



HAL
open science

Intérêts du laser dans la désinfection canalaire au cours d'un traitement endodontique

Cécile Wasielewski

► **To cite this version:**

Cécile Wasielewski. Intérêts du laser dans la désinfection canalaire au cours d'un traitement endodontique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2018. dumas-03213812

HAL Id: dumas-03213812

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03213812v1>

Submitted on 30 Apr 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

UNIVERSITE PARIS DIDEROT - PARIS 7

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

5, Rue Garancière 75006 PARIS

Année 2018

Thèse N°:

N° attribué par la bibliothèque :

THÈSE pour le DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR

en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le

par **WASIELEWSKI Cécile**

**INTÉRÊTS DU LASER DANS LA DÉSINFECTION CANALAIRE
AU COURS D'UN TRAITEMENT ENDODONTIQUE**

Directeur de thèse : M. le Docteur Grégoire KUHN

J U R Y

Mme la Professeure Fani ANAGNOSTOU

Présidente

Mme la Docteure Maria-Clotilde CARRA

Assesseur

M. le Docteur Pascal COLLIN

Assesseur

M. le Docteur Bruno COURRIER

Assesseur

Mme la Docteure Juliane ISAAC

Assesseur

M. le Docteur Grégoire KUHN

Assesseur

M. le Docteur Benjamin POMES

Assesseur

UNIVERSITE PARIS DIDEROT - PARIS 7

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

5, Rue Garancière 75006 PARIS

Année 2018

Thèse N°:

N° attribué par la bibliothèque :

THÈSE pour le DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR

en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le

par **WASIELEWSKI Cécile**

née le 26 Novembre 1993

**INTÉRÊTS DU LASER DANS LA DÉSINFECTION CANALAIRE
AU COURS D'UN TRAITEMENT ENDODONTIQUE**

Directeur de thèse : M. le Docteur Grégoire KUHN

J U R Y

Mme la Professeure Fani ANAGNOSTOU

Présidente

Mme la Docteure Maria-Clotilde CARRA

Assesseur

M. le Docteur Pascal COLLIN

Assesseur

M. le Docteur Bruno COURRIER

Assesseur

Mme la Docteure Juliane ISAAC

Assesseur

M. le Docteur Grégoire KUHN

Assesseur

M. le Docteur Benjamin POMES

Assesseur

UNIVERSITE PARIS DIDEROT-PARIS 7

Présidente de l'Université :	Mme la Professeure Christine CLERICI
Doyenne de l'U.F.R. d'Odontologie :	Mme la Professeure Ariane BERDAL
Directrice Générale des Services :	Madame Pascale SAINT-CYR

JURY

Mme la Professeure Fani ANAGNOSTOU	Présidente
Mme la Docteure Maria-Clotilde CARRA	Assesseur
M. le Docteur Pascal COLLIN	Assesseur
M. le Docteur Bruno COURRIER	Assesseur
Mme la Docteure Juliane ISAAC	Assesseur
M. le Docteur Grégoire KUHN	Assesseur
M. le Docteur Benjamin POMES	Assesseur

Mme la Professeure Fani ANAGNOSTOU

Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Professeur des Universités - Praticien
Hospitalier

Pour l'honneur que vous me faites de présider ce jury, pour la qualité de votre travail et de votre enseignement, veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect et ma sincère reconnaissance.

Mme la Docteure Maria-Clotilde CARRA

Docteur en Chirurgie Dentaire
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Pour l'honneur que vous me faites en participant au jury de cette thèse, et pour toutes les connaissances que vous m'avez apporté au cours de ma formation, veuillez trouver ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

M. le Docteur Pascal COLLIN

Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme d'Etat en Odontologie
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Pour l'honneur que vous me faites en participant au jury de cette thèse, veuillez trouver ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

M. le Docteur Bruno COURRIER

Docteur en Chirurgie Dentaire
Docteur en Sciences Odontologiques
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Pour l'honneur que vous me faites en participant au jury de cette thèse, et pour toutes les connaissances que vous m'avez apporté au cours de ma formation, veuillez trouver ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

Mme la Docteure Juliane ISAAC

Docteur en Biologie
Maître de Conférences des Universités
Associée

Pour l'honneur que vous me faites en participant au jury de cette thèse, veuillez trouver ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

M. le Docteur Grégoire KUHN

Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités -
Praticien Hospitalier

Pour l'honneur que vous me faites d'avoir accepté la direction de cette thèse, pour votre disponibilité et vos conseils, veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect, de mon admiration et de ma sincère reconnaissance.

M. le Docteur Benjamin POMES

Docteur en Chirurgie Dentaire
Assistant Hospitalo-Universitaire

Pour l'honneur que vous me faites en participant au jury de cette thèse, et pour toutes les connaissances que vous m'avez apporté au cours de ma formation, veuillez trouver ici l'expression de mes plus sincères remerciements.

Table des matières

Introduction	2
1. Principes généraux du traitement endodontique	3
1.1. Spécificités de la flore bactérienne endodontique	3
1.2. Etapes du traitement canalaire	6
1.2.1. Mise en forme canalaire.....	6
1.2.2. Désinfection canalaire	10
1.2.3. Obturation tridimensionnelle	11
2. L'irrigation: potentialisation de la désinfection par l'activation	13
2.1. Les solutions d'irrigation.....	13
2.1.1. L'hypochlorite de sodium (NaOCl)	14
2.1.2. Acide Ethylène diamino tetra-acetic (EDTA)	16
2.1.3. MTAD.....	17
2.1.4. Digluconate de chlorhexidine.....	17
2.1.5. Autres	18
2.2. L'activation	20
2.2.1. Les dispositifs d'irrigation.....	22
2.2.2. Les techniques d'activation.....	23
2.2.2.1. Activation mécanique manuelle	23
2.2.2.2. Activation ultrasonore	24
2.2.2.3. Activation sonore.....	26
2.2.3. Limites de la désinfection.....	27
3. Apports du laser dans la désinfection canalaire.....	29
3.1. Généralités	29
3.1.1. Principes généraux du fonctionnement du laser	29
3.1.2. Rayonnements laser et tissus cibles.....	31
3.1.3. Les types de lasers utilisés en endodontie.....	32
3.2. Présentation de trois techniques de désinfection laser	36
3.2.1. L'irrigation activée par laser (LAI).....	38
3.2.2. Activation photoacoustique induite par photon (PIPS Technique).....	40
3.2.3. La désinfection par thérapie photodynamique (PAD)	42
Conclusions	45
Sources et Références bibliographiques	47
Table des illustrations	54

Introduction

L'objectif principal du traitement endodontique est la prévention ou la suppression d'une infection du système canalaire. Son but est la conservation des dents atteintes de pathologies pulpaires, après leur avoir redonné un état de santé biologiquement, cliniquement et radiographiquement contrôlable. C'est le professeur H.Schilder (Schilder, 1974) qui, en 1974, décrit les principes qui régissent l'endodontie moderne. Aujourd'hui, ils ne sont pas remis en cause : le traitement consiste toujours à éliminer les bactéries et leurs toxines par un parage, une mise en forme des canaux, une désinfection de l'endodonte, puis une obturation canalaire et coronaire étanche. Ce sont les moyens pour atteindre ces objectifs qui ont évolué. Ces dernières décennies ont en effet permis des innovations constantes des techniques, simplifiant leur mise en œuvre et réduisant le temps de réalisation du traitement canalaire. La désinfection est une étape primordiale, dont le résultat dépend du temps de contact de la solution sur les surfaces contaminées, or celui-ci est de plus en plus réduit, compromettant son efficacité. On observe en effet que malgré l'évolution des techniques les taux de succès des traitements endodontiques n'ont pas augmenté au fil des années (Ng et al. 2007).

Ceci soulève donc de nouvelles questions : comment avoir une désinfection complète du système canalaire alors que le temps d'action des solutions de désinfection est réduit ? Comment améliorer l'action de ces solutions ? Comment améliorer leur pénétration ? Comment lutter efficacement contre les bactéries résistantes qui provoquent des échecs endodontiques ?

Après un rapide rappel des principes généraux guidant la réalisation du traitement canalaire, nous insisterons sur le rôle essentiel de l'irrigation dans la désinfection canalaire, puis nous analyserons comment les différentes utilisations du laser proposent d'apporter des solutions pour améliorer la désinfection, en augmentant la pénétration ainsi que l'efficacité des solutions d'irrigation.

1. Principes généraux du traitement endodontique

Les procédures endodontiques sont parfaitement codifiées et fiables en termes de pronostic : le succès du traitement repose sur le respect d'objectifs biologiques et mécaniques interdépendants, qui se retrouvent dans les étapes de mise en forme et de nettoyage (Machtou et al. 1993). Malgré cela, le premier facteur associé à la présence d'une infection apicale est l'existence d'un traitement endodontique. Nos thérapeutiques seraient donc à l'origine de la plupart des échecs. En effet, de nombreux facteurs, influençant la réussite ou non du traitement, sont en lien avec l'opérateur : conditions opératoires aseptiques (utilisation d'un champ opératoire), fracture d'instruments lors de la mise en forme, obturation par excès ou défaut, ou encore mise en place d'une restauration coronaire non étanche (Pirani et al. 2015). La connaissance des protocoles et des critères de réalisation du traitement canalaire est primordiale afin d'améliorer la qualité de nos traitements et le pronostic de la thérapeutique endodontique.

1.1. Spécificités de la flore bactérienne endodontique

Un traitement canalaire est souvent consécutif à une infection endodontique liée à une contamination bactérienne du milieu pulpaire. La pulpe est protégée par les tissus durs de la dent, c'est donc un milieu stérile. Cependant lorsque cette barrière est détruite ou perméable (carie, fêlure, restauration non étanche, etc.), les tubulis dentinaires sont accessibles, et laissent passer les bactéries présentes dans la cavité buccale en direction pulpaire. Dans d'autres cas, la contamination est possible à partir d'une lésion parodontale.

Suite à cette invasion bactérienne, et tant que la pulpe est vitale, une réponse immunitaire (Bergenholtz 1981) et inflammatoire du complexe dentino-pulpaire va se mettre en place : activation du système du complément, action des macrophages, leucocytes, lymphocytes T et cellules dendritiques (Fouad, 2017). L'ensemble de ces cellules va agir pour éliminer les bactéries et les empêcher de coloniser le milieu pulpaire plus profondément. C'est lorsque l'équilibre fragile entre les bactéries et les mécanismes de défense de l'hôte est rompu que la pathologie pulpaire se met en place. Celle-ci peut conduire à la nécrose de la pulpe puis à une infection apicale. Une fois la pulpe nécrosée, il

n'y a plus de processus inflammatoire puisque l'hôte ne se défend plus, les bactéries peuvent alors proliférer.

La cavité buccale contient plus de cinq cents espèces bactériennes et seules quinze à trente ont été retrouvées dans les canaux contaminés. Elles sont donc peu à avoir la capacité de coloniser l'endodonte et entraîner la nécrose pulpaire. En effet, elles doivent adhérer aux tubulis, avoir des facteurs de virulence pour pouvoir lutter contre les défenses de l'hôte, et survivre dans le milieu pulpaire (anaérobie et avec peu de nutriments). La contamination initiale se fait par des bactéries planctoniques qui vont s'associer en communauté pour constituer un arrangement bactérien en plusieurs couches, adhérent aux parois canalaire et radiculaire : le biofilm (Chavez de Paz, 2015). Cette association les rend beaucoup plus résistantes puisqu'elles vont être protégées par une matrice-extracellulaire polysaccharique qu'elles produisent elles-mêmes, composant environ 85% de leur *volume* (Mohammadi et al. 2013). Cette matrice forme une barrière contre les facteurs extérieurs, l'immunité de l'hôte, leur permet des interactions métaboliques moléculaires et notamment l'échange de facteurs de virulence et de gènes, et ralenti leur croissance. De ce fait les bactéries organisées en biofilm sont plus résistantes que les bactéries planctoniques, notamment aux antibiotiques (Mah, 2012). C'est un système dynamique qui permet une synergie pour survivre, avec une sélection des espèces les plus virulentes. Ceci aboutit à une spécificité bactérienne selon le milieu, et dans notre cas selon l'écologie du canal (nutriments, taux d'oxygène, humidité, pH). C'est donc le contenu canalaire qui permet la survie et la croissance des micro-organismes. L'espace endodontique est adapté à la croissance bactérienne et représente une niche écologique idéale pour les bactéries grâce au manque d'oxygène et à la présence du support nutritif constitué du tissu pulpaire nécrosé et d'exsudat inflammatoire péri-apical.

L'infection endodontique va se déclarer lorsqu'on a une diminution des moyens de défense de l'hôte et lorsque les micro-organismes sont présents dans l'ensemble du système canalaire, en quantité suffisante pour provoquer et entretenir une lésion péri-apicale. Cette communauté pathogène structurée est très adhérente, les bactéries ne migrent plus par déplacement mais par multiplication. On parle d'infection primaire pour une dent n'ayant jamais eu de traitement endodontique, et d'infection secondaire pour une dent présentant une infection apicale malgré la présence d'une obturation canalaire. Avec l'utilisation des

techniques de biologie moléculaire, les espèces bactériennes composant la flore endodontique ont pu être identifiées. Cette flore varie dans le temps en fonction de la localisation endo-canaulaire, des conditions nutritives, de l'oxygénation, de l'individu et du type d'infection en présence (infection primaire ou secondaire)(Siqueira, h 2002).

Lors d'une infection initiale du canal, les familles de bactéries les plus fréquemment rencontrées sont : Streptococques (*S.sanguinis*, *S.mutans*), Eubacterium (*E.alactolyticum*, *E.lentum*), *Fusobacterium* (*F.nucleatum*), les Prevotella (*P.intermedia*, *P.denticola*, *P.anaerobius*), et les Porphyromonas (*P.gingivalis*, *P.endodontalis*) (Gomes et al. 2004). Les espèces en présence sont mixtes : à la fois des Gram + et Gram -. Lors d'une infection secondaire, la flore devient plus résistante aux mécanismes de défense de l'hôte et on ne retrouve que très peu d'espèces (généralement une ou deux par canal), quasiment exclusivement des Gram + : Streptocoques, Entérocoques et Lactobacilles (Chávez De Paz et al. 2003). Ces espèces sont peu détectées sur des dents non traitées elles contamineraient donc l'endodonte lors de la réalisation du traitement canalaire par le passage de fluide salivaire ou une restauration coronaire non étanche entre deux séances.

La bactérie la plus fréquemment retrouvée dans les lésions apicales des dents obturées est *Enterococcus faecalis* (Peciulienė et al. 2001). C'est un entérocoque, coccus, Gram +, anaérobie facultatif, une des bactéries les plus résistantes de la flore buccale. Elle est capable de former un biofilm dans les canaux traités par hydroxyde de calcium (Evans et al. 2002), de résister à la chaleur, à un pH allant jusqu'à 11,5, à l'hypochlorite, et de coloniser les tubulis dentaires (Love, 2001). Elle ne serait pas forcément présente au moment de l'infection mais pourrait pénétrer dans le canal lors de la préparation canalaire et survivre aux agents antibactériens puis persister après l'obturation. Un échec endodontique n'est pas lié de façon systématique à la présence de cette bactérie, cependant elle est très souvent détectée. En effet des levures et notamment *Candida Albicans* ont également été mis en évidence dans les infections secondaires (Lana et al. 2001). La variété des micro-organismes impliqués pourrait être encore bien plus vaste puisque certains ne peuvent toujours pas être cultivés malgré l'évolution des techniques. Chaque dent possède un modèle unique d'infection bactérienne dans lequel la présence d'un biofilm est la seule règle.

Nos manœuvres thérapeutiques vont avoir pour but de réduire la charge bactérienne jusqu'à atteindre un taux acceptable et garant du succès du traitement endodontique, une stérilisation totale est illusoire. Alors qu'il est facile d'éliminer une bactérie planctonique, l'élimination du biofilm répandu dans l'anatomie endodontique complexe, reste un défi (Costerton et al. 1999). Il peut être éliminé par l'action mécanique des instruments lors de la mise en forme, mais aussi par l'action chimique de solutions antiseptiques utilisées lors de l'irrigation. Il est indispensable de combiner ces deux actions puisque toutes les surfaces dentinaires ne sont pas travaillées lors de la mise en forme, ainsi, les isthmes et autres régions non accessibles aux instruments ne peuvent être nettoyés que par le biais de l'irrigation. A la fin du traitement, s'il persiste des zones non atteintes, une nouvelle colonisation bactérienne sera possible dans les espaces disponibles. Il est donc très important lors de notre traitement initial d'éliminer l'intégralité des tissus nécrosés intra-canaux pouvant servir de nutriments, et de réduire au maximum la charge bactérienne.

Ainsi, une infection endodontique est une infection poly microbienne issue du passage de bactéries vers l'endodonte. La survie de ces micro-organismes est possible par l'expression de facteurs de pathogénicité et par l'écologie des canaux. La flore endodontique présente des variations de compositions importantes. Elle n'est qu'une observation instantanée de la situation clinique au moment du prélèvement. Notre thérapeutique va donc être un contrôle de l'infection microbienne pour éviter une recontamination de l'endodonte.

1.2. Etapes du traitement canalair

1.2.1. Mise en forme canalair

La mise en forme canalair a pour but le parage complet des canaux afin d'éliminer l'intégralité de leur contenu (tissus infiltrés, composants organiques, débris tissulaires, bactéries, calcifications pulpaire, etc.), et de leur donner une forme qui permet le passage et le renouvellement des solutions d'irrigation ainsi que leur obturation par un matériau biologiquement inerte. C'est donc une étape cruciale puisqu'elle va à la fois optimiser la désinfection, par une meilleure pénétration des solutions d'irrigation, et à la fois faciliter l'obturation tridimensionnelle (Simon et Pertot 2008).

Elle comporte deux objectifs. Tout d'abord l'objectif biologique, qui consiste en l'élimination de tout le tissu pulpaire : aucun débris organique pouvant servir de substrat à la prolifération bactérienne ne doit subsister. L'élimination des irritants d'origine bactérienne doit être réalisé en évitant la propulsion des produits infectés dans la zone péri-apicale. Le second objectif est l'objectif mécanique : des règles de préparation canalaire veillant à préserver l'anatomie endodontique ont été décrites. Lors de la mise en forme il faut respecter :

- **Le principe de conicité** : le canal doit s'évaser régulièrement de l'orifice apical à l'orifice coronaire et venir se confondre avec les murs de la cavité d'accès. Ceci facilite le débridement canalaire par un meilleur contact de la partie active des instruments, favorise l'irrigation en guidant l'aiguille de la seringue qui peut aller plus profondément, simplifiant le renouvellement de la solution d'irrigation, et optimise l'hydraulique en facilitant la diffusion de cette solution dans les recoins canaux. Cette conicité est également l'élément clé pour une obturation dense et tridimensionnelle. Elle est obtenue par l'utilisation d'instruments de diamètre croissant à distance de plus en plus grande du foramen.
- **Le principe de calque** : les canaux doivent certes être mis en forme, mais l'élargissement doit se calquer sur la trajectoire originale du canal.
- **Le maintien de la position du foramen et de la courbure apicale** : le foramen ne doit pas être déplacé, déchiré ou perdu lors des différentes manœuvres instrumentales. Il faut par ailleurs respecter la courbure apicale en pré-courbant les instruments et en ayant une instrumentation apicale passive. Ceci permet d'éviter les transports internes (épaulement formé par l'accumulation de boue dentinaire) et les transports externes (travail au-delà du foramen).
- **Le maintien du diamètre du foramen le plus étroit possible** : c'est le foramen qui permet de maintenir la perméabilité apicale et qui confère au canal la résistance nécessaire pour y confiner sans risque de dépassement le matériau d'obturation. Il ne faut donc surtout pas l'élargir et il faut par ailleurs prévenir la formation d'un bouchon dentinaire (passage d'une lime de perméabilité, avec un diamètre inférieur à la constriction apicale, qui permet l'élimination des débris).

De nombreuses techniques de mise en forme permettent de respecter l'ensemble de ces objectifs (*step-back, step-down, double flaring, crown down*) ainsi qu'une multitude de séquences instrumentales. L'instrumentation doit être tridimensionnelle par rapport à l'endodonte, tout en respectant l'anatomie originale. Une des principales causes d'échec endodontique est liée à une mise en forme non adéquate, à cause de l'anatomie endodontique, qui est complexe. En effet, celle-ci est tri-dimensionnelle : ce ne sont pas des canaux cylindro-coniques réguliers, mais un réseau avec une multitude d'entrées et de sorties qui ont toutes la même importance en regard d'un échec potentiel. Il y a une chambre pulpaire au niveau coronaire, se prolongeant dans les racines par un ou des canaux principaux contenant la majeure partie du tissu conjonctif pulpaire, puis des canaux latéraux (au niveau des deux-tiers coronaires de la racine), des canaux secondaires (au niveau du tiers apical radiculaire) et enfin des canaux accessoires. Les ramifications sont nombreuses, notamment au niveau du tiers apical. La classification de Vertucci (Vertucci, 1984) a été mise en place afin de classer l'anatomie radiculaire. Le respect de celle-ci au cours des manœuvres instrumentales conditionne le succès du traitement entrepris. Il est donc primordial de connaître l'anatomie « type » de la dent (*longueur moyenne, nombre de canaux, racines surnuméraires*) avant d'entamer un traitement canalaire, tout en étant capable de s'adapter, puisque ce n'est pas une entité figée. Le remaniement est perpétuel au sein du parenchyme pulpaire notamment par l'apposition de dentine qui réduit le volume pulpaire au cours du temps (Martins et al. 2018).

Le débridement mécanique se fait à l'aide d'instruments endodontiques flexibles, (s'adaptant aux courbures canalaires) et ductiles (résistance aux contraintes). Une standardisation des instruments a été mise en place (*code couleur, échelle progressive de diamètre entre deux instruments consécutifs, corrélation entre diamètre et conicité, etc.*) et ils peuvent être manuels ou rotatifs. Les canaux doivent être mis en forme jusqu'à leur partie la plus étroite, appelée la constriction apicale. Une des premières étapes du traitement est de déterminer précisément une longueur de travail pour chaque canal, à l'aide d'une radiographie ou d'appareils électroniques. Il est admis que la longueur de travail est obtenue par la mesure du point de référence coronaire et la limite apicale, qui sera selon les écoles, l'apex radiographique ou 1-2mm en retrait de l'apex radiographique (école scandinave).

Au cours de la mise en forme, les différentes manœuvres instrumentales vont entraîner la formation d'une pellicule de boue dentinaire appelée smear layer. Comme le milieu est humide, les débris organiques et minéraux vont s'assembler en une couche de 1 à 5 µm le long des parois radiculaires. Il faut éliminer cette boue dentinaire pour réaliser un parage canalaire complet : pour éviter une percolation bactérienne future et pour avoir une meilleure étanchéité de l'obturation, en effet elle peut abriter un grand nombre de micro-organismes pathogènes (Torabinejad et al. 2002). La boue dentinaire n'existe que là où les instruments ont travaillé, son élimination est donc facile et reproductible à l'aide de solutions chélatantes.

Malgré cela et quel que soit le système de mise en forme utilisé, 40 à 50% des parois radiculaires (Paqué et al. 2009) ne sont pas concernées par l'action mécanique des instruments. Or, l'échec endodontique est souvent lié à la pathogénicité des toxines et bactéries présentes au sein des canaux latéraux, restés indemnes lors de l'instrumentation. La mise en forme seule est donc insuffisante pour obtenir une stérilisation complète du système endodontique. Cependant, elle permet de préparer le passage de la solution de désinfection, faciliter le nettoyage et permettre une obturation tridimensionnelle.

1.2.2. Désinfection canalaire

La désinfection et la mise en forme canalaire sont deux notions indissociables. En effet la mise en forme ne permet pas la désinfection des canaux, mais elle permet à la solution d'irrigation d'atteindre les zones profondes. C'est l'action chimique de celle-ci qui va nettoyer, et non pas l'instrumentation du canal. Le passage et le renouvellement de la solution de désinfection au cours de la mise en forme est appelé l'irrigation. Son action est double, à la fois physique et chimique :

- Élimination par rinçage des débris formés par les instruments (boue dentinaire) ;
- Lubrification des parois permettant une meilleure action de coupe des instruments ;
- Activité bactéricide au sein du système canalaire ;
- Action solvante sur les matières organiques, permettant l'élimination de tout substrat bactérien, même dans les recoins du système canalaire, non accessibles aux instruments.

Il n'y a pas de consensus sur l'irrigation mais elle peut être décomposée en trois étapes : l'exploration initiale, l'irrigation pendant la mise en forme et à la fin de la mise en forme. Au départ une solution d'hypochlorite de sodium est utilisée pour désinfecter et éliminer les débris pulpaire, puis un gel d'EDTA va permettre de lubrifier le canal et faciliter la progression des instruments. Ensuite, au cours du traitement, l'irrigation se fait par une injection passive de solution d'irrigation par une seringue, ceci sert à éliminer les débris formés par l'instrumentation. A mesure que la conicité du canal s'élabore, le renouvellement de la solution est facilité. Généralement il y a un rinçage à l'hypochlorite de sodium après chaque passage d'instrument. Lors de l'action de va et vient des instruments au sein du canal, la solution va pénétrer sur tout le trajet canalaire, jusqu'à la limite apicale : on parle alors d'irrigation active. Par ailleurs, comme le démontre Bronnec (Bronnec et al. 2010), l'utilisation d'une lime de perméabilité au-delà du foramen permet de d'améliorer le transport de la solution jusqu'à ce dernier et d'en assurer le nettoyage. L'irrigation passive à la seringue, seule, est insuffisante pour garantir une pénétration et un renouvellement complet de la solution au niveau du tiers apical. Enfin, une fois la mise en forme terminée, une séquence d'irrigation finale est indispensable pour éliminer les débris résiduels, dissoudre la boue dentinaire et de pouvoir désinfecter le système canalaire. Lors de cette

séquence il y a une alternance d'EDTA, d'hypochlorite et éventuellement de chlorhexidine en grand volume.

L'action chimique de la solution d'irrigation ne peut s'exercer que si elle entre en contact avec des débris ou bactéries. De ce fait, il est important d'avoir une cavité d'accès en forme de réservoir, qu'on va renouveler en permanence pour permettre aux instruments de faire pénétrer profondément la solution au sein des canaux. Le succès du traitement endodontique est directement lié à la capacité de l'opérateur à placer la dent dans un contexte biologique favorable, le plus stérile possible. Lors de l'irrigation, la substance active doit donc avoir un effet antibactérien maximal mais une faible toxicité tissulaire. Le traitement endodontique doit être réalisé dans le maintien continu de la chaîne d'asepsie-antisepsie : utilisation de masques, lunettes, gants, digue, instruments stériles, etc. En effet la persistance de micro-organismes après le processus de désinfection participe de façon non négligeable à l'échec du traitement canalaire.

L'apparition depuis les années 90 de l'instrumentation rotative a bouleversé les concepts classiques de l'irrigation : création massive de débris dentinaires, réduction de la séquence instrumentale et donc de l'irrigation active, mais aussi réduction du temps de mise en forme et donc du temps d'action de la solution. Le contrôle de la charge bactérienne est donc devenu un nouveau défi, il faut potentialiser l'action des solutions d'irrigation et ceci implique leur activation, permettant d'optimiser leur pouvoir solvant et désinfectant.

1.2.3. Obturation tridimensionnelle

L'obturation est l'ultime étape du traitement endodontique, la pérennité et le pronostic du traitement en dépendent directement. L'objectif est de sceller de façon étanche toutes les portes du système canalaire. En effet, l'anatomie endodontique complexe implique que certaines zones de l'endodonte restent en-dehors de l'action des instruments et des solutions désinfectantes, et peuvent être responsables du développement d'une lésion latéro-radulaire. De ce fait l'obturation doit remédier à cela en réalisant un étouffement mécanique des débris organiques et micro-organismes éventuellement présents, en remplissant le réseau canalaire dans ses moindres recoins. Les bactéries sont ainsi emmurées dans le matériau, ce qui évite leur développement et limite donc leur pathogénicité.

Une obturation réussie est une obturation dense et étanche. Il existe de nombreuses techniques d'obturation, elles incluent toutes l'utilisation d'un ciment. Celui-ci sert de joint entre le matériau d'obturation et les parois canalaires. Il doit être le plus fin possible car il se délite avec le temps, rendant l'obturation propice à une percolation bactérienne. De nouveaux ciments à base de silicate de calcium arrivent progressivement sur le marché. Ceux-ci pourraient interagir avec la dentine en cas de contamination avec un fluide, entraînant une minéralisation de la zone d'infiltration, arrêtant ainsi la prolifération bactérienne (Sarkar et al. 2005). Cette propriété bioactive remet en cause les principes traditionnels d'obturation, de nombreuses études sont donc encore menées (Kim et al. 2017). La gutta-percha reste pour l'instant le matériau d'obturation de choix : bien tolérée biologiquement, elle est malléable à chaud et n'est pas résorbable. Les techniques d'obturation pour lesquelles le ciment est en majorité présent sont à proscrire. Par ailleurs, une obturation avec une surextension (dépassement de matériau au-delà de la limite de travail) ou une sous-obturation (obturation peu dense) peuvent aboutir à un échec à plus ou moins long terme (Pirani et al. 2015). La pérennité du traitement est assurée par l'étanchéité de l'obturation tant au niveau apical qu'au niveau coronaire.

C'est la préparation canalaire qui permet de réaliser une obturation tridimensionnelle du canal. Malgré le respect des protocoles de mise en forme, désinfection et d'obturation, la stérilisation complète du système endodontique est impossible. Il a donc fallu trouver des méthodes pour potentialiser la désinfection endodontique.

2. L'irrigation : potentialisation de la désinfection par l'activation

La pathologie endodontique étant infectieuse, son traitement repose sur l'éradication de bactéries. L'utilisation de solutions antiseptiques lors de l'irrigation, permet la désinfection du système canalaire, même dans les zones non instrumentées lors de la mise en forme. Cependant, la flore endodontique organisée en biofilm, est résistante. Des études ont donc été menées pour tenter de mettre en évidence la solution la plus efficace, le meilleur outil pour l'activer, afin d'aboutir à la désintégration la plus complète de ce biofilm.

Nous décrirons dans un premier temps les principales solutions d'irrigation, puis dans un second temps, les moyens d'activation de ces solutions qui permettent notamment d'atteindre le tiers apical, zone difficile d'accès et rassemblant les possibles pathogènes. Malgré l'absence de consensus (*concentration, temps d'utilisation minimum, quantité*) nous présenterons plusieurs protocoles actuels, et envisagerons de nouvelles stratégies pour faire face au biofilm endodontique et à sa résistance aux antibactériens communément utilisés.

2.1. Les solutions d'irrigation

Les solutions d'irrigation peuvent être de deux types :

- **Solutions de désinfection:** doivent permettre de désagréger le biofilm (Clegg et al. 2006) et de tuer les bactéries. Elles peuvent être de plusieurs types avec une efficacité variable selon le milieu (pH, présence d'éléments dentinaires, de débris organiques ou liquides inflammatoires).
- **Solutions chélatrices :** permettent une déminéralisation de la dentine et donc l'élimination de la boue dentinaire, ainsi qu'une simplification de la mise en forme, elles ont parfois une activité antibactérienne.

Elles doivent avoir une action physique (mise en suspension des bactéries et débris), mécanique (action lubrifiante facilitant le passage des instruments), biologique (large spectre antibactérien) et surtout être biocompatibles (élimination aisée, non-agressive pour les tissus péri-apicaux). Il est impératif d'avoir une utilisation concomitante de ces deux types de solutions lors du traitement. En effet les micro-organismes colonisent non seulement les recoins canaux mais surtout les tubulis dentinaires (Torabinejad et al.

2002). Ainsi, les solutions chélatrices vont entraîner la dissolution des tissus minéralisés, notamment au niveau des tubulis, permettant aux solutions d'irrigation d'atteindre la flore bactérienne s'y étant installée. L'action combinée d'une solution désinfectante permet d'éliminer la phase organique et donc d'éradiquer les bactéries.

2.1.1. L'hypochlorite de sodium (NaOCl)

L'hypochlorite de sodium (NaOCl) est aujourd'hui reconnu comme la solution antibactérienne de choix en endodontie : elle permet la désinfection et la dissolution des tissus organiques (Bryce et al. 2009). Elle possède un large spectre antibactérien avec une efficacité sur les spores, les bactéries, les levures et les virus. Cette action est due à sa capacité d'oxydation et d'hydrolyse des protéines cellulaires. En effet, en milieu aqueux, la solution se dissocie, libérant la substance active : l'acide hypochloreux. Cet acide, en présence de matières organiques va libérer du chlore qui, combiné au groupe de protéines aminées des bactéries, forme des chloramines qui perturbent le métabolisme cellulaire. Elle va agir comme un solvant des graisses et des matières organiques en dégradant les acides gras, qui sont transformés en sels d'acides gras et en glycérol. Par ailleurs, le chlore provoque une oxydation irréversible des groupements sulfhydryle (SH) et inhibe les principales enzymes bactériennes (Mohammadi, 2008). Son action antibactérienne est immédiate mais non rémanente.

En présence de débris organiques et d'une charge bactérienne importante l'acide hypochloreux est rapidement consommé, rendant la solution inactive. Elle doit donc être constamment renouvelée pour ne pas se tarir. Pour une irrigation efficace, il est conseillé d'irriguer chaque canal avec un minimum d'un millilitre après chaque passage d'instrument. Par ailleurs un des paramètres importants est sa concentration : idéalement elle doit être comprise entre 1% et 5 %, en-dessous elle perd son pouvoir solvant et au-delà elle est trop toxique en cas de contact avec les tissus péri-apicaux. Plus sa concentration est forte moins le temps d'action doit être long mais plus elle peut avoir des effets iatrogènes. Siqueira et al. (Siqueira et al. 2000) recommandent l'utilisation d'une solution à 2,5% puisque aucune amélioration significative dans la désinfection canalaire n'a été observée au-delà, l'importance étant d'utiliser un grand volume de solution, qui permet de compenser la faible concentration utilisée.

L'efficacité de l'hypochlorite de sodium peut être diminuée si le temps d'action et la concentration de la solution sont insuffisants (Zou et al. 2010), ou si le pH est trop basique (présence d'un exsudat inflammatoire, charge bactérienne très importante). Au contraire, chauffer l'hypochlorite permet de potentialiser son efficacité : augmentation de la capacité de dissolution et rapidité d'élimination des micro-organismes. Avec la hausse de la température, la viscosité et la tension de surface sont diminuées : les molécules sont « excitées », les liaisons intermoléculaires sont plus faibles et les réactions se font plus facilement. A concentration égale, une solution d'hypochlorite de sodium a une plus grande action antibactérienne à 45°C qu'à 20°C (Zehnder, 2006). L'ajout d'un surfactant (Tween®, NH4+®) permet également d'augmenter son efficacité par augmentation de la mouillabilité et donc favoriser le contact avec les structures dentinaires à désinfecter (Giardino et al. 2016).

L'hypochlorite est une solution de choix puisqu'elle est rapide, efficace et peu cher. Cependant elle a de nombreux défauts qui ont conduit à la recherche d'autres solutions d'irrigation : haute tension de surface qui limite sa pénétration dans le réseau canalaire, elle n'a pas une action antibactérienne rémanente et elle ne permet pas l'élimination de la boue dentinaire (active uniquement sur la composante organique et non minérale), elle entraîne simplement la mise en suspension des débris. D'autre part, elle a une grande toxicité, il faut donc veiller à ce qu'elle reste confinée dans l'endodonte. En cas de contact avec les tissus mous ou le péri-apex (apex déchiré ou large), elle peut conduire à des réactions inflammatoires importantes et des réactions allergiques.

Ainsi la température, le volume utilisé, et la concentration sont des paramètres importants qui modulent l'efficacité antibactérienne de l'hypochlorite de sodium. Le respect du protocole d'irrigation est indispensable pour une efficacité maximale : renouvellement de la solution à chaque passage d'instrument et agitation mécanique pour qu'elle arrive en contact des tissus.

2.1.2. Acide Ethylène diamino tetra-acetic (EDTA)

L'EDTA est une solution chélatante qui permet de dissoudre la boue dentinaire : phase minérale compactée sur les parois canalaire, composée à la fois de copaux dentinaires et de bactéries engluées. Son action est limitée aux tissus minéraux. Elle est généralement utilisée à 17% et elle ne possède pas d'activité antibactérienne (Dunavant et al. 2006). Son action est optimale à un pH compris entre 6 et 10. Elle peut être utilisée sous forme de gel, lors de l'exploration initiale afin de déminéraliser la dentine de façon superficielle, de lubrifier les instruments endodontiques et ainsi faciliter leur passage. Elle peut également être utilisée lors de la phase de rinçage final, à la fin de la mise en forme, pour faciliter la suppression de la boue dentinaire par dissolution de la phase minérale, et permettre ainsi de libérer la phase organique qui sera éliminée dans un second rinçage par l'hypochlorite de sodium. Cette alternance entre EDTA et hypochlorite doit être limitée au rinçage final et surtout être évitée au moment de la mise en forme: le chlore libre de l'hypochlorite est éliminé lui faisant perdre son action solvante et antibactérienne (Grawehr et al. 2003) et un précipité chimique peut se former.

Ainsi l'EDTA va entraîner une érosion au niveau des orifices des canalicules dentinaires. Ceci va permettre d'augmenter la qualité du scellement par l'élimination de la boue dentinaire et donc, faciliter la pénétration du ciment dans les tubulis. Il faut cependant éviter une utilisation prolongée (plus d'une minute) qui conduit à une déminéralisation trop importante de la dentine.

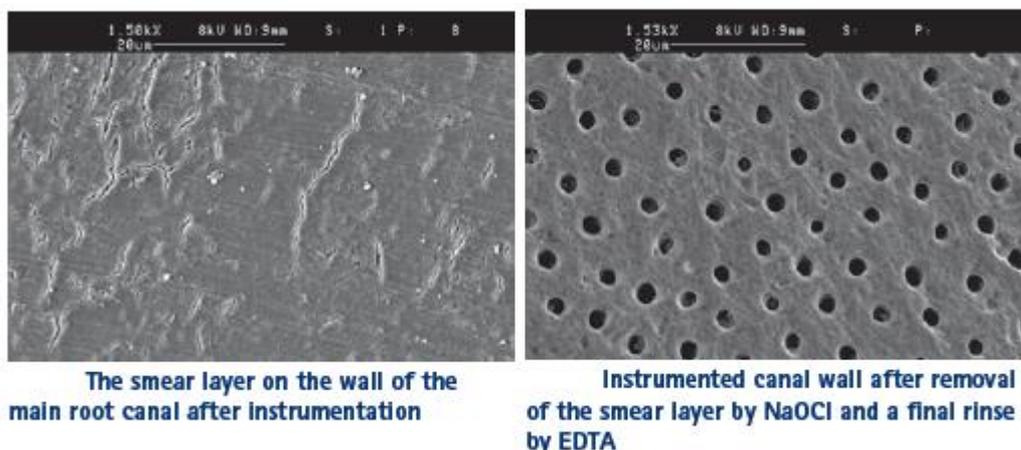


Illustration 1: Irrigation in endodontics (Haapasalo et al. 2014)

2.1.3. MTAD

Le MTAD a été mis sur le marché sous le nom de BioPureMTAD dans le but de n'utiliser plus qu'une seule solution d'irrigation, puisqu'il possède à la fois des propriétés antibactériennes et chélatrices. Il est composé d'un mélange de tétracyclines, d'acide citrique et d'un détergent. Son activité antibactérienne est importante (action sur *E. faecalis* mais inefficace sur *Candida*) et rémanente. Son action chélatrice permet l'élimination de la boue dentinaire sans effet érosif sur la dentine (Torabinejad et al. 2003), contrairement à l'EDTA. Par ailleurs il augmente la mouillabilité du canal pour le ciment de scellement. Son utilisation est interdite en Europe puisqu'il contient des tétracyclines pouvant avoir un effet mutagène et cancérigène. Par ailleurs les objectifs fixés lors de sa mise en œuvre n'ont pas été atteints, et il ne peut suffire seul (Singla et al. 2011). De ce fait, son utilisation doit être combinée à celle de l'hypochlorite de sodium, et en conséquence il ne répond plus à son intérêt initial.

2.1.4. Digluconate de chlorhexidine

La chlorhexidine est un antiseptique à large spectre (Gram + et Gram -), avec une action antifongique et une action sur *E. Faecalis*. Elle va agir sur les membranes bactériennes en les rendant plus perméables, et va ainsi provoquer leur lyse (Gomes et al. 2001) Elle est généralement utilisée à 2%, lors de l'étape du rinçage final, pour ses propriétés bactéricides rémanentes. Celles-ci diminuent fortement selon le pH du milieu, la présence des constituants de la dentine (hydroxyapatite et collagène), ainsi que de débris organiques ou de liquides inflammatoires. Sa formulation en gel est plus efficace que liquide (Vianna et al. 2004). Proposée comme alternative biocompatible à l'hypochlorite de sodium du fait de l'équivalence de son activité bactéricide (Rôças et Siqueira 2011), elle n'a pu le remplacer puisqu'elle est incapable de désorganiser un biofilm et est dépourvue d'action solvante et ne permet donc pas l'élimination des débris pulpaire nécrosés. Son utilisation doit donc être combinée à une irrigation par hypochlorite. Or cette alternance entraîne la formation d'un précipité intra canalaire de parachloroaniline (PCA), il faut donc être vigilant et rincer à l'alcool après chaque modification de solution pour éviter sa formation. En effet comme le montre l'étude de Basrani (Basrani et al. 2007) la formation de ce précipité peut altérer la qualité du scellement de l'obturation.

2.1.5. Autres

D'autres solutions ont été proposées sans avoir d'activité bactéricide comparable à l'hypochlorite de sodium et ne sont plus utilisées de nos jours :

- Le **peroxyde d'hydrogène H₂O₂** (eau oxygénée) élimine les débris tissulaires et les copeaux dentinaires du canal ;
- **Acide citrique** : solution chélatante utilisée à 10% pour substituer l'EDTA ;
- **Sérum physiologique** : Le seul fait d'adjoindre une irrigation canalaire avec du sérum physiologique lors de la mise en forme instrumentale permet de réduire la quantité de débris macroscopiques et donc, d'améliorer la propreté superficielle des parois instrumentées et de réduire mécaniquement la quantité de micro-organismes intracanaire (Siqueira et al. 1999). Le volume de solution utilisé est un paramètre fondamental pour l'action de lavage. Il est cependant nécessaire d'y adjoindre une solution antibactérienne puisqu'il n'a ni la capacité de dissoudre les tissus ni de propriétés antibactériennes. Il peut par ailleurs être utilisé entre deux solutions d'irrigation afin de prévenir les réactions chimiques entre les solutions ;
- **Composés iodés** : seul l'iode dans l'iodure de potassium a une action antibactérienne efficace, mais elle colore la dentine et a un fort risque allergique ;
- **Eau ozonée** ;
- **QMix** : solution proposée pour associer les deux phases d'irrigation (désinfection et élimination de la boue dentinaire), encore en phase d'étude.

Aucune solution ne permet de répondre à l'ensemble des objectifs de l'irrigation. L'hypochlorite de sodium est reconnu comme la solution antibactérienne de choix due à son large spectre antibactérien et à sa capacité de dissolution. Malgré l'absence de consensus, un protocole d'irrigation peut malgré tout être proposé (Machtou, 2012) : exploration initiale du canal avec une solution chélatrice lubrifiante pour un canal étroit puis, utilisation continue de l'hypochlorite de sodium (concentration de 2,5 à 6 %) au cours de la mise en forme, les canaux doivent toujours en être remplis sans alternance avec une solution chélatante. Puis, une fois la mise en forme terminée, rinçage avec de l'EDTA 17% pour éliminer la boue dentinaire. Si l'obturation se fait dans la même séance que la mise en forme il faut y adjoindre un rinçage final soit à l'hypochlorite, soit à la chlorhexidine. Au contraire,

si l'obturation se fait au cours d'une autre séance, il faudra appliquer une médication intracanalairé pour poursuivre la désinfection canalairé.

L'efficacité des solutions d'irrigation dépend non seulement de leur activité cytotoxique mais également de leur capacité à atteindre les zones contaminées du système canalairé et de leur temps d'application. Malgré l'amélioration des techniques de mise en forme et l'approfondissement des connaissances, le taux de succès des thérapeutiques endodontiques n'est pas meilleur au fil des années. C'est généralement la persistance du biofilm dans le tiers apical qui semblerait entraîner l'échec endodontique. Ceci est notamment dû au temps de contact insuffisant de la solution avec les parois canalaires, l'empêchant d'exercer la totalité de son action antibactérienne.

2.2. L'activation

Peu importe la technique d'irrigation et de mise en forme, le tiers apical représente la limite d'efficacité des solutions d'irrigation (Gambarini et Laszkiewicz 2002; Zehnder 2006; Haapasalo et al. 2014). L'ensemble des études montrent que malgré le traitement chimio-mécanique, des bactéries y sont encore présentes une fois le traitement terminé. Il a donc fallu mettre en place des protocoles pour améliorer la désinfection.

La mise en forme canalaire facilite le passage des solutions, leur permettant d'atteindre les zones non travaillées. L'irrigation se fait traditionnellement à l'aide d'une seringue avec une aiguille de petit diamètre, à insérer dans le canal de manière passive ou active (petits mouvements de va et vient). Afin de limiter les risques d'extrusion, l'aiguille ne doit jamais être bloquée et la solution doit être apportée lentement. Même si cette technique permet de contrôler le volume et le débit utilisé, plusieurs problèmes sont rencontrés. Tout d'abord, l'aiguille doit être idéalement introduite à 2-3mm de la longueur de travail pour que la solution ait une chance d'atteindre cette zone. L'instillation entraîne un effet hydrodynamique avec un espace de reflux situé entre l'aiguille et les parois canalaire, autorisant un échange progressif de la solution mais, qui est limité à 2mm du bout de l'aiguille (Boutsioukis et al. 2010). Plus il est à distance de la longueur de travail, moins la solution peut être renouvelée au tiers apical. Or, dans la plupart des cas, soit la seringue reste bloquée au niveau du tiers coronaire ou médian, surtout dans les canaux courbes et étroits, soit l'aiguille est trop proche du foramen entraînant un risque d'extrusion important. La désinfection des tubulis est donc, au mieux, efficace dans les deux tiers coronaires. Ensuite, du fait du faible diamètre canalaire, lors de l'éjection de la solution par pression positive, l'air contenu dans le canal n'a pas le temps d'être éliminé. Le canal peut alors être assimilé à un tunnel fermé. Il se forme donc un embole gazeux au niveau apical qui empêche la désinfection. C'est ce qu'on appelle le « lock effect » (Tay et al. 2010). L'irrigation à la seringue ne permet donc pas le contact des solutions avec les parois dentaires au niveau du tiers apical à cause de la formation de bulles d'air. En résumé, comme le montre l'étude de Gu (Gu et al. 2009), la qualité de la désinfection par seringue d'irrigation est influencée par plusieurs éléments : la proximité de l'extrémité de l'aiguille par rapport à l'apex, le volume de solution utilisé, et le diamètre de l'aiguille (plus il est petit, mieux c'est)

Si les propriétés chimiques et antibactériennes des solutions d'irrigation sont un facteur déterminant dans la réussite du traitement endodontique, d'autres éléments, dont la technique d'irrigation, peuvent réellement modifier le pronostic de celui-ci. Pour que l'irrigation soit efficace, il est nécessaire d'avoir un contact direct de la solution avec les zones à décontaminer ainsi qu'un renouvellement constant, afin d'assurer un flux et une activité chimique permanente. Des dispositifs d'activation ont été proposés pour pallier les difficultés d'une simple irrigation à la seringue. Certains vont faciliter la propagation des solutions d'irrigation dans les derniers millimètres apicaux, ainsi que leur acheminement dans les isthmes et ramifications non mis en forme mécaniquement, d'autres, permettent un renouvellement permanent de ces solutions. Ceci est très important notamment pour l'hypochlorite de sodium dont la chlorure, responsable de l'activité antibactérienne, est instable et rapidement consommée par la dissolution des tissus (Stojicic et al. 2010). Enfin certains systèmes permettent d'optimiser le pouvoir solvant et désinfectant des solutions par un phénomène d'agitation. Ils ne doivent pas avoir d'action mécanique sur les parois canalaires afin de ne pas générer de nouveaux débris. L'efficacité des moyens d'activation est évaluée en observant l'élimination des débris, de la boue dentinaire et la diminution de la charge bactérienne.

Il existe donc des systèmes d'activation, qui potentialisent l'efficacité de la solution d'irrigation, mais également des dispositifs qui permettent uniquement d'améliorer l'acheminement de la solution d'irrigation, d'avoir une distribution homogène, plus prévisible et sécurisée tout en optimisant le pouvoir nettoyant dans les zones difficiles d'accès.

2.2.1. Les dispositifs d'irrigation

De nouveaux moyens pour amener les solutions d'irrigation dans le canal ont été proposés. Leur objectif est un apport permanent de solution fraîche, une amélioration du débit et donc de la propagation jusqu'au tiers apical afin qu'elles soient en contact avec les surfaces à désinfecter. Les dispositifs d'irrigation vont jouer sur les paramètres qui influencent la distribution des solutions : le diamètre de l'aiguille, la position de son ouverture, la profondeur d'insertion ou encore la pression d'éjection. Différents systèmes ont été proposés :

- **EndoVac** : C'est un système à pression apicale négative, la solution est amenée par une seringue au niveau coronaire dans la cavité d'accès puis est aspirée par une micro-canule allant jusqu'à la longueur de travail. De cette manière, les flux d'irrigation sont inversés, il se forme un circuit hydraulique qui favorise le passage de la solution au niveau du tiers apical. Il doit être utilisé une fois la mise en forme terminée. Son efficacité a été démontrée, l'Endovac permet un bon nettoyage dans les derniers millimètres apicaux, un meilleur débridement canalaire par rapport à l'utilisation seule de la seringue (Nielsen et Craig Baumgartner 2007), quand il est utilisé en concomitance avec l'hypochlorite de sodium. Desai (Desai et Himel 2009) a par ailleurs démontré que ce système est sécurisé, il diminue le risque d'extrusion apicale et permet de réduire les sensibilités post-opératoires. Cependant son utilisation est fastidieuse, chère et nécessite une aide opératoire. Miller et Baumgarten (*Miller et Baumgartner 2010*) ont montré qu'il ne permet pas une réduction de la charge bactérienne comparée à une irrigation traditionnelle à la seringue.
- **Safety Irrigator™** : Seringue avec une aspiration, la seringue délivre la solution et aspire en même temps, permettant un renouvellement permanent.
- **RinsEndo™** : avec ce dispositif, la solution est délivrée à l'aide d'une seringue branchée sur une pièce à main, sous forme de flux et reflux grâce à la production d'impulsions à la fréquence de 1,6 Hz. Dans la première phase la solution est aspirée puis il y a une impulsion qui amène de la solution fraîche, et ce, cent fois par minute. Sa pertinence n'a pas été clairement établie, malgré une meilleure pénétration de la

solution d'irrigation dans la dentine. Présente un grand risque d'extrusion (Hauser et al. 2007).

- **Le Safe-Adjusting-File™** : C'est une lime unique en nickel/titane avec laquelle la mise en forme canalaire et l'irrigation sont simultanées. Son maillage est souple, capable de s'adapter à l'anatomie canalaire, et est animée d'une oscillation longitudinale (Metzger et al. 2010). Son utilisation n'est possible qu'une fois que le canal a été mis en forme jusqu'à la lime K20. Il avait été créé pour améliorer l'élimination des débris et nettoyer les parois canalaire, mais ce dispositif est borgne et ne permet pas la circulation de la solution dans les derniers millimètres apicaux. Par ailleurs son utilisation est difficile dans les canaux courbes.

L'ensemble de ces moyens d'irrigation nécessitent un investissement financier et un temps d'apprentissage pour leur manipulation. Les plus efficaces permettent d'améliorer le nettoyage grâce au renouvellement de la solution d'irrigation mais aucun n'améliore la désinfection de manière significative. Plus d'études sont nécessaires pour évaluer s'ils ont une réelle efficacité antibactérienne.

2.2.2. Les techniques d'activation

Les techniques d'activation vont avoir pour objectif d'augmenter l'efficacité des solutions d'irrigation par l'agitation de celles-ci. Ceci permet à la fois une meilleure diffusion dans le système canalaire et une potentialisation de l'action antibactérienne. L'activation intervient après la mise en forme, au moment du rinçage final, et implique aussi bien l'EDTA que l'hypochlorite de sodium. Il existe des moyens d'activation manuelle et mécanisée.

2.2.2.1. Activation mécanique manuelle

L'activation manuelle est la technique la plus simple. Une fois la mise en forme terminée, un cône de gutta percha est ajusté à la longueur de travail puis, est agité avec des mouvements verticaux de faible amplitude, dans le canal rempli de solution d'irrigation. Le pompage entraîne une surpression, favorisant le mélange de la solution d'irrigation par son déplacement aussi bien corono-apical que latéral. Ceci induit une meilleure répartition de la solution au niveau des zones non instrumentées ainsi que son renouvellement : la solution fraîche est apportée apicalement alors que la solution consommée remonte coronairement.

Caron et al (Caron et al. 2010) ont démontré que cette technique d'activation favorise l'élimination des débris, même dans les canaux courbes. La propreté (élimination des débris et de la boue dentinaire) obtenue après activation avec un cône de gutta percha est significativement supérieure à celle d'une irrigation conventionnelle à la seringue. Par ailleurs les mouvements de va et vient entraînent des turbulences hydrodynamiques, augmentant les réactions chimiques et la désorganisation du biofilm par la mise en suspension des amas bactériens.

Ainsi, l'utilisation d'un cône de gutta percha est un moyen simple et peu onéreux d'améliorer la pénétration de la solution d'irrigation au sein du système canalaire ; à la fois par son renouvellement et surtout par la création d'un flux plus important au niveau apical. Elle nécessite cependant du temps, et surtout un ajustage précis du maître cône, ce qui peut être difficile dans les canaux distaux des molaires. Ajouté à cela, pour être réellement efficace il faut animer le cône de gutta de plus de cent va et vient par trente seconde, ce qui est difficile à réaliser en pratique. Enfin, ce n'est qu'un faible volume de solution d'irrigation qui atteint le tiers apical, il faut donc la renouveler fréquemment afin qu'elle soit toujours active.

2.2.2.2. Activation ultrasonore

L'activation ultrasonore consiste en l'agitation de la solution d'irrigation par l'utilisation d'une lime ou d'un insert spécifique (Irrisafe®, Endosoft®) monté sur pièce à main dans laquelle une énergie ultrasonore est transmise. La production d'ultrasons va entraîner une vibration longitudinale de la lime et la formation de turbulences acoustiques, générant des mouvements liquidiens. La fréquence utilisée est comprise entre 25 et 30 kHz. Plus l'insert est de petit diamètre par rapport au canal, plus l'amplitude de son mouvement sera grand, et donc plus puissantes seront les turbulences. C'est une irrigation ultrasonore passive (PUI) afin d'éviter les phénomènes de stripping et les irrégularités de mise en forme. Deux techniques de PUI d'efficacité comparable existent (van der Sluis et al. 2006) :

- **Irrigation continue** : utilisation d'une seringue adaptée à une pièce à main ultrasonique qui délivre la solution tout en provoquant des vibrations ultrasonores, l'apport de la solution se fait tout au long de l'activation (*PiezoFlow*, *ProUltra*).

- **Irrigation intermittente** : re-remplissage de la cavité d'accès à la seringue de façon manuelle après chaque séquence d'activation, permet de contrôler précisément la quantité de solution utilisée et la profondeur de pénétration de l'insert. Système qui est le plus souvent utilisé mais qui nécessite plusieurs cycles d'activation.

Quelle que soit la méthode utilisée, lorsque l'insert entre en vibration cela provoque une cavitation gazeuse avec la formation de bulles (van der Sluis et al. 2007). Ces bulles vont venir s'éclater contre les parois canalaire et le vide formé sera comblé par une nouvelle arrivée de solution. Ce processus entraîne de grandes variations de pression qui conduisent à un effet de nettoyage et de lyse cellulaire. Le biofilm est désagrégé, les bactéries revenues à l'état planctonique sont plus facilement éliminées par l'hypochlorite. De plus, cette agitation entraîne une élévation de la température de la solution, ce qui augmente son pouvoir désinfectant. L'activation ultrasonore permet donc une réduction de la charge bactérienne supérieure à celle obtenue avec une irrigation conventionnelle à la seringue. Par ailleurs, Jiang (Jiang et al. 2012), montre que les ultrasons favorisent l'élimination des débris. Sabins (Sabins et al. 2003) en arrive à la conclusion que la PUI est plus efficace qu'une irrigation conventionnelle à la seringue, dans l'élimination des débris pulpaire, de la boue dentinaire et des bactéries, lorsque son utilisation est combinée au rinçage avec de l'hypochlorite 3% et de l'EDTA.

Cette technique d'activation a tout de même ses limites : en cas de contact de l'insert avec les parois canalaire, l'énergie ultrasonore est dissipée et il n'y a plus ou peu de turbulences acoustiques, selon la surface de la zone de contact entre l'insert et les parois canalaire. Son utilisation est donc totalement inefficace dans les canaux courbes.

2.2.2.3. Activation sonore

Tout comme l'activation ultrasonore, l'activation sonore repose sur la transmission d'ondes, issues de la vibration d'un insert plastique au sein de la solution d'irrigation, relié à une pièce à main. La fréquence utilisée est moindre, de 1 à 6 kHz, mais l'amplitude des oscillations est plus importante. Ces oscillations sont à la fois latérales et longitudinales. Cette double composante permet de créer des turbulences hydrodynamiques qui éliminent la boue dentinaire et désagrègent le biofilm. L'embout doit être utilisé une fois la mise en forme terminée, à un millimètre de la longueur de travail, avec un court mouvement de va et vient vertical, après l'instillation de la solution d'irrigation. Il peut être de différents diamètres, est flexible, lisse, solide et non travaillant. Le système le plus répandu est l'EndoActivator®.

Ce dispositif permet une meilleure élimination des débris par rapport à l'utilisation d'une seringue conventionnelle ainsi qu'une plus grande activité bactéricide (Pasqualini et al. 2010) Il permet l'élimination des débris dans les canaux latéraux, l'élimination de la boue dentinaire et le désagrègement du biofilm même dans les canaux courbes (Neuhaus et al. 2016). Par ailleurs, en cas de contrainte sur l'insert l'oscillation latérale disparaît mais il reste une oscillation longitudinale. Ce mode d'agitation est particulièrement efficace pour le débridement canalaire, car il n'est pas affecté par les contraintes et permet des mouvements de grande amplitude. Enfin il permet la circulation de la solution d'irrigation jusqu'à la longueur de travail avec un faible risque d'extrusion.

Son action reste cependant moins efficace que celle de l'activation ultrasonore (Sabins et al. 2003) et les embouts utilisés ne sont pas radio-opaques, et malgré leur résistance, en cas de fracture dans le canal, leur élimination est compliquée.

2.2.3. Limites de la désinfection

Les données de la littérature ne permettent pas de hiérarchiser les différentes techniques d'activation (*activation manuelle, ultrasonore et sonore*), chaque technique améliore le nettoyage par rapport à une irrigation conventionnelle à la seringue. En revanche, pour le moment, seul l'EndoActivator a montré un réel intérêt en tant que dispositif d'irrigation.

Un tableau de leurs avantages et inconvénients a pu être établi :

	Points forts	Points faibles
EndoVac	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution du risque d'extrusion. - Meilleure élimination des débris et de la boue dentinaire dans le tiers apical. - Permet à la solution d'irrigation d'aller jusqu'à la longueur de travail en évitant la formation de bulles d'air 	<ul style="list-style-type: none"> - N'améliore pas l'élimination des bactéries - Complexité de mise en œuvre, nécessite une assistante
Activation manuelle	<ul style="list-style-type: none"> - Simple, peu cher - Désorganisation du biofilm - Meilleure répartition de la solution dans le tiers apical - Élimination des débris dans les canaux courbes 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficulté d'adaptation du maître cône dans les canaux distaux des molaires - Fréquence des va et vient qui doit être importante pour être efficace
PUI	Meilleure élimination bactérienne, des débris et de la boue dentinaire	Inefficace dans les canaux courbes
Activation sonore	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure élimination des bactéries - Efficacité dans les canaux courbes - Diminution du risque d'extrusion 	Moins bonne élimination des débris et de la boue dentinaire qu'avec PUI

Illustration 2: Tableau récapitulatif des systèmes d'activation

L'activation des solutions lors du rinçage final est maintenant une étape incontournable du traitement canalaire. Cela permet d'optimiser le nettoyage (Jiang et al. 2012) et la désinfection. Les nouvelles technologies ont amené de nouveaux moyens d'agitation et d'activation, mais aucune étude à ce jour ne permet de montrer que ces nouveaux équipements améliorent le pronostic du traitement au long terme, et donc ne permet de montrer leur utilité. Malgré l'efficacité de plusieurs dispositifs, l'équilibre entre sécurité et efficacité est souvent fragile. De plus, il faut également tenir compte de leur praticité, leur facilité d'utilisation et du ressenti des chirurgiens-dentistes.

Enfin, la clé de voûte de la réussite du traitement canalaire repose sur l'éradication des bactéries. Celles-ci sont organisées en biofilm, avec une pluralité phénotypique et donc une résistance accrue. Or, l'irrigation commence seulement à devenir efficace à la fin de la mise en forme canalaire, lorsque l'échange de solution est possible au niveau du tiers apical. Cependant les volumes échangés sont très faibles. Même si les dispositifs d'irrigation améliorent le passage des solutions, leur temps de contact avec cette zone est trop faible pour être efficace. Il faudrait donc combiner pénétration, diffusion et renouvellement du volume de solution au niveau apical. Le Laser peut être un moyen d'améliorer ces différents paramètres.

3. Apports du laser dans la désinfection canalaire

3.1. Généralités

3.1.1. Principes généraux du fonctionnement du laser

Le mot laser est un acronyme de l'anglais pour Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, c'est un dispositif qui permet l'amplification d'une lumière par émission stimulée des rayonnements électromagnétiques. Ceux-ci sont spatialement et temporellement cohérents, avec une longueur d'onde unique : le rayon produit est donc monochrome. Son fonctionnement repose sur deux grands principes de l'interaction de la lumière avec les atomes : le processus d'émission spontanée de l'énergie photonique et le processus d'émission stimulée. Bohr (1913) est à l'origine du premier : un atome est à son état fondamental stable, il peut passer à un état excité instable s'il absorbe un photon de la bonne longueur d'onde, puis, va spontanément revenir à son état stable en émettant la quantité d'énergie absorbée initialement, sous forme de photon. Einstein (1917), quant à lui, démontre que si un atome déjà excité par une première absorption d'énergie, reçoit un photon supplémentaire de la même longueur d'onde, il se désexcite et restitue simultanément toute l'énergie absorbée en retournant à son état d'énergie stable initial. L'atome émet donc deux photons de la même longueur d'onde, dans la même direction et avec la même phase que le premier. Envoyer un photon de la bonne longueur d'onde à un atome déjà excité permet donc de dupliquer ce photon, c'est le principe de l'amplification par émission stimulée : **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**.

Un laser a trois principaux constituants : un milieu amplificateur aussi dit actif (solide, liquide, gaz, semi-conducteur), une source d'énergie (électricité, flash lumineux) et une cavité optique. La source d'énergie va permettre d'exciter les atomes du milieu actif. Celui-ci est constitué de substances pures afin que les atomes en présence soient identiques ou similaires. Une fois excités les atomes libèrent leur énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, aussi dits photons. Ils doivent être continuellement maintenus dans un état d'énergie excité, même après émission du rayonnement, sinon le phénomène d'absorption des rayons prendra le dessus sur l'émission stimulée. Il faut donc avoir toujours plus d'atomes excités que d'atomes stables. Or, un atome se trouve naturellement dans son

état de basse énergie, c'est donc la source d'énergie, par pompage, qui va imposer à l'atome d'être hors de son état d'équilibre. Le résonateur optique va ensuite amplifier le faisceau lumineux produit par l'émission de photons. Il est généralement constitué de deux miroirs parallèles en vis-à-vis entre lesquels se trouve le milieu actif : l'un totalement réfléchissant et l'autre partiellement réfléchissant, au travers duquel le rayon est émis. La lumière réfléchié successivement par les deux miroirs fait des allers-retours dans la cavité, avec un nombre croissant de photons. On va donc avoir un milieu amplificateur dans lequel les atomes sont dans un état excité, dès que l'un d'eux émet un photon par émission spontanée, ça entraîne une cascade d'émissions stimulées formant le faisceau du laser. On peut augmenter la puissance du rayon si on place un obturateur au niveau de la sortie : lorsque c'est fermé les photons s'accumulent comme dans un réservoir, et lorsque c'est ouvert plus de photons seront libérés, l'impact sera plus donc plus fort. Un laser pulsé libère donc plus d'énergie qu'un faisceau continu.

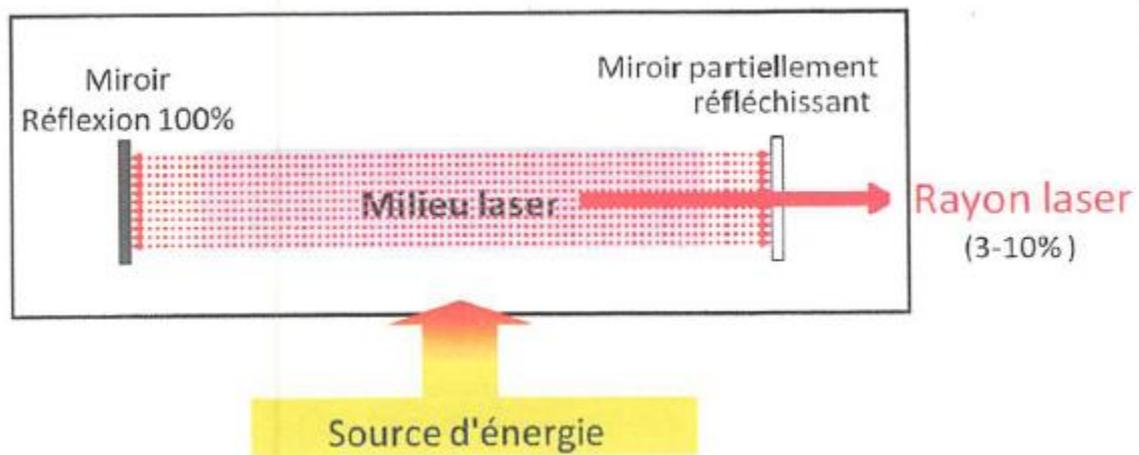


Illustration 3: Schéma du fonctionnement du laser
(Giovanni et al. 2013) *Irrigation endodontique et activation photonique Florence Bulit 2012*

La grande variété de lasers provient de la variété des milieux amplificateurs et des techniques de stimulation des atomes (électrique, optique, chimique). Ils peuvent être classés selon la longueur d'onde émise (ultra-violet, visible, infra-rouge), puisque, contrairement à la lumière classique, un même laser exprime des ondes électromagnétiques identiques avec la même longueur d'onde, et donc en phase (= vont dans la même direction au même rythme). La longueur d'onde exprimée est importante car c'est elle qui régule l'absorption du faisceau dans les fluides biologiques. Le faisceau peut par ailleurs être invisible pour nous à l'œil nu.

3.1.2. Rayonnements laser et tissus cibles

L'interaction du rayonnement laser avec le tissu cible répond aux lois de la physique optique, la propagation du faisceau dans les tissus cibles peut se faire de différentes façons :

- **Transmission/pénétration** : passage du rayonnement dans le tissu cible sans modification particulière du faisceau ou du tissu, il n'y a aucun effet produit.
- **Absorption** : conversion de l'énergie optique du rayonnement en énergie de vibration des molécules du milieu, elle est absorbée et peut ainsi exercer ses effets biologiques. Traduit une haute affinité entre le rayon laser et le tissu cible.
- **Diffusion** (scattering) : perte de la qualité unidirectionnelle du faisceau au profit d'une dispersion dans le tissu, c'est ce qui diffuse qui entraîne un effet sur les tissus.
- **Réflexion** (reflection) : le faisceau laser n'est pas compatible avec le tissu cible il va donc être partiellement rejeté et réfléchi en-dehors de la zone irradiée.

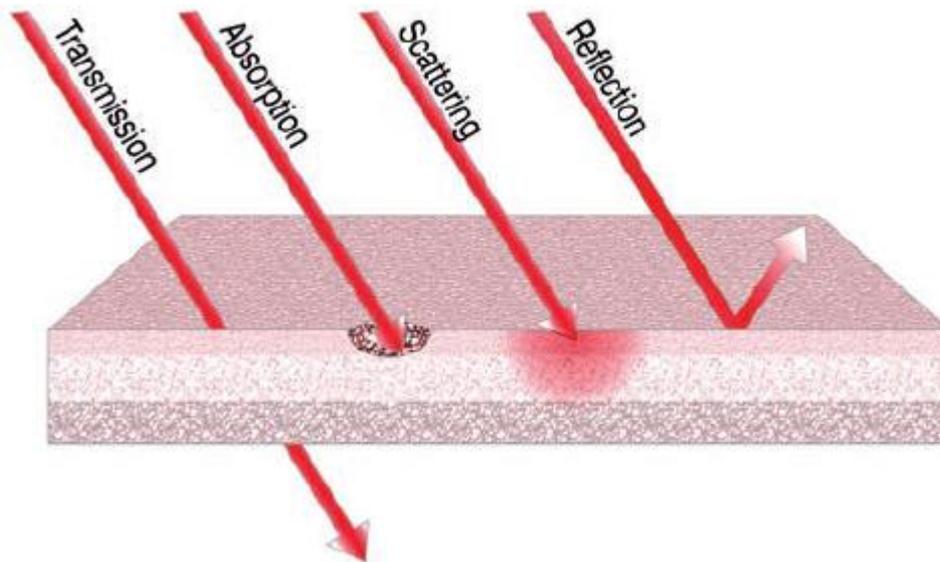


Illustration 4: Interaction du faisceau laser avec le milieu
(Giovanni et al. 2013)

Ce comportement optique est lié à la longueur d'onde du rayonnement ainsi qu'aux propriétés du tissu cible (différentes pour la dentine, la boue dentinaire, les micro-organismes ou les solutions d'irrigation), et notamment son coefficient d'absorption. Pour son utilisation en endodontie, c'est principalement le phénomène d'absorption qui nous importe. Selon les paramétrages du laser et, grâce aux phénomènes d'absorption et de diffusion, l'interaction du faisceau laser avec le tissu cible produit plusieurs effets

biologiques : photo-ablation (vaporisation des tissus), effets photo-thermiques (vasodilatation, coagulation, carbonisation), photo-stimulation et effets photo-acoustiques. Les effets produits seront différents selon les tissus cibles, les réglages du laser et surtout selon le laser utilisé.

3.1.3. Les types de lasers utilisés en endodontie

La technologie laser a été introduite en endodontie afin d'améliorer le résultat des procédures de désinfection traditionnelles. Comme nous l'avons vu précédemment, l'utilisation d'instruments associée à une irrigation chimique est la technique standard de débridement canalaire. Malgré cela, des bactéries survivent dans les tubulis dentinaires, dans la boue dentinaire et au niveau péri-apical conduisant à l'échec du traitement canalaire. Wolf Kluger (Schoop et al. 2004) a par ailleurs montré que les bactéries peuvent pénétrer jusqu'à 1100µm dans les tubulis dentinaires, alors que les solutions d'irrigation, lors d'un protocole conventionnel, ne vont que jusqu'à 130µm. Il a donc fallu renforcer les capacités de nettoyage et d'élimination des débris afin d'assurer une meilleure décontamination du système endodontique. Le laser permet d'augmenter la pénétration des solutions d'irrigation, et d'obtenir un débridement plus efficace.

Lors de la préparation canalaire, les débris produits par les instruments s'accrochent aux parois canales en formant une couche superficielle appelée la boue dentinaire. Elle contient des substances organiques et inorganiques, dont des micro-organismes et des débris nécrosés. Son élimination est primordiale puisqu'elle peut être infectée, qu'elle peut protéger les bactéries nichées dans les tubulis dentinaires des agents désinfectants, et enfin, qu'elle peut diminuer la qualité du scellement lors de l'obturation et du collage (Violich et Chandler 2010). Son retrait est un critère d'évaluation de l'efficacité des méthodes d'irrigation.

Le laser est proposé depuis plusieurs années en vue d'améliorer la désinfection endodontique. L'absorption du faisceau photonique provoque trois principaux effets :

- **Effet photochimique** : lors de l'irradiation, il se produit un transfert d'énergie entre les molécules excitées par le rayonnement photonique et le dioxygène présent dans les tissus. Cette réaction entraîne des micro-explosions qui permettent la décontamination des surfaces.

- **Effet thermique** : l'énergie radiative est convertie en énergie calorique dans les tissus, permettant ainsi les phénomènes de coagulation, séchage, carbonisation et vaporisation.
- **Effet mécanique** : les lasers fonctionnent généralement en mode pulsé, et chaque pulse est accompagné d'une onde de choc, leur succession entraîne une désorganisation des structures et donc un débridement.

De nombreux lasers sont disponibles et leur utilisation au fauteuil est rendue possible grâce à des fibres optiques montées sur pièce à main. Ils sont classés selon le domaine du spectre électromagnétique de la lumière qu'ils émettent. Le choix de l'énergie appliquée est modulable par de nombreux réglages de la machine (mode d'émission, fréquence des impulsions, diamètre de la fibre optique, angulation, etc.) et par les gestes du praticien (contact ou non avec les parois canalaire, distance entre la fibre optique et les tissus, temps d'application, temps de repos, etc.), ce qui permet un usage polyvalent, avec un choix d'énergie adapté à la situation clinique (action sur les tissus durs ou mous). Différentes longueurs d'ondes et lasers peuvent être utilisés en endodontie (Rey 2016) :

- Le **laser dioxyde de carbone CO₂** : 9300-9600-10 600nm : premier utilisé en endodontie pour la décontamination et la fusion de la dentine apicale, mais n'est quasiment plus utilisé aujourd'hui (uniquement pour la pulpotomie et coagulation).
- Les **lasers erbium** Er :YAG 2940 nm (*Erbium-Yttrium-Aluminium-Garnet*) et Er,Cr :YSGG 2780 nm (*Erbium Yttrium-Scandium-Gallium-Garnet*): Ces deux lasers ont une longueur d'onde très proche et une utilisation identique. Leur rayonnement photonique a une pénétration bien inférieure à celle des autres lasers mais est très bien absorbé par l'eau et donc aussi bien par les tissus durs que mous. C'est un allié de l'endodontie car il a une propagation thermique minimale malgré un rayonnement très énergisant. Lors de l'irradiation dans une solution d'irrigation, il va produire un effet thermique brutal très localisé qui provoque le passage des molécules d'eau de l'état liquide à l'état gazeux, ceci produit des explosions avec une ablation superficielle des tissus durs dentinaires et la formation de micro-cratères débarrassés de la boue dentinaire et de la dentine de surface. Grâce à ce phénomène d'ablation les tubulis se retrouvent exposés, ce qui améliore la pénétration des solutions d'irrigation et l'étanchéité de l'obturation canalaire (Dos Santos Antonio et

al. 2012). Par ailleurs la vaporisation de la solution entraîne des variations de pressions importantes qui favorisent la pénétration de l'antiseptique. De plus les nombreuses ondes de chocs conduisent à la formation d'un flux puissant qui entraîne des dommages au niveau des parois cellulaires, permettant le détachement des biofilms et une élimination des micro-colonies par leur mise en suspension (Noiri et al. 2008) Les lasers erbium ont donc une action sur les antiseptiques (favorise leur pénétration et améliore leur potentiel désinfectant), sur les tissus durs (ablation de la dentine péri-tubulaire) et sur la boue dentinaire (élimination par effet photomécanique, photoacoustique et photo-ablatif).

- Le **laser Nd:YAP** *crystal yttrium aluminium pérovskite dope au néodyme* 1340 nm : c'est une longueur d'onde qui est faiblement absorbée mais qui pénètre dans les tissus hydratés. Elle a donc des effets importants sur les tissus mous. De par ses effets thermiques il est utile en endodontie pour la vaporisation des tissus (coagulation, éviction gingivale) et l'assèchement du canal en fin de traitement. Il entraîne un échauffement important ce qui permet de potentialiser l'efficacité des solutions d'irrigation. De plus, il permet une photo-ablation sélective des pigments dentaires et donc la destruction des calcifications et obstacles. A chaque pulse il produit des ondes de choc projetant les liquides d'irrigation dans l'ensemble du système canalaire. Enfin, il pénètre profondément dans les tissus ce qui stimule la cicatrisation, notamment au niveau du péri-apex.
- Le **laser Nd:YAG** *crystal néodyme aluminium garnet dopé à l'yttrium* 1064nm : c'est une longueur d'onde qui est surtout absorbée par les tissus pigmentés et peu par l'eau. Il est beaucoup utilisé en endodontie conservatrice (traitement de l'hypersensibilité), et en chirurgie (hémostase, incision des tissus mous). En endodontie c'est principalement la photothérapie dynamique lors de son interaction avec l'oxygène qui permet une décontamination.
- Les **lasers à diode** (nombreuses longueurs d'ondes allant de 810 à 1064 nm) : ils ont une action bactéricide par augmentation localisée de la température (effet thermique) ou par interaction avec des solutions photosensibles (effet photochimique). Ce dernier est permis par une oxygénation préalable des tissus avec du peroxyde d'hydrogène ou par une interaction avec des colorants spécifiques (bleu de toluidine, bleu de méthylène, chlorure de tolonium et vert d'indocyanine, etc.) Ils

avaient été initialement proposés car ils sont moins onéreux et moins encombrants que les autres lasers.

L'ensemble de ces lasers ont un intérêt en endodontie : lors de l'irradiation des canaux vide de solution ils permettent l'ablation d'obstacles et l'assèchement (Ebihara et al. 2002), alors que leur irradiation dans un canal en présence de solution d'irrigation permet d'améliorer la pénétration de la solution dans les recoins canaux et potentialisent son action par effet thermique. Pour l'activation des solutions d'irrigation, ce sont les lasers erbium qui sont privilégiés, car ils combinent un effet photomécanique, photoablatif et photoacoustique. Ils sont utilisés en mode pulsé, afin d'avoir une activité antibactérienne efficace. En effet, les bactéries sont organisées en biofilm : leur matrice les protège des attaques chimiques et surtout leur confère un comportement élastique permettant de résister aux attaques mécaniques (Körstgens et al. 2001). Lors de l'irradiation, l'impulsion favorise le passage des solutions d'irrigation, ce qui fragilise cette organisation, et c'est l'énergie libérée par le laser qui va permettre sa destruction (Böl et al. 2013) En cas d'énergie trop faible ou de biofilm trop adhérent, seule une déformation élastique sera engendrée, et le système reviendra à son état initial une fois la contrainte arrêtée. Une répétition des stress énergétiques par un laser en mode pulsé entraîne une dissociation du biofilm. L'intervalle de temps entre chacune des impulsions permet au tissu cible de se refroidir afin d'éviter un échauffement trop important.

La puissance du laser est calculée selon l'énergie des impulsions et le nombre d'impulsions par minute. De Groot et al (de Groot et al. 2009) recommandent comme paramétrages la combinaison d'une faible énergie (80mJ) par impulsion, et une fréquence d'impulsion de 5 à 15Hz. Au-delà de 120mJ par impulsion une trop grande quantité de solution d'irrigation est perdue, diminuant l'efficacité du protocole. Des paramètres propres au clinicien peuvent également modifier l'efficacité du laser : angulation de la pièce à main, distance de la cible, rapidité du mouvement ou encore durée de l'irradiation. Son utilisation est donc modulable selon des facteurs intrinsèques et extrinsèques.

Il est important de contrôler le niveau d'énergie transmis, qui est directement lié aux effets thermiques des lasers (He et al. 2009) afin d'éviter des dommages au niveau des parois dentaires : zones de fusion, recristallisation de la matrice minérale, micro fractures superficielles, ou encore carbonisation de la surface radiculaire. Ces effets iatrogènes sont

plus fréquemment retrouvés avec les laser Nd :YAP et Nd :YAG qui sont très pénétrants plutôt qu'avec les lasers diodes et erbium.

3.2. Présentation de trois techniques de désinfection laser

Plusieurs paramètres importants sont à prendre en compte dans l'évaluation de la qualité de l'irrigation : la capacité du système à envoyer la solution dans l'ensemble du système canalaire, à atteindre des zones non mises en forme mécaniquement (isthmes et canaux latéraux), et la capacité de débridement. Dans le cadre de l'activation, les lasers peuvent être utilisés selon différentes techniques :

- **Irradiation du laser dans un canal sec** : insertion d'une fibre optique jusqu'à 1mm de la longueur de travail, celle-ci est remontée en direction de la chambre pulpaire avec un mouvement hélicoïdal lors de l'irradiation. L'objectif est ici d'utiliser l'effet thermique pour décontaminer le réseau canalaire. Avec la longueur d'onde des lasers erbium l'énergie est propagée superficiellement sur les surfaces canalaires permettant la vaporisation de la boue dentinaire et l'exposition des tubulis dentinaires. Au contraire, pour les lasers avec une longueur d'onde plus faible (diode, Nd :YAP et Nd :YAG), l'absorption par la dentine est plus minime, l'effet thermique produit est donc très important : elle se retrouve dénaturée par la fonte de la boue dentinaire qui obstrue les tubulis. L'interaction thermique qui permet la destruction des bactéries altère la structure dentinaire. De plus, l'utilisation du laser sans solution d'irrigation est moins efficace dans l'élimination des bactéries que l'utilisation d'hypochlorite sans activation (Meire et al. 2009). Enfin les obstacles anatomiques (courbure, faible diamètre) limitent la pénétration de la fibre dans les canaux et donc son efficacité. Cette technique qui ne convient pas aux exigences de l'endodontie moderne a été abandonnée.
- **Désinfection photo active ou PAD** (*photo activated désinfection*): dans cette technique la désinfection se fait à l'aide d'une solution photosensible qui est un colorant. Celle-ci est instillée dans le système canalaire, puis activée à l'aide d'une lumière laser amenée par une fibre optique. La longueur d'onde est prédéfinie et spécifique à chaque colorant, elle correspond à son maximum d'absorption. Il se produit alors une réaction photochimique au cours de laquelle des radicaux libres et

des oxygènes singulets sont produits, et vont avoir un effet bactéricide. La présence de lumière, d'une solution photosensible et d'oxygène en quantité suffisante sont les seuls prérequis. Ce sont des lasers diodes avec des faibles niveaux d'énergie qui sont utilisés, il y a donc très peu d'effets secondaires.

– **Activation des solutions d'irrigation par laser ou LAI** (*laser activated irrigation*): insertion d'un embout à un ou trois millimètres de la longueur de travail, il va transmettre l'énergie du faisceau laser à la solution d'irrigation, préalablement introduite dans les canaux. Cela va entraîner une cavitation acoustique qui active la solution. Ce sont principalement les lasers erbium (Er: YAG et Er,Cr: YSGG) qui sont utilisés puisque leur longueur d'onde est très bien absorbée par les solutions d'irrigation. Si on veut utiliser un laser Nd:YAG ou Nd:YAP et avoir les mêmes effets qu'un laser erbium, il faut augmenter le niveau d'énergie et donc les effets thermiques iatrogènes.

– **Activation photo acoustique induite par les photons ou PIPS** (*photon-induced photoacoustic streaming*) : C'est une modification de la technique de LAI, l'embout n'est plus maintenu au niveau apical mais au niveau de la chambre pulpaire, sans contact avec les parois canalaire. Ce sont toujours les lasers erbium qui sont privilégiés, pour leur forte absorption dans les solutions d'irrigation.

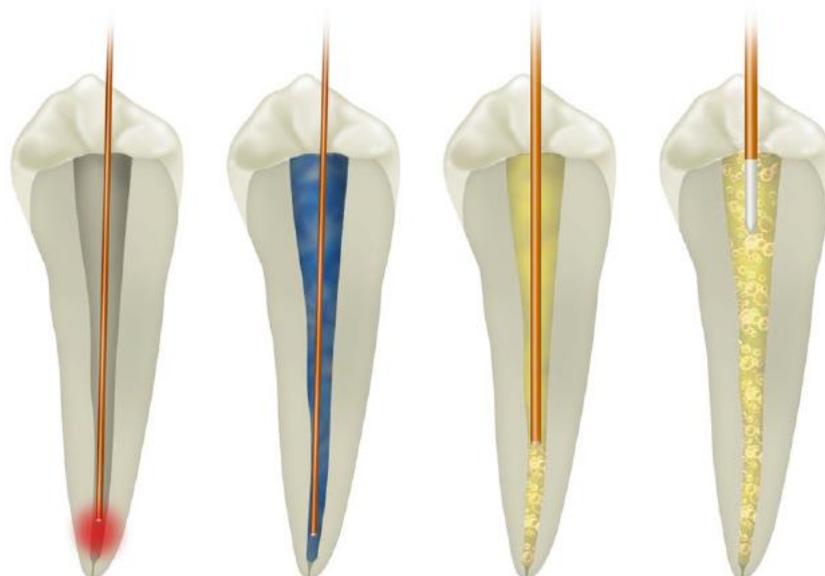


Illustration 5: Schéma des techniques d'activation par laser (de gauche à droite) :
irradiation dans un canal sec, PAD, LAI et PIPS
Lasers in Endodontics – Giovanni Olivi 2016

Les embouts utilisés font généralement entre 100 et 200µm. Auparavant on utilisait principalement des embouts lisses à bout droit, alors que maintenant il est recommandé d'avoir des fibres optiques à bout conique et dénudé (George et al. 2008). Ceux-ci permettent une répartition plus homogène du faisceau grâce à des émissions latérales, notamment dans les canaux courbes.

L'utilisation du laser entraîne des effets thermiques importants, l'irradiation directe dans un canal sec n'est plus recommandée à cause de l'altération de la dentine, et la modification du trajet canalaire. Nous allons voir comment les trois autres techniques (LAI, PIPS, PAD) permettent d'améliorer la décontamination du système endodontique et le nettoyage des parois canalaire.

3.2.1. L'irrigation activée par laser (LAI)

Dans le cadre de l'irrigation activée par le laser, ce sont ceux de la famille erbium qui sont utilisés (Er:YAG et Er,Cr: YSGG): leur longueur d'onde comprise entre 2780 et 2940 nm est fortement absorbée par l'eau et l'hypochlorite de sodium. Ils sont systématiquement en mode pulsé. Les lasers diode avaient été proposés pour leur faible coût et encombrement, mais leur faisceau n'est pas suffisamment énergétique : les longueurs d'ondes sont plus faibles, de ce fait pour avoir la même action antibactérienne qu'un laser erbium, il faut irradier plus longtemps les canaux, ce qui entraîne un échauffement important (Deleu et al. 2015).

Le protocole est simple : il suffit de remplir le canal de la solution d'irrigation souhaitée, mettre en place l'embout de la fibre optique, montée sur pièce à main, dans le canal à 1-3mm de la longueur de travail, et d'activer la solution par des impulsions successives. Il faut veiller à adopter la bonne gestuelle : on place d'abord la fibre puis on actionne le laser avec un mouvement de retrait vers la chambre pulpaire. Le temps d'activation et le nombre de répétitions dépend du nombre de canaux, et entre chaque répétition, il faut remplir le canal de solution d'irrigation. Comme le montre Abdollah Grbanzadh (Ghorbanzadeh et al. 2016), pour avoir une désinfection optimale il est indispensable d'activer aussi bien la solution chélatrice (EDTA) que la solution désinfectante (NaOCl).

Le mécanisme d'activation repose sur le phénomène de cavitation (de Groot et al. 2009): lors de la stimulation du laser, la température de la solution augmente subitement jusqu'à son point d'ébullition, une bulle se forme alors au niveau de l'extrémité de l'embout.

Tant que de l'énergie est délivrée, celle-ci subit un phénomène d'expansion dans le liquide. Par pression positive, elle repousse la solution jusque dans les recoins du système canalaire et le tiers apical. Plus l'énergie de l'impulsion est élevée, plus la bulle va grandir. A l'arrêt de la stimulation, elle va imploser et, avec le changement de pression, il se forme une onde de choc, appelée blast. Les parois canalaires subissent alors des contraintes de cisaillements, entraînant leur débridement par cavitation, et les membranes bactériennes éclatent. Par ailleurs, cette pression négative entraîne la formation de bulles de cavitation secondaires de faible diamètre au niveau apical, qui génèrent des flux liquidiens et exploseront à la prochaine impulsion. A chaque nouveau cycle, ce phénomène de cavitation se répète avec des conséquences sur l'état de surface des parois canalaires : le retrait de la boue dentinaire. Les variations de pression forment des courants qui permettent le déplacement de la solution d'irrigation dans l'ensemble du réseau canalaire, même dans les isthmes et canaux latéraux. Ce mouvement rapide des fluides, et les ondes de choc accompagnant la cavitation secondaire des bulles, favorisent l'élimination des débris dans les zones non atteintes par la mise en forme mécanique. Gu 2016 (Gu et al. 2017) montre que cette technique permet un meilleur retrait de la boue dentinaire et donc une meilleure pénétration des matériaux d'obturation dans les tubulis dentinaires. A.Peters 2011 (Peters et al. 2011) et Noiri (Noiri et al. 2008) ont par ailleurs démontré que le LAI permet une meilleure désinfection que l'irrigation conventionnelle et l'activation ultrasonore, notamment grâce à la désorganisation des biofilms.

La LAI est particulièrement efficace dans l'activation de l'hypochlorite de sodium. Lorsque le fluide est au repos, la chlorine (molécule active de la solution) a un mouvement de diffusion, c'est un processus de déplacement lent qui dépend de la concentration et de la température. Lorsqu'on active la solution avec le laser, ces molécules vont entrer en convection, un mouvement beaucoup plus rapide et la température augmente, ce qui permet d'améliorer le taux de réactivité. Ce phénomène se poursuit même après l'arrêt de la stimulation. Ainsi, une minute d'activation au laser équivaut à trois minutes de temps d'exposition. Par ailleurs cette réactivité est plus importante avec le laser qu'avec les ultrasons (Macedo et al. 2010).

Une utilisation du laser conforme aux recommandations des constructeurs (*puissance, durée de l'irradiation, fréquence des impulsions*) n'entraîne pas ou peu d'échauffement sur les parois canalaires. En effet l'énergie émise est presque totalement absorbée par la

solution d'irrigation, et la température diminue quasiment instantanément une fois l'irradiation arrêtée (Guidotti et al. 2014), sans causer de dommages structurels anatomiques. Par ailleurs si l'énergie transmise est trop forte, la bulle formée au niveau de l'embout est tellement volumineuse qu'elle éjecte la solution en-dehors du canal. La plupart des effets néfastes du laser sont liés à un non-respect du protocole d'utilisation : une durée d'irradiation et un niveau d'énergie excessifs.

Stabhoz (Stabholz et al. 2004) a tout de même mis en évidence une limite de la LAI : le faisceau émis est unidirectionnel, alors que l'ensemble du canal doit être irradié. Même avec des mouvements d'insertion/désinsertion au plus proche de l'apex et un embout conique, le faisceau reste dirigé vers la partie apicale du canal et non pas sur les parois latérales. Il est donc impossible d'irradier l'intégralité de la surface canalaire. Cette orientation directe du faisceau vers l'apex est dangereuse pour les tissus péri-apicaux, car l'énergie transmise peut aller au-delà du foramen. Il a donc fallu améliorer le protocole.

Par ailleurs, de trop nombreux protocoles sont proposés sans qu'un consensus soit établi sur : la durée des impulsions, leur fréquence, le diamètre de l'embout, la position de l'embout, ou encore l'élargissement nécessaire du diamètre canalaire.

3.2.2. Activation photoacoustique induite par photon (PIPS Technique)

L'activation photoacoustique induite par photons est une technique avancée de la LAI : l'embout n'est plus inséré à proximité de la longueur de travail mais au niveau de la chambre pulpaire, à l'entrée des canaux, sans y pénétrer, et sans aucun contact avec les parois radiculaires. C'est généralement un laser Er:YAG qui est utilisé, avec un embout conique et dénudé, maintenu statique et immergé pendant toute l'irradiation. L'énergie transmise dans la chambre pulpaire est inférieure à celle d'une irradiation directe dans le canal, puisque la distance entre l'embout et les parois canalaire sont augmentées. Les effets thermiques iatrogènes sont évités car les photons sont émis avec une faible énergie et avec des impulsions de courte durée. Il y a besoin d'un apport continu de solution d'irrigation.

Lors des impulsions il se produit le même mécanisme photo-acoustique que lors de la LAI : l'onde électromagnétique est transmise à l'irrigant, ce qui génère un flux liquidien et une onde de choc, améliorant le nettoyage des parois canalaire et augmentant l'efficacité antibactérienne de la solution d'irrigation (Lloyd et al. 2014). De plus, les impulsions en rafale vont transmettre l'énergie directement dans les canaux et, par un phénomène de

pompage, font remonter les débris, permettant d'obtenir des canaux (même latéraux) propres.

D'après l'étude de Guneser (Guneser et al. 2015), PIPS est tout aussi efficace que LAI dans l'élimination de la boue dentinaire et des débris pulpaire lorsqu'il est associé à l'hypochlorite de sodium. Là encore, l'activation de l'EDTA est une étape fondamentale qui permet d'améliorer le nettoyage (DiVito et al. 2012). Grâce à la combinaison du laser et des solutions d'irrigation, on obtient une réduction bactérienne significative au niveau du tiers apical, et en profondeur des tubulis dentinaires (Azim et al. 2016). En effet, l'onde de choc photoacoustique permet un renouvellement et un déplacement en trois dimension des fluides jusqu'à la limite apicale, conduisant à un meilleur débridement canalaire qu'une irrigation conventionnelle, sans pour autant d'avoir d'effet délétère sur les tissus apicaux (Peeters et Mooduto 2013).

On pourrait penser que si la pression positive est suffisamment élevée pour permettre aux irrigants d'aller dans l'ensemble du système canalaire, elle l'est aussi pour les extruder au-delà de la constriction apicale. Or, Roy (George et Walsh 2008) montre que peu importe la technique (PIPS ou LAI) l'extrusion lors de l'utilisation du laser n'est pas plus importante que lors de l'irrigation avec une seringue conventionnelle. Harry Huiz Peeters (Peeters et Mooduto 2013) va même jusqu'à montrer que cette technique conduit à une absence d'extrusion de solution d'irrigation. Cela implique une utilisation prudente du laser par le praticien, afin d'éviter les accidents iatrogènes. Le protocole doit être suivi méticuleusement : l'embout du laser doit toujours être maintenu statique au niveau de la chambre pulpaire (pas dans le canal), la puissance du laser ne doit jamais aller au-delà de 2W et la dent doit être isolée avec un champ opératoire (!).

PIPS est donc une technique peu invasive, qui améliore l'irrigation et qui n'implique pas une préparation canalaire de grand diamètre. Comme le conclue Barabara Golob (Golob et al. 2017) cette technique d'activation associée à l'hypochlorite de sodium abouti à une éradication efficace du biofilm bactérien et de la boue dentinaire. Notamment grâce à :

- une émission latérale des radiations par son embout conique ;
- la hausse de la réactivité de l'hypochlorite de sodium ;
- une amélioration de la propagation de la solution d'irrigation ;
- un meilleur débridement par la formation d'ondes de chocs et une augmentation de sa pénétration dans les tubulis dentinaires.

L'illustration 6: *Elimination des débris canaux avec PIPS* montre que grâce à cette technique d'activation, une plus grande surface canalaire est atteinte, et débridée.

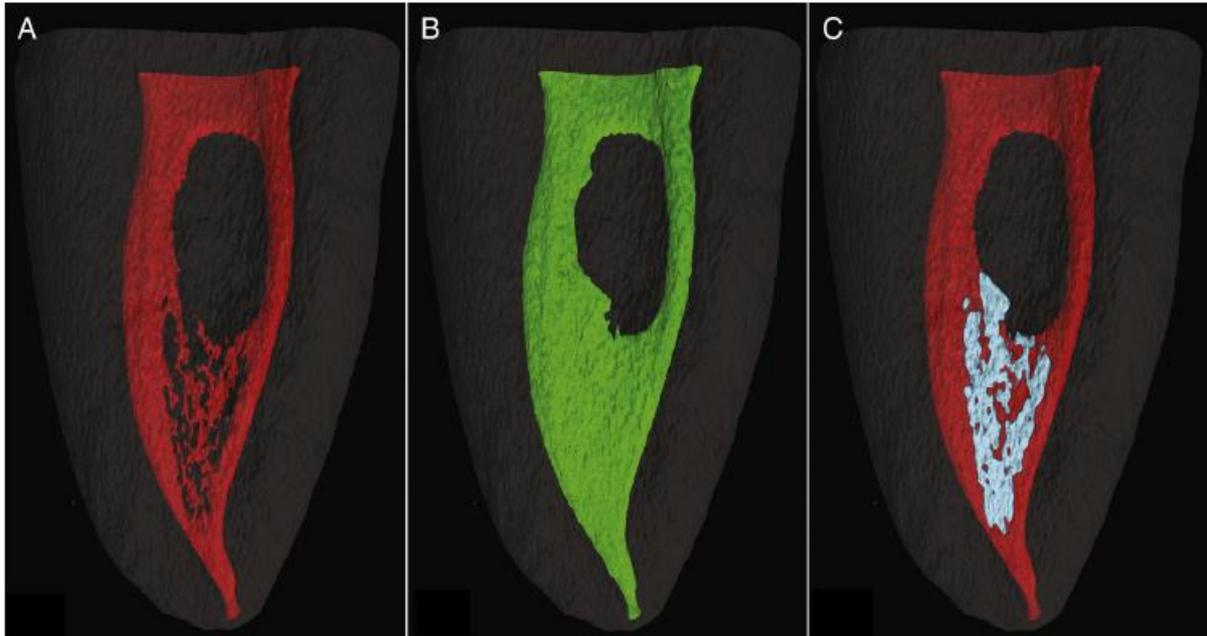


Illustration 6: Elimination des débris canaux avec PIPS

Elimination of intracanal tissue and debris – (Lloyd et al. 2014)

A : Visualisation en 3D du système canalaire après la mise en forme mais avant l'activation

B : Visualisation en 3D du volume nettoyé grâce à l'activation par la technique PIPS

C : Représentation en bleu du volume nettoyé qu'on n'aurait pu atteindre sans PIPS

3.2.3. La désinfection par thérapie photodynamique (PAD)

Face à l'antibiorésistance des bactéries et à la multiplication des échecs endodontiques, il a fallu trouver un protocole permettant l'élimination des micro-organismes résistants. Une dent ayant déjà été traitée endodontiquement, et avec une lésion apicale, contient plusieurs espèces bactériennes et majoritairement des Gram + (*Enterococcus faecalis*, *Prevotella sp*, *actinomyces*, *streptococcus*, etc.). La thérapie photoactive consiste à mettre en place dans le canal un colorant photosensible non toxique, et de le soumettre à un rayonnement laser. Activé à une certaine longueur d'onde, ce colorant va interagir avec l'oxygène : il va y avoir un transfert d'énergie du colorant activé par les photons, vers l'oxygène disponible, entraînant la formation de radicaux libres et d'oxygène singulet. Ces molécules sont très réactives et vont aller endommager les protéines, les lipides, les acides nucléiques et tous les autres composants cellulaires. Il n'y a donc pas d'effet direct sur les tissus ou les bactéries, il faut activer un composé spécifique qui va relarguer des éléments toxiques qui détruisent les cellules cibles, ici les bactéries. Il est intéressant d'utiliser une fibre optique se prolongeant

dans le canal (Garcez et al. 2013) afin d'avoir une diffusion uniforme sur les parois radiculaires et permettre une meilleure irradiation au niveau de l'apex, et ainsi améliorer la désinfection. La réaction photodynamique implique donc trois acteurs :

- **Une solution photosensible** : c'est un précurseur métabolique qui passe d'un état stable à un état excité pour réagir avec l'oxygène. Elle doit être non-toxique et avoir une action uniquement lors de l'irradiation à la longueur d'onde spécifique pour ne pas avoir d'effet rémanent en-dehors des périodes d'activation. Les solutions photosensibles les plus fréquemment utilisées sont : le bleu de méthylène (MB), le bleu de toluidine (TB), le chlorure de tolonium (TC) et le vert d'indocyanine (IG).
- **Une lumière** : chaque solution photosensible a une longueur d'onde spécifique et unique qui correspond à son maximum d'absorption. Utilisation principalement du laser diode : il possède une faible puissance et est facile d'utilisation.
- **De l'oxygène** : l'efficacité de la technique dépend de sa présence. Les canaux sont un milieu anaérobie, on peut adjoindre du peroxyde d'hydrogène pour optimiser la réaction chimique.

La susceptibilité photosensible est directement liée à la charge portée par le colorant. Les bactéries Gram + sont plus faciles à détruire car elles se lient très bien aux colorants anioniques ou neutres, et ont une membrane externe perméable constituée de peptidoglycanes et de lipides. Au contraire, la membrane externe des bactéries Gram – agit comme une barrière avec l'environnement. Il faut ajouter une molécule cationique aux solutions photosensibles chargées négativement, ou leur adjoindre un anticorps monoclonal capable de se lier avec les antigènes spécifiques à leur surface, pour tenter d'améliorer l'affinité et permettre leur coloration (Demidova et Hamblin 2005).

La PAD permet l'élimination des micro-organismes résistants, des champignons ou encore des virus (Garcez et al. 2013) Bago (Bago et al. 2013) a montré qu'elle permet une réduction de 99,9% de *E. faecalis*. Elle est également efficace contre les levures (*Candida albicans*) malgré leur structure externe complexe : il suffit d'augmenter le temps d'irradiation pour qu'il y ait plus d'oxygène singlet œuvrant pour la lyse cellulaire. Les biofilms polymicrobiens y sont également sensibles (Konopka et Goslinski 2007): ceux-ci sont constitués d'une grande quantité de matrice extracellulaire, riche en polysaccharides, qui sont très réactifs aux attaques des radicaux libres. L'effet bactéricide de la désinfection par

l'hypochlorite puis l'activation photodynamique permet une décontamination jusqu'à six fois supérieure à l'utilisation d'hypochlorite seul. La PAD est donc une technique adjuvante au traitement endodontique conventionnel. Son action est sans danger pour les tissus environnants (George et Kishen 2007), elle est beaucoup plus efficace sur les cellules procaryotes que sur les cellules eucaryotes, et provoque donc une destruction minime des fibroblastes et des cellules péri-apicales

L'effet bactéricide est dose-dépendant et dépend de la chaleur transmise : si elle est trop importante, il peut y avoir des effets délétères au niveau de la surface dentinaire, du ligament parodontal, résultant en une ankylose ou une résorption de la dent. Cependant, ici c'est un laser de basse puissance qui permet l'activation de la solution photosensible, les complications sont donc rares. Par ailleurs, il est impossible pour les bactéries de développer une résistance à la PAD car elle affecte de trop nombreux constituants cellulaires. En revanche, pour qu'il y ait un effet bactéricide la solution photosensible doit être en contact avec les cellules bactériennes car les molécules se propagent peu. La qualité de la désinfection est donc liée à la capacité de la solution de se propager dans le système canalaire, or ceci est une des limites du traitement endodontique. Enfin, l'oxygène qui est un élément indispensable à la réussite de la réaction peut se trouver en quantité insuffisante dans les canaux qui constituent un milieu anaérobie.

Conclusions

Le traitement endodontique est un acte complexe au cours duquel les protocoles de mise en forme et de désinfection peuvent être complétés d'une étape d'activation afin d'être réellement efficaces. De nombreux systèmes ont été proposés pour activer et potentialiser l'action désinfectante des solutions d'irrigation (l'illustration 7: Graphique récapitulatif des techniques d'activation). Aucun ne permet de se substituer à un traitement mécanique et chimique initial et le nettoyage au niveau du tiers apical reste insuffisant (Urban et al. 2017), sauf avec le laser.

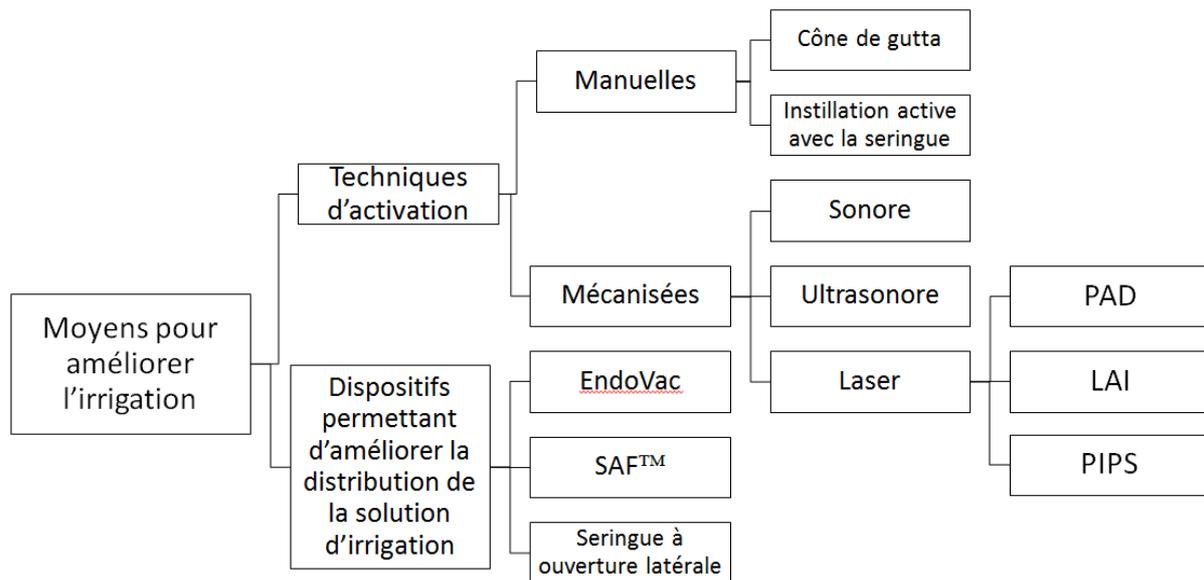


Illustration 7: Graphique récapitulatif des techniques d'activation

En effet l'arrivée des lasers en endodontie depuis une vingtaine d'années a permis une nette amélioration de la désinfection (Cheng et al. 2012), du débridement (Sahar-Helft et al. 2015), favorisant ainsi une meilleure interface de collage et d'obturation canalaire. Leurs rayonnements pénètrent profondément dans les tissus dentaires permettant leur décontamination, leur conférant une réelle indication en complément des méthodes traditionnelles. Par ailleurs, les ondes de chocs produites améliorent la dynamique des fluides et donc la propagation des solutions d'irrigation dans l'anatomie canalaire complexe, alors que leur pénétration est l'une des principales limites des traitements actuels. Ajouté à cela, un des avantages non négligeables de leur utilisation est la satisfaction des patients pour qui les suites post-opératoires sont beaucoup moins douloureuses.

Leur utilisation doit cependant être limitée aux praticiens formés, ayant une bonne connaissance des gestes et des recommandations des constructeurs, afin d'éviter les effets iatrogènes thermiques. Malgré de nombreuses études vantant leurs mérites, cela reste un phénomène nouveau, et nécessitant encore des études afin de déterminer si les résultats des traitements sont meilleurs qu'avec une technique conventionnelle. Plusieurs auteurs restent sceptiques (Fransson et al. 2013; Mancini et al. 2018), puisque malgré les résultats prometteurs, les protocoles sont trop nombreux, non uniformisés et donc trop aléatoires. De nombreux lasers peuvent être utilisés en endodontie : les lasers erbium pour le débridement et l'activation dans les techniques de LAI et PIPS, alors que les lasers diodes seront plutôt utilisés pour leur action antibactérienne par PAD. Pour obtenir une action optimale il faudrait finalement combiner PIPS et PAD, ce qui rallonge le coût et la durée du traitement.

Le laser est un outil complémentaire qui, bien intégré dans le traitement endodontique, facilite grandement de nombreuses étapes du traitement endodontique mais ne permet en aucun cas d'oublier la rigueur qu'impose cet acte. D'autres études sont nécessaires pour standardiser les protocoles. Les évolutions ne font donc que débiter, Schlafer (Schlafer et al. 2010) a par exemple utilisé une lampe à photopolymériser à la place du laser dans le protocole de PAD, et la longueur d'onde a permis de réduire la présence bactérienne. De cette façon, la lampe LED classique permet d'éviter les possibles effets iatrogènes au niveau du péri-apex, diminuer le temps d'activation, et surtout démocratiser cette technique d'activation, puisque le laser reste un dispositif très onéreux.

Sources et Références bibliographiques

- Abarajithan M, Dham S, Velmurugan N, Valerian-Albuquerque D, Ballal S, Senthilkumar H. Comparison of Endovac irrigation system with conventional irrigation for removal of intracanal smear layer: an in vitro study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2011;112(3):407-11.
- Anić I, Dzibur A, Vidović D, Tudja M. Temperature and surface changes of dentine and cementum induced by CO2 laser exposure. *Int Endod J.* 1993;26(5):284-93.
- Asnaashari M, Safavi N. Disinfection of Contaminated Canals by Different Laser Wavelengths, while Performing Root Canal Therapy. *J Lasers Med Sci.* 2013;4(1):8-16.
- Ayranci LB, Arslan H, Akcay M, Capar ID, Gok T, Saygili G. Effectiveness of laser-assisted irrigation and passive ultrasonic irrigation techniques on smear layer removal in middle and apical thirds. *Scanning.* 2016;38(2):121-7.
- Azim AA, Aksel H, Zhuang T, Mashtare T, Babu JP, Huang GT-J. Efficacy of 4 Irrigation Protocols in Killing Bacteria Colonized in Dentinal Tubules Examined by a Novel Confocal Laser Scanning Microscope Analysis. *J Endod.* 2016;42(6):928-34.
- Bago I, Plečko V, Gabrić Pandurić D, Schauperl Z, Baraba A, Anić I. Antimicrobial efficacy of a high-power diode laser, photo-activated disinfection, conventional and sonic activated irrigation during root canal treatment. *Int Endod J.* 2013;46(4):339-47.
- Basrani BR, Manek S, Sodhi RNS, Fillery E, Manzur A. Interaction between sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate. *J Endod.* 2007;33(8):966-9.
- Beer R, Baumann MA, Kielbassa AM. *Atlas de poche d'endodontie.* Flammarion. Paris: Flammarion médecine-sciences; 2008. (Medecine-Sciences).
- Bergenholtz G. Inflammatory response of the dental pulp to bacterial irritation. *J Endod.* 1981;7(3):100-4.
- Böl M, Ehret AE, Bolea Albero A, Hellriegel J, Krull R. Recent advances in mechanical characterisation of biofilm and their significance for material modelling. *Crit Rev Biotechnol.* 2013;33(2):145-71.
- Boutsioukis C, Lambrianidis T, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Wesselink PR, et al. The effect of needle-insertion depth on the irrigant flow in the root canal: evaluation using an unsteady computational fluid dynamics model. *J Endod.* 2010;36(10):1664-8.
- Brito PRR, Souza LC, Machado de Oliveira JC, Alves FRF, De-Deus G, Lopes HP, et al. Comparison of the effectiveness of three irrigation techniques in reducing intracanal *Enterococcus faecalis* populations: an in vitro study. *J Endod.* 2009;35(10):1422-7.
- Bronnec F, Bouillaguet S, Machtou P. Ex vivo assessment of irrigant penetration and renewal during the cleaning and shaping of root canals: a digital subtraction radiographic study. *Int Endod J.* 2010;43(4):275-82.
- Bryce G, O'Donnell D, Ready D, Ng Y-L, Pratten J, Gulabivala K. Contemporary root canal irrigants are able to disrupt and eradicate single- and dual-species biofilms. *J Endod.* 2009;35(9):1243-8.
- Caron G, Nham K, Bronnec F, Machtou P. Effectiveness of different final irrigant activation protocols on smear layer removal in curved canals. *J Endod.* 2010;36(8):1361-6.
- Chavez de Paz L. Microbial Biofilms in Endodontics. In: *Endodontic irrigation: chemical disinfection of the root canal system.* Springer. Bettina Basrani; 2015.
- Chávez De Paz LE, Dahlén G, Molander A, Möller A, Bergenholtz G. Bacteria recovered from teeth with apical periodontitis after antimicrobial endodontic treatment. *Int Endod J.* 2003;36(7):500-8.

- Cheng X, Guan S, Lu H, Zhao C, Chen X, Li N, et al. Evaluation of the bactericidal effect of Nd:YAG, Er:YAG, Er,Cr:YSGG laser radiation, and antimicrobial photodynamic therapy (aPDT) in experimentally infected root canals. *Lasers Surg Med.* 2012;44(10):824-31.
- Chiniforush N, Pourhajibagher M, Shahabi S, Kosarieh E, Bahador A. Can Antimicrobial Photodynamic Therapy (aPDT) Enhance the Endodontic Treatment? *Journal of Lasers in Medical Sciences.* 2016;7(2):76-85.
- Clegg MS, Vertucci FJ, Walker C, Belanger M, Britto LR. The effect of exposure to irrigant solutions on apical dentin biofilms in vitro. *J Endod.* 2006;32(5):434-7.
- Costerton JW, Stewart PS, Greenberg EP. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections. *Science.* 1999;284(5418):1318-22.
- De-Deus G, Belladonna FG, Silva EJNL, Marins JR, Souza EM, Perez R, et al. Micro-CT Evaluation of Non-instrumented Canal Areas with Different Enlargements Performed by NiTi Systems. *Braz Dent J.* 2015;26(6):624-9.
- Deleu E, Meire MA, De Moor RJG. Efficacy of laser-based irrigant activation methods in removing debris from simulated root canal irregularities. *Lasers Med Sci.* 2015;30(2):831-5.
- Demidova TN, Hamblin MR. Effect of cell-photosensitizer binding and cell density on microbial photoinactivation. *Antimicrob Agents Chemother.* 2005;49(6):2329-35.
- Desai P, Himel V. Comparative safety of various intracanal irrigation systems. *J Endod.* 2009;35(4):545-9.
- DiVito E, Peters OA, Olivi G. Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers Med Sci.* 2012;27(2):273-80.
- Dos Santos Antonio MP, Moura-Netto C, Camargo SEA, Davidowicz H, Marques MM, Maranhão de Moura AA. Bactericidal effects of two parameters of Er:YAG laser intracanal irradiation: ex-vivo study. *Lasers Med Sci.* 2012;27(6):1165-8.
- Dunavant TR, Regan JD, Glickman GN, Solomon ES, Honeyman AL. Comparative evaluation of endodontic irrigants against *Enterococcus faecalis* biofilms. *J Endod.* 2006;32(6):527-31.
- Evans M, Davies JK, Sundqvist G, Figdor D. Mechanisms involved in the resistance of *Enterococcus faecalis* to calcium hydroxide. *Int Endod J.* 2002;35(3):221-8.
- Fouad AF. Endodontic Microbiology and Pathobiology: Current State of Knowledge. *Dent Clin North Am.* 2017;61(1):1-15.
- Fransson H, Larsson KM, Wolf E. Efficacy of lasers as an adjunct to chemo-mechanical disinfection of infected root canals: a systematic review. *Int Endod J.* 2013;46(4):296-307.
- Gambarini G, Laszkiewicz J. A scanning electron microscopic study of debris and smear layer remaining following use of GT rotary instruments. *Int Endod J.* 2002;35(5):422-7.
- Garcez AS, Fregnani ER, Rodriguez HM, Nunez SC, Sabino CP, Suzuki H, et al. The use of optical fiber in endodontic photodynamic therapy. Is it really relevant? *Lasers Med Sci.* 2013;28(1):79-85.
- Garcez AS, Nuñez SC, Hamblin 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.
- 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.

- George R, Walsh LJ. Apical extrusion of root canal irrigants when using Er:YAG and Er,Cr:YSGG lasers with optical fibers: an in vitro dye study. *J Endod.* 2008;34(6):706-8.
- George S, Kishen A. Advanced noninvasive light-activated disinfection: assessment of cytotoxicity on fibroblast versus antimicrobial activity against *Enterococcus faecalis*. *J Endod.* 2007;33(5):599-602.
- Ghorbanzadeh A, Aminsobhani M, Sohrabi K, Chiniforush N, Ghafari S, Shamshiri AR, et al. Penetration Depth of Sodium Hypochlorite in Dentinal Tubules after Conventional Irrigation, Passive Ultrasonic Agitation and Nd:YAG Laser Activated Irrigation. *J Lasers Med Sci.* 2016;7(2):105-11.
- Giardino L, Mohammadi Z, Beltrami R, Poggio C, Estrela C, Generali L. Influence of Temperature on the Antibacterial Activity of Sodium Hypochlorite. *Braz Dent J.* 2016;27(1):32-6.
- Giovanni O, Rolando C, Giuseppe L, Vasilios K. Le laser en endodontie (Partie I). *DT STUDY CLUB Le magazine.* 2013;(2):48-51.
- Golob BS, Olivi G, Vrabec M, El Feghali R, Parker S, Benedicenti S. Efficacy of Photon-induced Photoacoustic Streaming in the Reduction of *Enterococcus faecalis* within the Root Canal: Different Settings and Different Sodium Hypochlorite Concentrations. *J Endod.* 2017;43(10):1730-5.
- Gomes BP, Ferraz CC, Vianna ME, Berber VB, Teixeira FB, Souza-Filho FJ. In vitro antimicrobial activity of several concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate in the elimination of *Enterococcus faecalis*. *Int Endod J.* 2001;34(6):424-8.
- Gomes BPFA, Pinheiro ET, Gadê-Neto CR, Sousa ELR, Ferraz CCR, Zaia AA, et al. Microbiological examination of infected dental root canals. *Oral Microbiol Immunol.* 2004;19(2):71-6.
- Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M. Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J.* 2003;36(6):411-7.
- de Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu M-K, Wesselink PR, van der Sluis LWM. Laser-activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization. *Int Endod J.* 2009;42(12):1077-83.
- Gu L, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR. Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices. *J Endod.* 2009;35(6):791-804.
- Gu Y, Perinpanayagam H, Kum DJW, Yoo Y-J, Jeong J-S, Lim S-M, et al. Effect of Different Agitation Techniques on the Penetration of Irrigant and Sealer into Dentinal Tubules. *Photomed Laser Surg.* 2017;35(2):71-7.
- Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca J-P, Medioni E, Vescovi P. Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer. *Lasers Med Sci.* 2014;29(1):69-75.
- Guneser MB, Arslan D, Usumez A. Tissue dissolution ability of sodium hypochlorite activated by photon-initiated photoacoustic streaming technique. *J Endod.* 2015;41(5):729-32.
- Haapasalo M, Shen Y, Wang Z, Gao Y. Irrigation in endodontics. *Br Dent J.* 2014;216(6):299-303.
- Hauser V, Braun A, Frentzen M. Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *Int Endod J.* 2007;40(8):644-52.
- Haute Autorité de Santé. Haute Autorité de santé. Service d'évaluation des actes professionnels. Traitement endodontique. Rapport d'évaluation technologique. [Internet]. 2008. Disponible sur: <http://www.has-sante.fr>
- He H, Yu J, Song Y, Lu S, Liu H, Liu L. Thermal and morphological effects of the pulsed Nd:YAG laser on root canal surfaces. *Photomed Laser Surg.* 2009;27(2):235-40.

- Jiang L-M, Lak B, Eijsvogels LM, Wesselink P, van der Sluis LWM. Comparison of the cleaning efficacy of different final irrigation techniques. *J Endod.* 2012;38(6):838-41.
- Johns DA, Shivashankar VY, Krishnamma S, Johns M. Use of photoactivated disinfection and platelet-rich fibrin in regenerative Endodontics. *J Conserv Dent.* 2014;17(5):487-90.
- Keles A, Kamalak A, Keskin C, Akçay M, Uzun İ. The efficacy of laser, ultrasound and self-adjustable file in removing smear layer debris from oval root canals following retreatment: A scanning electron microscopy study. *Aust Endod J.* 2016;42(3):104-11.
- Khademi AA, Mohammadi Z, Havaee A. Evaluation of the antibacterial substantivity of several intracanal agents. *Aust Endod J.* 2006;32(3):112-5.
- Kim S, Kim S, Park J-W, Jung I-Y, Shin S-J. Comparison of the Percentage of Voids in the Canal Filling of a Calcium Silicate-Based Sealer and Gutta Percha Cones Using Two Obturation Techniques. *Materials (Basel).* 2017;10(10):53-6.
- Konopka K, Goslinski T. Photodynamic therapy in dentistry. *J Dent Res.* 2007;86(8):694-707.
- Körstgens V, Flemming HC, Wingender J, Borchard W. Uniaxial compression measurement device for investigation of the mechanical stability of biofilms. *J Microbiol Methods.* 2001;46(1):9-17.
- Lana MA, Ribeiro-Sobrinho AP, Stehling R, Garcia GD, Silva BK, Hamdan JS, et al. Microorganisms isolated from root canals presenting necrotic pulp and their drug susceptibility in vitro. *Oral Microbiol Immunol.* 2001;16(2):100-5.
- Lange-Nielsen F. [Anaphylaxis emergency]. *Tidsskr Nor Laegeforen.* 1976;96(16):946-7.
- Lee AHC, Cheung GSP, Wong MCM. Long-term outcome of primary non-surgical root canal treatment. *Clin Oral Investig.* 2012;16(6):1607-17.
- Lloyd A, Uhles JP, Clement DJ, Garcia-Godoy F. Elimination of intracanal tissue and debris through a novel laser-activated system assessed using high-resolution micro-computed tomography: a pilot study. *J Endod.* 2014;40(4):584-7.
- Love RM. *Enterococcus faecalis*--a mechanism for its role in endodontic failure. *Int Endod J.* 2001;34(5):399-405.
- Macedo RG, Wesselink PR, Zaccheo F, Fanali D, Van Der Sluis LWM. Reaction rate of NaOCl in contact with bovine dentine: effect of activation, exposure time, concentration and pH. *Int Endod J.* 2010;43(12):1108-15.
- Machtou P. Irrigation et désinfection en endodontie. In: *Endodontie. CdP; 2012. (JPIO).*
- Machtou P, Bensoussan D, Cohen A, Hartmann A, Klinghofer A, Mandel E, et al. *Endodontie. CdP. Paris: CdP; 1993.*
- Mah T-F. Biofilm-specific antibiotic resistance. *Future Microbiol.* 2012;7(9):1061-72.
- Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Dall'Asta L, Cianconi L. FESEM evaluation of smear layer removal using different irrigant activation methods (EndoActivator, EndoVac, PUI and LAI). An in vitro study. *Clin Oral Investig.* 2018;22(2):993-9.
- Marending M, Luder HU, Brunner TJ, Knecht S, Stark WJ, Zehnder M. Effect of sodium hypochlorite on human root dentine--mechanical, chemical and structural evaluation. *Int Endod J.* 2007;40(10):786-93.
- Martin D. Irrigation en Endodontie. *Dossiers ADF; 2012.*

Martins JNR, Ordinola-Zapata R, Marques D, Francisco H, Caramês J. Differences in root canal system configuration in human permanent teeth within different age groups. *Int Endod J*. 2018;

Meire MA, De Prijck K, Coenye T, Nelis HJ, De Moor RJG. Effectiveness of different laser systems to kill *Enterococcus faecalis* in aqueous suspension and in an infected tooth model. *Int Endod J*. 2009;42(4):351-9.

Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R. The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy--a new concept of endodontic files and its implementation. *J Endod*. 2010;36(4):679-90.

Miller TA, Baumgartner JC. Comparison of the antimicrobial efficacy of irrigation using the EndoVac to endodontic needle delivery. *J Endod*. 2010;36(3):509-11.

Mohammadi Z. Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J*. 2008;58(6):329-41.

Mohammadi Z, Jafarzadeh H, Shalavi S, Kinoshita J-I. Photodynamic Therapy in Endodontics. *J Contemp Dent Pract*. 2017;18(6):534-8.

Mohammadi Z, Palazzi F, Giardino L, Shalavi S. Microbial biofilms in endodontic infections: an update review. *Biomed J*. 2013;36(2):59-70.

Moon Y-M, Kim H-C, Bae K-S, Baek S-H, Shon W-J, 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.

Neuhaus KW, Liebi M, Stauffacher S, Eick S, Lussi A. Antibacterial Efficacy of a New Sonic Irrigation Device for Root Canal Disinfection. *J Endod*. 2016;42(12):1799-803.

Ng Y-L, Mann V, Rahbaran S, Lewsey J, Gulabivala K. Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature - part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *Int Endod J*. 2007;40(12):921-39.

Nielsen BA, Craig Baumgartner J. Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals. *J Endod*. 2007;33(5):611-5.

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.

Paqué F, Ganahl D, Peters OA. Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography. *J Endod*. 2009a;35(7):1056-9.

Pasqualini D, Cuffini AM, Scotti N, Mandras N, Scalas D, Pera F, et al. Comparative evaluation of the antimicrobial efficacy of a 5% sodium hypochlorite subsonic-activated solution. *J Endod*. 2010;36(8):1358-60.

Peciuliene V, Reynaud AH, Balciuniene I, Haapasalo M. Isolation of yeasts and enteric bacteria in root-filled teeth with chronic apical periodontitis. *Int Endod J*. 2001;34(6):429-34.

Peeters HH, Mooduto L. Radiographic examination of apical extrusion of root canal irrigants during cavitation induced by Er,Cr:YSGG laser irradiation: an in vivo study. *Clin Oral Investig*. 2013;17(9):2105-12.

Peters OA, Bardsley S, Fong J, Pandher G, Divito E. Disinfection of root canals with photon-initiated photoacoustic streaming. *J Endod*. 2011;37(7):1008-12.

Pinheiro ET, Gomes BPF, Ferraz CCR, Sousa ELR, Teixeira FB, Souza-Filho FJ. Microorganisms from canals of root-filled teeth with periapical lesions. *Int Endod J*. 2003;36(1):1-11.

- Pirani C, Chersoni S, Montebugnoli L, Prati C. Long-term outcome of non-surgical root canal treatment: a retrospective analysis. *Odontology*. 2015;103(2):185-93.
- Rey G. Utilisation des lasers en endodontie: principes physiques et protocoles opératoires. 2016.
- Rôças IN, Siqueira JF. Comparison of the in vivo antimicrobial effectiveness of sodium hypochlorite and chlorhexidine used as root canal irrigants: a molecular microbiology study. *J Endod*. 2011;37(2):143-50.
- Sabins RA, Johnson JD, Hellstein JW. A comparison of the cleaning efficacy of short-term sonic and ultrasonic passive irrigation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod*. 2003;29(10):674-8.
- Sahar-Helft S, Sarp ASK, Stabholtz A, Gutkin V, Redenski I, Steinberg D. Comparison of positive-pressure, passive ultrasonic, and laser-activated irrigations on smear-layer removal from the root canal surface. *Photomed Laser Surg*. 2015;33(3):129-35.
- Sarkar NK, Caicedo R, Ritwik P, Moiseyeva R, Kawashima I. Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide aggregate. *J Endod*. 2005;31(2):97-100.
- Schilder H. Cleaning and Shaping the Root Canal. *Dental Clinics of North America*. 1974;18(2):269-96.
- Schlafer S, Vaeth M, Hørsted-Bindslev P, Frandsen EVG. Endodontic photoactivated disinfection using a conventional light source: an in vitro and ex vivo study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2010;109(4):634-41.
- Schoop U, Kluger W, Moritz A, Nedjelic N, Georgopoulos A, Sperr W. Bactericidal effect of different laser systems in the deep layers of dentin. *Lasers Surg Med*. 2004;35(2):111-6.
- Simon S, Pertot W-J. Endodontie Volume 1: traitements. CdP. CdP; 2008. (Mémento; vol. 1).
- Singla MG, Garg A, Gupta S. MTAD in endodontics: an update review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2011;112(3):e70-76.
- Siqueira JF. Endodontic infections: concepts, paradigms, and perspectives. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*. 2002;94(3):281-93.
- Siqueira JF, Lima KC, Magalhães FA, Lopes HP, de Uzeda M. Mechanical reduction of the bacterial population in the root canal by three instrumentation techniques. *J Endod*. 1999;25(5):332-5.
- Siqueira JF, Rôças IN, Favieri A, Lima KC. Chemomechanical reduction of the bacterial population in the root canal after instrumentation and irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% sodium hypochlorite. *J Endod*. 2000;26(6):331-4.
- van der Sluis LWM, Gambarini G, Wu MK, Wesselink PR. The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J*. 2006;39(6):472-6.
- van der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int Endod J*. 2007;40(6):415-26.
- Souza LC, Brito PRR, de Oliveira JCM, Alves FRF, Moreira E JL, Sampaio-Filho HR, et al. Photodynamic therapy with two different photosensitizers as a supplement to instrumentation/irrigation procedures in promoting intracanal reduction of *Enterococcus faecalis*. *J Endod*. 2010;36(2):292-6.
- Stabholz A, Sahar-Helft S, Moshonov J. Lasers in endodontics. *Dent Clin North Am*. 2004;48(4):809-832, vi.

- Stojicic S, Zivkovic S, Qian W, Zhang H, Haapasalo M. Tissue dissolution by sodium hypochlorite: effect of concentration, temperature, agitation, and surfactant. *J Endod.* 2010;36(9):1558-62.
- Tay FR, Gu L-S, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L, Zhang K, et al. Effect of vapor lock on root canal debridement by using a side-vented needle for positive-pressure irrigant delivery. *J Endod.* 2010;36(4):745-50.
- Torabinejad M, Handysides R, Khademi AA, Bakland LK. Clinical implications of the smear layer in endodontics: a review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2002;94(6):658-66.
- Torabinejad M, Shabahang S, Apereo RM, Kettering JD. The antimicrobial effect of MTAD: an in vitro investigation. *J Endod.* 2003;29(6):400-3.
- Trindade AC, De Figueiredo JAP, Steier L, Weber JBB. Photodynamic therapy in endodontics: a literature review. *Photomed Laser Surg.* 2015;33(3):175-82.
- Urban K, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S. Canal cleanliness using different irrigation activation systems: a SEM evaluation. *Clin Oral Investig.* 2017;21(9):2681-7.
- Vertucci FJ. Root canal anatomy of the human permanent teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1984;58(5):589-99.
- Vianna ME, Gomes BPFA, Berber VB, Zaia AA, Ferraz CCR, de Souza-Filho FJ. In vitro evaluation of the antimicrobial activity of chlorhexidine and sodium hypochlorite. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2004;97(1):79-84.
- Violich DR, Chandler NP. The smear layer in endodontics - a review. *Int Endod J.* 2010;43(1):2-15.
- Yap B, Zilm PS, Briggs N, Rogers AH, Cathro PC. The effect of sodium hypochlorite on *Enterococcus faecalis* when grown on dentine as a single- and multi-species biofilm. *Aust Endod J.* 2014;40(3):101-10.
- Zehnder M. Root canal irrigants. *J Endod.* 2006;32(5):389-98.
- Zou L, Shen Y, Li W, Haapasalo M. Penetration of sodium hypochlorite into dentin. *J Endod.* 2010;36(5):793-6.

Table des illustrations

Illustration 1: Irrigation in endodontics Haapasalo 2014.....	16
Illustration 2: Tableau récapitulatif des systèmes d'activation	27
Illustration 3: Schéma du fonctionnement du laser.....	30
Illustration 4: Interaction du faisceau laser avec le milieu	31
Illustration 5: Schéma des techniques d'activation par laser (de gauche à droite): irradiation dans un canal sec, PAD, LAI et PIPS.....	37
Illustration 6: Elimination des débris canalaires avec PIPS	42
Illustration 7: Graphique récapitulatif des techniques d'activation	45

**Les opinions émises dans les dissertations présentées doivent être
considérées comme propres à leurs auteurs, sans aucune approbation ni
improbation de la Faculté de Chirurgie Dentaire.**

WASIELEWSKI Cécile. Intérêts du laser dans la désinfection canalaire au cours d'un traitement endodontique. 2018. 55 p., ill., tabl.: Réf. Biblio. : 47-53.

Sous la direction de M. le Docteur Grégoire KUHN

Th : Chir Dent. : Paris 7 : 2018

RESUME:

L'objectif principal du traitement endodontique est la prévention ou la suppression d'une infection du système canalaire, par l'élimination des micro-organismes le colonisant. Le protocole est parfaitement codifié : préparation mécanique, utilisation de solutions de désinfection et scellement étanche. L'irrigation joue un rôle essentiel dans ce processus de nettoyage puisqu'elle permet le retrait de la boue dentinaire et des bactéries.

L'agitation des solutions d'irrigation, aussi appelée activation, permet d'optimiser leur pouvoir solvant et désinfectant. De nos jours, il existe de nombreuses méthodes d'activation mais aucune ne permet la stérilisation complète du réseau canalaire, notamment au niveau du tiers apical. De plus, les innovations technologiques de mise en forme à l'aide d'instruments rotatifs réduisent le temps de préparation, et donc le temps de contact des solutions d'irrigation avec les parois radiculaires.

Le laser, couramment utilisé en endodontie semblerait améliorer la désinfection, en augmentant la pénétration et l'efficacité des solutions d'irrigation. Nous nous proposons ici de présenter son intérêt dans la désinfection canalaire, et de confronter les différentes techniques d'activation. Ainsi, nous tenterons d'évaluer l'apport du laser dans les protocoles actuels et voir comment ils pourraient pallier le faible volume de solution atteignant le tiers apical.

TITRE en anglais: Advantages of the use of laser for root canal disinfection

DISCIPLINE : Odontologie conservatrice-endodontie

MOTS-CLES Français : endodontie (FMeSH) ; lasers (FMeSH) ; désinfection (FMeSH) ; photothérapie (FMeSH) ; irrigation ; activation ;

MOTS-CLES Anglais : endodontics (MeSH) ; lasers (MeSH) ; disinfection (MeSH) ; phototherapy (MeSH) ; irrigation ; agitation
