Berl Ger 1985. 2001; 32(9): 717-36.
 14. 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.
 15. Bogdan Allemann I, Kaufman J. Laser principles. Curr Probl Dermatol. 2011; 42: 7-23.
 16. Cagnac B, Faroux JP. Lasers : Interaction Lumière-Atomes. Les Ulis : EDP Sciences ; 2002. XVI-526 p.
 17. Camacho-Alonso F, Julián-Belmonte E, Chiva-García F, Martínez-Beneyto Y. Bactericidal Efficacy of Photodynamic Therapy and Chitosan in Root Canals Experimentally Infected with *Enterococcus faecalis*: An *In Vitro* Study. Photomed Laser Surg. 2017; 35(4): 184-9.
 18. Cengiz E, Yilmaz HG. Efficacy of Erbium, Chromium-doped:Yttrium, Scandium, Gallium, and Garnet Laser Irradiation Combined with Resin-based Tricalcium Silicate and Calcium Hydroxide on Direct Pulp Capping: A Randomized Clinical Trial. J Endod. 2016; 42(3): 351-5.
 19. Cheng F, Zhu Y. The efficacy of different instruments combined with Nd:YAP in endodontic retreatment. Ann Transl Med. 2021; 9(14): 1141.
 20. da Costa Lima GA, Aguiar CM, Câmara AC, Alves LC, Dos Santos FAB, do Nascimento AE. Comparison of smear layer removal using the Nd:YAG laser, ultrasound, ProTaper Universal system, and CanalBrush methods: an in vitro study. J Endod. 2015; 41(3): 400-4.
 21. Daggett C, Daggett A, McBurney E, Murina A. Laser safety: the need for protocols. Cutis. 2020; 106(2): 87-92.
 22. Dai S, Xiao G, Dong N, Liu F, He S, Guo Q. Bactericidal effect of a diode laser on *Enterococcus faecalis* in human primary teeth: an in vitro study. BMC Oral Health. 2018; 18(1): 154.
 23. De Meyer S, Meire MA, Coenye T, De Moor RJG. Effect of laser-activated irrigation on biofilms in artificial root canals. Int Endod J. 2017; 50(5): 472-9.
 24. Deppe H, Horch HH. Laser applications in oral surgery and implant dentistry.

- Lasers Med Sci. 2007; 22(4): 217-21.
25. Ding Y, Xiao S, Yang H, Meng S. Application of Nd:YAG laser in stomatology. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*. 2015; 33(5): 445-50.
 26. Donohoe C, Senge MO, Arnaut LG, Gomes-da-Silva LC. Cell death in photodynamic therapy: From oxidative stress to anti-tumor immunity. *Biochim Biophys Acta Rev Cancer*. 2019; 1872(2): 188308.
 27. Dudelzak J, Goldberg DJ. Laser Safety. *Curr Probl Dermatol*. 2011 ; 42 : 35-9.
 28. Ebihara A, Takashina M, Anjo T, Takeda A, Suda H. Removal of root canal obstructions using pulsed Nd:YAG laser. *Int Congr Ser*. 2003; 1248: 257-9.
 29. Estrela CRA, de Oliveira JD, Tirintan FC, Guapo-Pavarina R, Pereira TM, Bandeca MC, et coll. Antimicrobial Potential of Laser Diode in Infected Dentin. *J Contemp Dent Pract*. 2018; 19(8): 904-9.
 30. Forget S, Robert-Philip I, Balcou P. Les différents lasers : un tour d'horizon. *Reflets Phys*. 2010 ; (21) : 18-23.
 31. Galler KM, Grubmüller V, Schlichting R, Widbiller M, Eidt A, Schuller C, et coll. Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation. *Int Endod J*. 2019; 52(8): 1210-7.
 32. Garcez AS, Nuñez SC, Hamblim MR, Suzuki H, Ribeiro MS. Photodynamic Therapy Associated with Conventional Endodontic Treatment in Patients with Antibiotic-resistant Microflora: A Preliminary Report. *J Endod*. 2010; 36(9): 1463-6.
 33. George R, Meyers IA, Walsh LJ. Laser Activation of Endodontic Irrigants with Improved Conical Laser Fiber Tips for Removing Smear Layer in the Apical Third of the Root Canal. *J Endod*. 2008; 34(12): 1524-7.
 34. Ghasemi N, Torabi ZS. The Effect of Photodynamic Therapy on the Smear Layer Removal: a Scanning Electron Microscopic Study. *J Dent Shiraz Iran*. 2021; 22(3): 162-8.
 35. Ghazanfari R, Azimi N, Nokhbatolfoghahaei H, Alikhasi M. Laser Aided Ceramic Restoration Removal: A Comprehensive Review. *J Lasers Med Sci*. 2019; 10(2): 86-91.
 36. Gorduysus MO, Al-Rubai H, Salman B, Al Saady D, Al-Dagistani H, Muftuoglu S. Using erbium-doped yttrium aluminum garnet laser irradiation in different energy output levels versus ultrasonic in removal of root canal filling materials

- in endodontic retreatment. *Eur J Dent.* 2017; 11(3): 281-6.
37. Goya C, Yamazaki R, Tomita Y, Kimura Y, Matsumoto K. Effects of pulsed Nd:YAG laser irradiation on smear layer at the apical stop and apical leakage after obturation. *Int Endod J.* 2000; 33(3): 266-71.
 38. Gross AJ, Herrmann TRW. History of lasers. *World J Urol.* 2007; 25(3): 217-20.
 39. Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca JP, 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.
 40. Hagiwara R, Suehara M, Fujii R, Kato H, Nakagawa K ichi, Oda Y. Laser welding method for removal of instruments debris from root canals. *Bull Tokyo Dent Coll.* 2013; 54(2): 81-8.
 41. Higuchi N, Hayashi JI, Fujita M, Iwamura Y, Sasaki Y, Goto R, et coll. Photodynamic Inactivation of an Endodontic Bacteria Using Diode Laser and Indocyanine Green-Loaded Nanosphere. *Int J Mol Sci.* 2021; 22(16): 8384.
 42. Jiang S, Zou T, Li D, Chang JWW, Huang X, Zhang C. Effectiveness of Sonic, Ultrasonic, and Photon-Induced Photoacoustic Streaming Activation of NaOCl on Filling Material Removal Following Retreatments in Oval Canal Anatomy. *Photomed Laser Surg.* 2016; 34(1): 3-10.
 43. Jurič IB, Plečko V, Pandurić DG, Anić I. The antimicrobial effectiveness of photodynamic therapy used as an addition to the conventional endodontic retreatment: a clinical study. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2014; 11(4): 549-55.
 44. Karunakar P, Solomon RV, Kumar BS, Mounika G. Evaluation of smear layer removal of radicular Dentin in comparison with different irrigation devices: An in vitro study. *J Conserv Dent JCD.* 2021; 24(3): 236-40.
 45. Kermanshah H, Ranjbar Omrani L, Ghabraei S, Fekrazad R, Daneshparvar N, Bagheri P. Direct Pulp Capping With ProRoot MTA Alone and in Combination With Er:YAG Laser Irradiation: A Clinical Trial. *J Lasers Med Sci.* 2020; 11(Suppl 1): S60-6.
 46. Kokuzawa C, Ebihara A, Watanabe S, Anjo T, Bolortuya G, Saegusa H, et coll. Shaping of the root canal using Er:YAG laser irradiation. *Photomed Laser Surg.* 2012; 30(7): 367-73.
 47. Komabayashi T, Ebihara A, Aoki A. The use of lasers for direct pulp capping. *J Oral Sci.* 2015; 57(4): 277-86.

48. Korkut E, Torlak E, Gezgin O. Antibacterial and Smear Layer Removal Efficacy of Er:YAG Laser Irradiation by Photon-Induced Photoacoustic Streaming in Primary Molar Root Canals: A Preliminary Study. *Photomed Laser Surg.* 2018 ; 36(9) : 480-486.
49. Korkut E, Torlak E, Gezgin O, Özer H, Şener Y. Antibacterial and Smear Layer Removal Efficacy of Er:YAG Laser Irradiation by Photon-Induced Photoacoustic Streaming in Primary Molar Root Canals: A Preliminary Study. *Photomed Laser Surg.* 2018; 36(9): 480-6.
50. Kosarieh E, Bolhari B, Sanjari Pirayvatlou S, Kharazifard MJ, Sattari Khavas S, Jafarnia S, et coll. Effect of Er:YAG laser irradiation using SWEEPS and PIPS technique on dye penetration depth after root canal preparation. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2021; 33: 102136.
51. Kunert M, Lukomska-Szymanska M. Bio-Inductive Materials in Direct and Indirect Pulp Capping-A Review Article. *Mater Basel Switz.* 2020; 13(5): E1204.
52. Linton E, Walkden A, Steeples LR, Bhargava A, Williams C, Bailey C, et coll. Retinal burns from laser pointers: a risk in children with behavioural problems. *Eye Lond Engl.* 2019; 33(3): 492-504.
53. Lipski M, Nowicka A, Kot K, Postek-Stefańska L, Wysoczańska-Jankowicz I, Borkowski L, et coll. Factors affecting the outcomes of direct pulp capping using Biodentine. *Clin Oral Investig.* 2018; 22(5): 2021-9.
54. Liu T, Huang Z, Ju Y, Tang X. Bactericidal efficacy of three parameters of Nd:YAP laser irradiation against *Enterococcus faecalis* compared with NaOCl irrigation. *Lasers Med Sci.* 2019; 34(2): 359-66.
55. Mansouri R. Les lasers Erbium et Nd-YAP en omnipratique quotidienne. *AO News.* 2018 ; (18) : 10-12.
56. Matsuoka E, Jayawardena JA, Matsumoto K. Morphological study of the Er,Cr:YSGG laser for root canal preparation in mandibular incisors with curved root canals. *Photomed Laser Surg.* 2005; 23(5): 480-4.
57. Matsuoka E, Yonaga K, Kinoshita J, Kimura Y, Matsumoto K. Morphological study on the capability of Er:YAG laser irradiation for root canal preparation. *J Clin Laser Med Surg.* 2000; 18(4): 215-9.
58. Mello I, Robazza CRC, Antoniazzi JH. Influence of Er:YAG laser irradiation on apical sealing of four different sealers. *Braz Dent J.* 2004; 15(3): 190-3.
59. Mester A. Laser Biostimulation. *Photomed Laser Surg.* 2013; 31(6): 237-9.
60. Ministère du travail, Ministère de l'agriculture. Décret n° 2010-750 du 2 juillet

- 2010 relatif à la protection des travailleurs contre les risques dus aux rayonnements optiques artificiels. JORF n°0153 du 4 juillet 2010.
61. de Miranda RG, Colombo APV. Clinical and microbiological effectiveness of photodynamic therapy on primary endodontic infections: a 6-month randomized clinical trial. *Clin Oral Investig*. 2018; 22(4): 1751-61.
 62. Moon YM, Kim HC, Bae KS, Baek SH, Shon WJ, Lee W. Effect of Laser-activated Irrigation of 1320-Nanometer Nd:YAG Laser on Sealer Penetration in Curved Root Canals. *J Endod*. 2012; 38(4): 531-5.
 63. Moritz A, Schoop U, Goharkhay K, Sperr W. Advantages of a pulsed CO2 laser in direct pulp capping: a long-term in vivo study. *Lasers Surg Med*. 1998; 22(5): 288-93.
 64. Morsy DA, Negm M, Diab A, Ahmed G. Postoperative pain and antibacterial effect of 980 nm diode laser versus conventional endodontic treatment in necrotic teeth with chronic periapical lesions: A randomized control trial. *F1000Research*. 2018; 7: 1795.
 65. Moshonov J, Peretz B, Brown T, Rotstein I. Cleaning of the root canal using Nd:YAP laser and its effect on the mineral content of the dentin. *J Clin Laser Med Surg*. 2003; 21(5): 279-82.
 66. de Moura-Netto C, de Freitas Carvalho C, de Moura AAM, Davidowicz H, Antoniazzi JH. Influence of Nd:YAG and Diode Laser Irradiation on Apical Sealing When Associated with AH Plus and EndoREZ Endodontic Cements. *Photomed Laser Surg*. 2007; 25(5): 413-7.
 67. Nagendrababu V, Jayaraman J, Suresh A, Kalyanasundaram S, Neelakantan P. Effectiveness of ultrasonically activated irrigation on root canal disinfection: a systematic review of in vitro studies. *Clin Oral Investig*. 2018; 22(2): 655-70.
 68. Namour A, Geerts S, Zeinoun T, De Moor R, Nammour S. Safety Irradiation Parameters of Nd:YAP Laser Beam for Endodontic Treatments: An In Vitro Study. *BioMed Res Int*. 2016; 2016: 1-5.
 69. Nathan MI. Semiconductor lasers. *Appl Opt*. 1966; 5(10): 1514-28.
 70. Ng R, Singh F, Papamanou DA, Song X, Patel C, Holewa C, et coll. Endodontic photodynamic therapy ex vivo. *J Endod*. 2011; 37(2): 217-22.
 71. Noiri Y, Katsumoto T, Azakami H, Ebisu S. Effects of Er:YAG laser irradiation on biofilm-forming bacteria associated with endodontic pathogens in vitro. *J*

- Endod. 2008; 34(7): 826-9.
72. de Oliveira BP, Aguiar CM, Câmara AC. Photodynamic therapy in combating the causative microorganisms from endodontic infections. *Eur J Dent.* 2014; 8(3): 424-30.
 73. Olivi G, Genovese MD. Laser restorative dentistry in children and adolescents. *Eur Arch Paediatr Dent.* 2011; 12(2): 68-78.
 74. Olivi G, Genovese MD, Maturo P, Docimo R. Pulp capping: advantages of using laser technology. *Eur J Paediatr Dent.* 2007; 8(2): 89-95.
 75. Ortega-Concepción D, Cano-Durán JA, Peña-Cardelles JF, Paredes-Rodríguez VM, González-Serrano J, López-Quiles J. The application of diode laser in the treatment of oral soft tissues lesions: A literature review. *J Clin Exp Dent.* 2017; 9(7): 925-8.
 76. Ozbay Y, Erdemir A. Effect of several laser systems on removal of smear layer with a variety of irrigation solutions. *Microsc Res Tech.* 2018; 81(10): 1214-22.
 77. Özer SY, Basaran E. Evaluation of microleakage of root canal fillings irradiated with different output powers of erbium, chromium:yttrium-scandium-gallium-garnet laser. *Aust Endod J J Aust Soc Endodontology Inc.* 2013; 39(1): 8-14.
 78. Pang P, Coluzzi D, Obeidi A, Olivi G, Parker S, Rechmann P, et coll. Laser Energy in Oral Soft Tissue Applications. *J laser dent.* 2012; 20(2): 9.
 79. Park SW, Park S, Choi HK, Park HJ, Yu W, Kim HS, et coll. Blue laser-induced selective vasorelaxation by the activation of NOSs. *Microvasc Res.* 2021; 136: 104165.
 80. Parker S. Laser regulation and safety in general dental practice. *Br Dent J.* 2007; 202(9): 523-32.
 81. Parker S, Cronshaw M, Anagnostaki E, Mylona V, Lynch E, Grootveld M. Current Concepts of Laser–Oral Tissue Interaction. *Dent J.* 2020; 8(3): 61.
 82. Peters OA, Schönenberger K, Laib A. Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J.* 2001; 34(3): 221-30.
 83. Piétri S. Efficacité comparée de 3 techniques d'activation laser des solutions d'irrigation endodontiques [thèse d'exercice]. [Nice] : université Nice Sophia Antipolis. Faculté d'odontologie ; 2018. 82p.
 84. Podolak B, Nowicka A, Woźniak K, Szyszka-Sommerfeld L, Dura W, Borawski

- M, et al. Root Surface Temperature Increases during Root Canal Filling In Vitro with Nd:YAG Laser-Softened Gutta-Percha. *J Healthc Eng.* 2020; 2020: 8828272.
85. Prada I, Mico-Munoz P, Giner-Lluesma T, Mico-Martinez P, Collado-Castellano N, Manzano-Saiz A. Influence of microbiology on endodontic failure: Literature review. *Med Oral Patol Oral Cirugia Bucal.* 2019; 24(3) :e364-72.
 86. Preethee T, Kandaswamy D, Arathi G, Hannah R. Bactericidal effect of the 908 nm diode laser on *Enterococcus faecalis* in infected root canals. *J Conserv Dent JCD.* 2012; 15(1): 46-50.
 87. Rabello DGD, Corazza BJM, Ferreira LL, Santamaria MP, Gomes APM, Martinho FC. Does supplemental photodynamic therapy optimize the disinfection of bacteria and endotoxins in one-visit and two-visit root canal therapy? A randomized clinical trial. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2017; 19: 205-11.
 88. Rey G, Missika P. *Les Lasers et la chirurgie dentaire.* Paris : CDP ; 2016. 217 p.
 89. Rubio CR, Cremonuzzi D, Moya M, Soriano F, Palma J, Campana V. Helium-Neon Laser Reduces the Inflammatory Process of Arthritis. *Photomed Laser Surg.* 2010; 28(1): 125-9.
 90. Santucci PJ. Dycal versus Nd:YAG laser and Vitrebond for direct pulp capping in permanent teeth. *J Clin Laser Med Surg.* 1999; 17(2): 69-75.
 91. Schwob C, Julien L. Le laser : principe de fonctionnement. *Reflets Phys.* 2010 ; (21) : 12-6.
 92. Simon JC, Kwok JW, Vinculado F, Fried D. Computer-Controlled CO2 Laser Ablation System for Cone-beam Computed Tomography and Digital Image Guided Endodontic Access: A Pilot Study. *J Endod.* 2021; 47(9): 1445-52.
 93. Simon S, Machtou P, Pertot WJ. *Endodontie.* Paris : CDP ; 2012. 508 p.
 94. Siqueira JF. Aetiology of root canal treatment failure: why well-treated teeth can fail: Aetiology of endodontic failure. *Int Endod J.* 2001; 34(1): 1-10.
 95. Sobouti F, Khatami M, Chiniforush N, Rakhshan V, Shariati M. Effect of single-dose low-level helium-neon laser irradiation on orthodontic pain: a split-mouth single-blind placebo-controlled randomized clinical trial. *Prog Orthod.* 2015; 16: 32.
 96. Stefanova VP, Tomov GT, Tsanova ST. Morphological Study Of Border Area

- Of Pulp-Capping Materials And Er:YAG Laser Prepared Hard Dental Surface. *Folia Med (Plovdiv)*. 2015; 57(1): 49-55.
97. Stuart CH, Schwartz SA, Beeson TJ, Owatz CB. Enterococcus faecalis: its role in root canal treatment failure and current concepts in retreatment. *J Endod*. 2006; 32(2): 93-8.
 98. Suer K, Ozkan L, Guvenir M. Antimicrobial effects of sodium hypochlorite and Er,Cr:YSGG laser against Enterococcus faecalis biofilm. *Niger J Clin Pract*. 2020; 23(9): 1188-93.
 99. Sutter E, Giacomelli-Hiestand B, Rücker M, Valdec S. CO2 laser application in stomatology. *Swiss Dent J*. 2019; 129(3): 214-5.
 100. Suzuki M, Kato C, Kawashima S, Shinkai K. Clinical and Histological Study on Direct Pulp Capping With CO2 Laser Irradiation in Human Teeth. *Oper Dent*. 2019; 44(4): 336-47.
 101. Takeda FH, Harashima T, Kimura Y, Matsumoto K. A comparative study of the removal of smear layer by three endodontic irrigants and two types of laser: Study on the smear layer removal. *Int Endod J*. 1999; 32(1): 32-9.
 102. Trindade AC, De Figueiredo JAP, Steier L, Weber JBB. Photodynamic therapy in endodontics: a literature review. *Photomed Laser Surg*. 2015; 33(3): 175-82.
 103. Vendramini Y, Salles A, Portella FF, Brew MC, Steier L, de Figueiredo JAP, et coll. Antimicrobial effect of photodynamic therapy on intracanal biofilm: A systematic review of in vitro studies. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. 2020; 32: 102025.
 104. Vishwanath V, Rao HM. Gutta-percha in endodontics: A comprehensive review of material science. *J Conserv Dent JCD*. 2019; 22(3): 216-22.
 105. Wang M, Ma L, Li Q, Yang W. Efficacy of Er:YAG laser-assisted direct pulp capping in permanent teeth with cariously exposed pulp: A pilot study. *Aust Endod J*. 2020; 46(3): 351-7.
 106. Wang X, Cheng X, Liu X, Wang Z, Wang J, Guo C, et coll. Bactericidal Effect of Various Laser Irradiation Systems on Enterococcus faecalis Biofilms in Dentinal Tubules: A Confocal Laser Scanning Microscopy Study. *Photomed Laser Surg*. 2018; 36(9): 472-9.
 107. Wang X, Sun Y, Kimura Y, Kinoshita JI, Ishizaki NT, Matsumoto K. Effects of diode laser irradiation on smear layer removal from root canal walls and apical

- leakage after obturation. *Photomed Laser Surg.* 2005; 23(6): 575-81.
108. Yamasaki A, Tamamura K, Sakurai Y, Okuyama N, Yusa J, Ito H. Remodeling of the rat gingiva induced by CO₂ laser coagulation mode. *Lasers Surg Med.* 2008; 40(10): 695-703.
 109. Yang R, Han Y, Liu Z, Xu Z, Liu H, Wei X. Comparison of the efficacy of laser-activated and ultrasonic-activated techniques for the removal of tricalcium silicate-based sealers and gutta-percha in root canal retreatment: a microtomography and scanning electron microscopy study. *BMC Oral Health.* 2021; 21(1): 275.
 110. Yazdanfar I, Barekattain M, Zare Jahromi M. Combination effects of diode laser and resin-modified tricalcium silicate on direct pulp capping treatment of caries exposures in permanent teeth: a randomized clinical trial. *Lasers Med Sci.* 2020; 35(8): 1849-55.
 111. Yu DG, Kimura Y, Tomita Y, Nakamura Y, Watanabe H, Matsumoto K. Study on removal effects of filling materials and broken files from root canals using pulsed Nd:YAG laser. *J Clin Laser Med Surg.* 2000; 18(1): 23-8.
 112. Zhang B, Yang BB, Gao ZY, Li L, An H. [Efficiency of diode laser-assisted methods in direct pulp capping of carious teeth]. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue.* 2020; 29(5): 554-6.
 113. Zhang L, Wang X. Efficiency and Temperature Rise of File Ablation by Neodymium:Yttrium-Aluminum-Perovskite Laser In Vitro. *J Endod.* 2021; 47(6): 982-8.
 114. Zou Z, Bhandari J, Xiao B, Liang X, Zhang Y, Yan G. Effect of using diode laser on *Enterococcus faecalis* and its lipoteichoic acid (LTA) in chronic apical periodontitis. *Lasers Med Sci.* 2021; 36(5): 1059-66.

Références électroniques

115. Balembois F. Le laser : fondamentaux [Internet]. [cité 5 avr 2022]. Disponible sur : http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/pdf/OPI_fr_M01_C01.pdf
116. INRS (institut national de recherche et de sécurité). Rayonnement Laser [Internet]. 2018 [cité 3 nov 2022]. Disponible sur : <https://www.inrs.fr/risques/rayonnements-optiques/rayonnement-laser.html>
117. HAS (Haute autorité de santé). Traitement endodontique [Internet]. 2008 [cité 12 avr 2022]. Disponible sur : <https://sfe-endo.fr/wp-content/uploads/2017/05/Le-traitement-endodontique.pdf>
118. Rigaudière F, Le Gargasson JF, Grall Y. I-1 : les sources lumineuses [Internet]. 2009 [cité 28 juin 2022]. Disponible sur : <http://odel.irevues.inist.fr/oeiletphysiologiedelavision/index.php?id=168>

Table des matières

REMERCIEMENTS.....	4
LISTES DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX.....	14
LISTE DES ABREVIATIONS.....	15
INTRODUCTION	16
1. LE LASER.....	19
1.1 FONCTIONNEMENT DU LASER	19
1.1.1 Historique.....	19
1.1.2 Principe de fonctionnement.....	19
1.1.3 Caractéristiques de la lumière et du rayon laser	22
1.2 EFFETS DU LASER SUR LES TISSUS.....	23
1.3 LES DIFFERENTS TYPES DE LASER.....	28
1.3.1 Les lasers pénétrants	29
1.3.2 Les lasers absorbés	33
1.4 RISQUES DE L'UTILISATION DU LASER.....	37
1.5 PRECAUTIONS D'USAGE	40
1.6 CONDUITE A TENIR EN CAS D'ACCIDENT	41
2. L'INTERET DU LASER EN ENDODONTIE	42
2.1 LE COIFFAGE PULPAIRE	42
2.2 LA PREPARATION CANALAIRE.....	49
2.3 L'OPTIMISATION DES SOLUTIONS D'IRRIGATION	55
2.4 DESINFECTION CANALAIRE.....	62
2.5 L'OBTURATION CANALAIRE	69
2.6 LE RETRAITEMENT CANALAIRE	76
2.7 LE RETRAIT DES BRIS INSTRUMENTAUX.....	85
3. TABLEAU DE SYNTHESE DE L'UTILISATION DES LASERS EN ENDODONTIE.....	90
CONCLUSION	91
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	92
REFERENCES ELECTRONIQUES.....	102
TABLE DES MATIERES.....	103

VINCENT Basile – Le laser en endodontie : un outil indispensable ?

Nancy 2023 : 108 pages, 44 figures, 6 tableaux

Th. : Chir.-Dent. : Nancy 2023

Mots-clefs:

- Laser
- Endodontic treatment
- Root canal treatment
- Photodynamic therapy

Résumé :

Depuis son invention en 1960, le laser fait partie intégrante de nos vies et trouve des applications dans de nombreux domaines comme l'industrie, l'automobile ou encore l'aérospatiale.

En Odontologie, cette technologie a mis plus de temps à faire sa place. Actuellement, on trouve des applications du laser en chirurgie osseuse et muco-gingivale, pour la désinfection des poches parodontales, l'éclaircissement dentaire, la désinfection et l'obturation canalair.

De nombreux lasers ont été développés et répondent aux besoins de ces différentes indications comme les lasers Er : YAG et diode qui prennent tout doucement leur place au sein de nos cabinets dentaires.

Cette thèse cherche à démontrer, en se basant sur une revue de littérature, si le laser apporte une amélioration considérable en endodontie.

Jury:

Président : Pr Eric MORTIER

Membres : Dr Jeanne DAVRIL
Dr Rémy BALTHAZARD
Dr Marin VINCENT

Directeurs de thèse : Dr Rémy BALTHAZARD
Dr Jeanne DAVRIL

Adresse de l'auteur :

Basile VINCENT
1 bis petite rue
21190 Puligny-Montrachet

Vu la demande du doyen de la faculté d'odontologie de Lorraine sur le rapport du jury :

Président : É. MORTIER – Professeur des universités
Membre du jury : R. BALTHAZARD – Maître de conférences des universités (Co-directeur de thèse)
Membre du jury : M. VINCENT – Maître de conférences des universités
Membre du jury : J. DAVRIL – Chef de clinique des universités – Assistant des hôpitaux (Co-directrice de thèse)

la présidente de l'université de Lorraine autorise

Monsieur Basile VINCENT

né à CHALON-SUR-SAÔNE (Saône-et-Loire) le 6 mai 1997,
à soutenir et imprimer sa thèse en vue d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire intitulée :

« LE LASER EN ENDODONTIE : UN OUTIL INDISPENSABLE ? »

Nancy, le 13 mars 2023
N° autorisation : 12889 C

La présidente de l'université de Lorraine



H. BOULANGER ☆