



HAL
open science

Le laser et les thérapies sur pulpes vivantes : revue de littérature

Thelma Rehel

► **To cite this version:**

Thelma Rehel. Le laser et les thérapies sur pulpes vivantes : revue de littérature. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04753284

HAL Id: dumas-04753284

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04753284v1>

Submitted on 5 Nov 2024

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

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



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

THÈSE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIEDENTAIRE

Année : 2024
Thèse N° : 29050

Le laser et les thérapies sur pulpes vivantes : une revue de littérature.

présentée par

Thelma REHEL

Thèse soutenue le 09 octobre 2024

devant le jury composé de :

Monsieur le Pr Reza ARBAB-CHIRANI

Professeur des universités et praticien hospitalier, Brest
Président

Madame Karen VALLAEYS

Maitre de conférences des universités, praticien hospitalier, Brest
Directrice

Madame Valérie CHEVALIER-HERISSET

Maitre de conférences des universités, praticien hospitalier, Brest
Assesseure

Monsieur Kevin-John FOUILLEN

Maitre de conférences associé, praticien contractuel, Brest
Assesseur

Madame BERBEL Fanny

Praticien contractuel, chirurgien-dentiste libéral, Brest
Invitée

Monsieur Christophe MORVAN

Chirurgien-dentiste libéral, Ploemeur
Invité



FACULTÉ
D'ODONTOLOGIE

UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

PRESIDENT

Monsieur Pascal OLIVARD

DIRECTEUR GENERAL DES SERVICES

Madame Brigitte BONIN

CORPS PROFESSORAL DE L'U.F.R. D'ODONTOLOGIE DE BREST

AU 12/07/2024

Année Universitaire 2024-2025

DOYEN

Madame Sylvie BOISRAMÉ

PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS – PRATICIENS HOSPITALIERS

S56 Odontologie Pédiatrique
S57 Parodontologie
S57 Chirurgie Orale
S58 Dentisterie Restauratrice, Endodontie
S58 Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux

Madame Frédérique d'ARBONNEAU
Monsieur Hervé BOUTIGNY-VELLA
Madame Sylvie BOISRAMÉ
Monsieur Reza ARBAB-CHIRANI
Madame Céline BODERE

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

S56 Odontologie Pédiatrique
S56 Prévention, Épidémiologie, Économie Santé, Odonto légale
S57 Biologie Orale
S58 Dentisterie Restauratrice, Endodontie
S58 Dentisterie Restauratrice, Endodontie
S58 Prothèses
S58 Prothèses
S58 Fonction-Dysfonction, Imagerie, Biomatériaux

Madame Charlotte GOUEDARD
Monsieur Bertrand PIVER
Monsieur Jean-Éric ALARD
Madame Valérie CHEVALIER-HERISSET
Madame Karen VALLAEYS
Monsieur Brice CHAUVEL
Monsieur Vincent JARDEL
Madame Anaïs BONNABESSE

MAITRE DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS

S57 Biologie Orale

Madame Laëtizia LE POTTIER

MAITRE DE CONFÉRENCES ASSOCIÉ

S56 Prévention, Épidémiologie, Économie Santé, Odonto légale

Monsieur Kevin-John FOUILLEN

CHEF DE CLINIQUE DES UNIVERSITÉS – ASSISTANTS DES HOPITAUX

S56 ODF
S57 Chirurgie Orale
S57 Chirurgie Orale
S57-Pardodontologie
S57 Parodontologie
S58 Dentisterie Restauratrice, Endodontie
S58 Dentisterie Restauratrice, Endodontie
S58 Prothèses
S58 Prothèses

Madame Manon LIEVIN
Monsieur Valentin ANDRE
Madame Marie ORLIAGUET
Monsieur Maxime DUMOUCHEL
Madame Amandine QUEMENEUR
Madame Johanna KICHENIN
Monsieur Quentin MARC
Madame Camille BOSSARD
Madame Lorraine CLAPPE

ASSISTANTS ASSOCIÉS

S56 Odontologie Pédiatrique
S57 Biologie Orale

Monsieur Ewen LE DRAST
Madame Vanessa LOBOGNON

Remerciements

A notre président,

Monsieur le Professeur Reza ARBAB-CHIRANI

Docteur en Chirurgie Dentaire

Professeur des universités, Praticien hospitalier

UFR d'odontologie, Université de Bretagne Occidentale, Brest

Pour me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse d'exercice, pour la qualité et la rigueur de votre enseignement. Je vous remercie grandement pour votre implication au sein de la faculté et du service d'Odontologie. Veuillez trouver ici le témoignage de mon plus profond respect.

A ma directrice de thèse,

Madame Karen VALLAEYS

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de conférences des universités, Praticien hospitalier

UFR d'odontologie, Université de Bretagne Occidentale, BREST

Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de diriger ce travail de thèse et de siéger au sein de son jury. Merci pour la pédagogie et la bienveillance dont vous avez fait preuve tout au long de mon cursus. Votre pratique médicale profondément humaine ainsi que la richesse et le partage de vos connaissances m'ont beaucoup apporté. Veuillez trouver ici l'expression de ma gratitude et le témoignage de mon admiration.

A notre assessseure,

Madame Valérie CHEVALIER-HÉRISSET

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maître de conférences des universités, Praticien hospitalier

UFR d'odontologie, Université de Bretagne Occidentale, BREST

J'ai pu apprécier la qualité de votre enseignement et la richesse de votre savoir. Je vous remercie pour votre disponibilité et votre implication au sein de la faculté et du service, et ce tout au long de mon cursus. Veuillez trouver ici l'expression de toute ma gratitude.

A notre assesseur,

Monsieur Kévin-John FOUILLEN

Docteur en Chirurgie Dentaire

Maitre de conférences associé, Praticien contractuel

UFR d'odontologie, Université de Bretagne Occidentale, BREST

Pour me faire l'honneur d'accepter de participer à ce jury de thèse et pour votre bienveillance tout au long de mon cursus. Je vous remercie grandement pour la qualité et la richesse de votre enseignement tant théorique que pratique. J'ai énormément apprécié travailler avec vous. Veuillez trouver ici le témoignage de mon plus profond respect.

A notre invitée,

Madame Fanny BERBEL

Docteur en Chirurgie Dentaire

Praticien contractuel, chirurgien-dentiste libéral

UFR d'odontologie, Université de Bretagne Occidentale, BREST

Pour me faire l'honneur d'accepter de participer à ce jury de thèse et pour votre bienveillance depuis ma deuxième année jusqu'à ma sixième année. Je vous remercie pour le partage de la richesse de votre savoir et la sollicitude à mon égard dont vous avez fait preuve pendant tout mon cursus. Vos encouragements constants ont participé grandement au développement de la confiance en ma pratique clinique. Veuillez trouver ici l'expression de ma gratitude et le témoignage de mon admiration.

A notre invité

Monsieur Christophe MORVAN

Docteur en Chirurgie Dentaire

Chirurgien-dentiste libéral, PLOEMEUR

Il me tenait à cœur de te remercier pour ta présence au sein de ce jury. Je ne trouverai jamais les mots pour exprimer toute ma gratitude pour les valeurs et le savoir que tu m'as transmis, toi et toute l'équipe du cabinet. Merci du fond du cœur de m'avoir fait confiance et de m'avoir donné l'opportunité de travailler dans votre cabinet. Je te remercie sincèrement pour ton investissement dans ma formation de dentiste, ainsi que pour la gentillesse et la confiance que tu m'as accordées tout au long de cette période. Vous êtes, avec Marc et François-Xavier, des exemples de réussite.

À ma mère et mon père, merci pour votre soutien indéfectible, votre amour inconditionnel et votre présence à mes côtés à chaque étape de ma vie. Je vous suis profondément reconnaissante pour les belles valeurs que vous m'avez transmises.

À ma sœur, Marjorie, merci pour ta force, tes convictions, ton amour et ta sensibilité qui m'inspirent chaque jour.

À mes grands-parents, qui m'ont appris l'importance de l'amour et de la valeur du travail.

À Eloi, merci pour ton amour, ta patience, ton soutien constant et ta bienveillance quotidienne.

À Philippe et Florence, qui m'ont aimé et éduqué comme leurs enfants.

À Marine, mon âme-sœur.

À Thomas, Valentin et Fanny, ma famille de cœur.

À mon oncle, merci pour ta confiance et ta grande humilité, et ce, même dans tes remarquables accomplissements.

À ma cousine, Inès, merci pour ces merveilleux moments partagés depuis l'enfance, à ces fous rires dans la rue chez Momo et Cricri et à ces spectacles improvisés dans leur salon.

À mes piliers, Manon ma sensible, Clarisse ma force, Cloé ma spontanée, Sarah ma douceur, Céline ma bienveillante et Éloïse ma généreuse. Merci pour votre amitié sincère, votre bienveillance, et pour la place que vous occupez dans ma vie. À Charli, mon anglaise préférée, qui a vite pris une place dans mon cœur à leurs côtés.

À mes copains, Paul et Mahé merci pour ces moments passés qui ont illuminé ces années d'études, à Enora, Katell, Jeanne, Pauline, Kiki, Guillaume, Jeremy, Flora, Jojo, Hugo, Louise, Paul LV, Ronan, aux Anna(s), et tous les autres, merci pour ces instants précieux vécus ensemble.

À Ines et Camille, mes formidables amies de Lorient.

À l'équipe du cabinet Kerdroual : Christophe, Marc, François-Xavier, Alexia, Muriel, Virginie, Sabrina et Carole, merci pour votre bienveillance, votre affection et votre professionnalisme. J'ai tant appris grâce à vous.

Le laser et les thérapies sur pulpes
vivantes :
Une revue de littérature

Table des matières

Table des illustrations : figures et tableaux	17
FIGURES.....	17
TABLEAUX.....	18
Introduction	19
1. Généralités sur le laser	20
1.1. Le laser : principes généraux et caractéristiques.....	20
1.1.1. Émission stimulée.....	20
1.1.2. Inversion de population.....	20
1.1.3. Cavity optique résonante	21
1.1.4. Mécanismes de pompage.....	21
1.1.5. Milieu actif.....	21
1.1.6. Sélection de la longueur d'onde.....	22
1.1.7. Cohérence.....	22
1.1.8. Mono-chromaticité	22
1.2. Spécificité par rapport à un tissu cible	23
1.2.1 Interactions possibles.....	23
1.2.2 Notion de spectre d'absorption	23
1.2.3 Classification des lasers en fonction de leurs effets	24
1.3. Paramètres du rayonnement laser.....	25
1.4. Sécurité et contre-indications	26
1.4.1 Sécurité.....	26
1.4.2 Contre-indications.....	27
1.5. Système de transmission	27
2. Le laser en endodontie.....	29
2.1. Applications du laser en endodontie.....	29
2.2. Types de laser utilisés en endodontie	29
3. Application du laser sur la thérapie des pulpes vitales.....	31
3.1. Généralités.....	31
3.2. Photobiomodulation.....	31
4. Analyse critique de la littérature sur le laser et les thérapies sur les pulpes vivantes. .35	
4.1. Stratégie de recherche	35
4.2. Sélection des articles.....	35
4.3. Niveau de preuve scientifique des articles inclus dans l'étude.....	36
4.4. Extractions d'informations.....	36
4.5. Résultats et discussion	37
4.5.1 Durée de suivi des études.....	37
4.5.2 Proportion des types de laser utilisés dans les études	37
4.5.3 Résultats des recherches : tableau récapitulatif des études menées en fonction du type d'étude, nombre de dents concernées, traitement réalisé, type de laser, paramètres du laser, durée de l'étude, résultats.....	37
4.5.4 Critères biologiques et histologiques	59
4.5.5 Critères cliniques.....	61

4.5.6 Facteurs liés aux paramètres du laser	62
Conclusion.....	64

Table des illustrations : figures et tableaux

FIGURES

Figure 1: Principe d'absorption, émission spontanée et émission stimulée. (Dilouya et al.).....	20
Figure 2: Schéma de la structure d'un laser. (https://tpelelaser.wordpress.com/category/le-fonctionnement-du-laser/principe-et-fonctionnement/)	21
Figure 3: Cohérence spatiale et temporelle des lasers. (https://www.gatinel.com/recherche-formation/laser/particularites-de-la-lumiere-laser/)	22
Figure 4: Longueur d'onde des principaux lasers utilisés en endodontie. (schéma personnel inspiré de Dilouya et al.).....	22
Figure 5: Interactions possibles entre le laser et un tissu cible. (Dilouya et al.)	23
Figure 6: Rapport entre le coefficient d'absorption des tissus et longueur d'onde des lasers. (Dilouya et al.)	24
Figure 7: Profondeur de pénétration des lasers dans les tissus mous. (Gidel, 2017).....	24
Figure 8: Utilisation du laser en mode focalisé (à gauche) et défocalisé (à droite). (Dilouya et al., 2019)	26
Figure 9: Mode continu et mode pulsé. (Dilouya et al.,2019).....	26
Figure 10: Classification des lasers selon IEC (International Electrotechnical Commission) (tableau personnel).	27
Figure 11: Laser Er:YAG LiteTouch™ (https://scdistribution.fr/laser-erbium-yag/).....	28
Figure 12: Laser Diode ICONE2 EVOLUTION, KAELUX® (https://www.kaelux.com/boutique/laser-diode-icone-2-evolution/)	28
Figure 13: Principales applications du laser en endodontie : coiffage pulpaire, traitement canalaire, pulpotomie et gestion de la douleur. (Huang et al., 2023)	29
Figure 14: Schéma permettant de différencier le laser et le LED ainsi que leurs effets. (schéma personnel inspiré de Galindo, 2019).	32
Figure 15: Schéma expliquant les effets biologiques de la photobiomodulation par laser. (schéma personnel inspiré par Dilouya et al., 2019)	33
Figure 16: Les différents effets histologiques de différents lasers sur le tissu pulpaire dentaire (Afkhami et al., 2023).....	34
Figure 17: Organigramme de sélection des articles faisant référence au laser et les thérapies sur pulpe vivante. (organigramme personnel)	35
Figure 18 : Graphique représentant la part d'articles de niveau scientifique 4, 3 et 2. (graphique personnel)	36
Figure 19: Représentation des différents effets du laser à faible intensité sur l'angiogenèse en fonction des paramètres de laser utilisé. (El Nawam et al., 2019).....	60
Figure 20: Mécanismes de réactions biologiques au sein des cellules pulpaires dentaires porcines induites par l'irradiation aux lasers ER:YAG et diode. (Yamakawa et al., 2018).....	60
Figure 21: Diagramme représentant les températures (en °C) atteintes en fonction de la durée des pulses (SP : short pulse; MSP: medium short pulse; SSP: super short pulse; FFC: fluorescence feedback control) (Baraba et al., 2018).....	63

TABLEAUX

Tableau 1: Effet du laser sur les tissus cibles en fonction de leur composition et coefficient d'absorption (tableau personnel).....	24
Tableau 2: Récapitulatif des caractéristiques et exemples des lasers ablatifs et pénétrants (tableau personnel).	25
Tableau 3: Les principaux lasers utilisés en endodontie : leur longueur d'onde, caractéristiques et application. (tableau personnel).....	30
Tableau 4: Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature et les grades de recommandations. (cours de lecture critique d'article de 5 ^{ème} année)	36
Tableau 5: Durées minimales et maximales des études de l'analyse.	37
Tableau 6: Proportion d'études utilisant le laser diode, Er: YAG, CO ₂ ou Er,Cr:YSGG. (Tableau personnel)	37
Tableau 7: Méthode de mesure utilisée pour catégoriser la réponse inflammatoire et l'épaisseur de pont de dentine (Asgary et al., 2008 modifié par Shalash et al., 2022)	61

Introduction

L'utilisation des lasers en médecine a révolutionné de nombreux domaines, offrant des solutions innovantes et moins invasives pour diverses pathologies. Largement utilisés en oncologie ou encore en dermatologie, ils permettent notamment un traitement ciblé des effets secondaires post-radiothérapie permettant une amélioration de la qualité de vie des patients.

Dans le domaine de la dentisterie, l'utilisation du laser représenterait une avancée significative offrant une alternative moderne aux méthodes traditionnelles.

Introduit pour la première fois dans les années 1960, le laser trouverait progressivement sa place en endodontie grâce à ses avantages multiples.

Il permettrait une désinfection plus efficace des canaux radiculaires, réduirait le besoin d'instruments mécaniques et améliorerait la précision des interventions. Les propriétés antibactériennes et hémostatiques du laser contribueraient à des traitements plus performants et à une cicatrisation accélérée.

De plus, l'utilisation du laser tendrait à minimiser l'inconfort post-opératoire pour les patients, rendant les procédures endodontiques moins invasives et plus confortables.

En somme, l'intégration du laser en endodontie marquerait une révolution technologique, visant à améliorer les résultats cliniques et l'expérience des patients.

La présente étude explore la littérature scientifique actuelle sur l'utilisation des lasers dans le domaine des thérapies sur pulpes vivantes et analyse leur efficacité.

Nous commencerons par une introduction générale sur le laser en rappelant ses principes fondamentaux et ses caractéristiques spécifiques. Cette section comprendra une explication détaillée de l'émission stimulée, de l'inversion de population, de la cavité optique résonante, des mécanismes de pompage, du milieu actif, de la sélection de la longueur d'onde, de la cohérence et de la monochromaticité.

De plus, nous examinerons la spécificité du laser en fonction des tissus cibles, les interactions possibles, la notion de spectre d'absorption, et la classification des lasers en fonction de leurs effets.

Les paramètres du rayonnement laser ainsi que les questions de sécurité et les contre-indications seront également abordés.

Ensuite, nous nous concentrerons sur l'utilisation du laser en endodontie, en discutant de ses applications spécifiques et des types de lasers utilisés dans ce domaine. Une attention particulière sera portée à l'application du laser dans les thérapies sur pulpes vitales, explorant les généralités et le rôle de la photobiomodulation.

Nous procéderons ensuite à une analyse critique de la littérature sur le laser et les thérapies sur pulpes vivantes. Cette partie inclura la stratégie de recherche et sélection des articles, le niveau de preuve scientifique des études incluses, l'extraction des informations, et les résultats obtenus, avec un accent sur la durée de suivi des études et la proportion des types de lasers utilisés.

Enfin, nous discuterons des critères biologiques, histologiques et cliniques ainsi que des facteurs liés aux paramètres du laser, afin de fournir une compréhension complète et critique des implications et des perspectives de l'utilisation du laser en endodontie sur les thérapies sur pulpes vivantes.

1. Généralités sur le laser

1.1. Le laser : principes généraux et caractéristiques.

Le laser, acronyme de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » (Amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement), repose sur plusieurs principes fondamentaux issus de la physique quantique et de l'électrodynamique. (Gidel, 2017 ; Dilouya *et al.*, 2019)

Voici les principaux :

1.1.1. Émission stimulée

L'un des principes clés du laser est l'émission stimulée, un phénomène décrit pour la première fois par Albert Einstein en 1917.

Lorsqu'un atome ou une molécule excitée (dans un état d'énergie plus élevé) rencontre un photon de même énergie que la différence entre son état excité et son état fondamental, il peut être induit à relâcher un photon additionnel, retournant ainsi à son état fondamental.

Les deux photons émis ont la même phase, fréquence et direction, caractéristiques cruciales pour la cohérence du laser. (Figure 1)

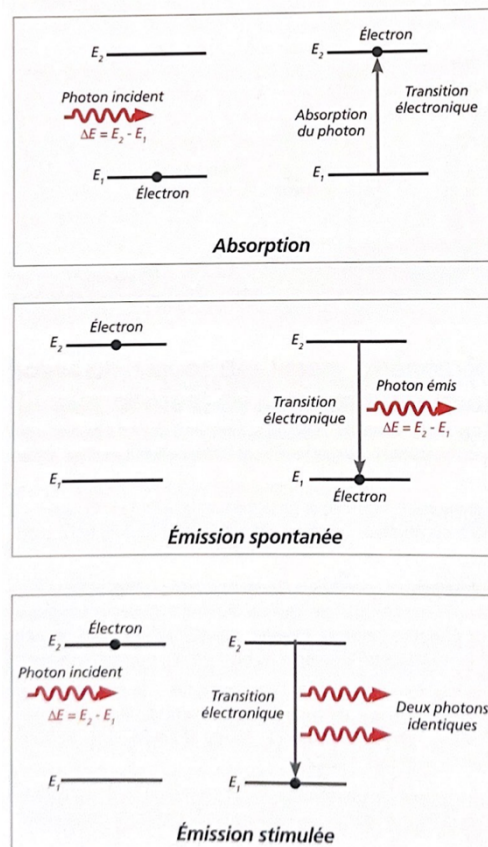


Figure 1: Principe d'absorption, émission spontanée et émission stimulée. (Dilouya *et al.*)

1.1.2. Inversion de population

Pour que l'émission stimulée soit prédominante par rapport à l'absorption, il doit y avoir plus d'atomes ou de molécules dans l'état excité que dans l'état fondamental.

Cette condition est appelée inversion de population. Elle est généralement atteinte grâce à un processus de pompage, qui peut être optique, électrique ou chimique, selon le type de laser.

1.1.3. Cavité optique résonante

Un laser typique comprend une cavité résonante formée par deux miroirs positionnés aux extrémités d'un milieu amplificateur.

Un miroir est totalement réfléchissant, tandis que l'autre est partiellement transparent, permettant à une partie de la lumière de s'échapper sous forme de faisceau laser.

La cavité permet à la lumière de rebondir plusieurs fois à travers le milieu amplificateur (ou milieu actif), renforçant ainsi le processus de d'émission stimulée.

L'idée maîtresse est d'obtenir deux photons identiques à partir d'un seul photon incident. (Figure 1, Figure 2)

1.1.4. Mécanismes de pompage

Le pompage est le processus par lequel les électrons sont excités à un niveau d'énergie supérieur. Il existe plusieurs méthodes de pompage (Figure 2) :

- Optique : il utilise une source de lumière externe pour exciter les électrons.
- Électrique : il utilise une décharge électrique pour exciter les électrons.
- Chimique : il utilise une réaction chimique pour fournir l'énergie nécessaire à l'excitation des électrons.

1.1.5. Milieu actif

Le milieu actif d'un laser est un composant crucial qui détermine ses propriétés de base telles que la longueur d'onde, l'efficacité et la puissance. Il est donc à l'origine des caractéristiques du laser.

C'est le matériau dans lequel se produit l'émission stimulée de photons, conduisant à l'amplification de la lumière. Différents milieux peuvent être utilisés :

- **A gaz (atomiques ou moléculaires) :**

Ils sont souvent utilisés pour leurs longueurs d'onde spécifiques et leur capacité à produire des faisceaux continus ou pulsés.

Par exemple, les lasers hélium-néon (He-Ne) ou à dioxyde de carbone (CO₂).

- **Solides (cristallins ou ioniques) :**

Ils utilisent les cristaux ou des verres dopés avec des ions métalliques. Ils peuvent produire des faisceaux très puissants et sont souvent utilisés en médecine, en industrie et en recherche scientifique.

Par exemple, les lasers à rubis, à néodyme-dopé yttrium-aluminium-garnet (Nd : YAG) ou à titane-saphir.

- **Liquides (à colorants) :**

Ils utilisent des solutions de colorants organiques. Ces lasers sont réglables, c'est-à-dire qu'ils peuvent émettre une gamme de longueurs d'onde en changeant le colorant utilisé.

- **Semi-conducteurs (diode) :**

Ils utilisent des matériaux semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium (GaAs). Ces lasers sont compacts et efficaces.

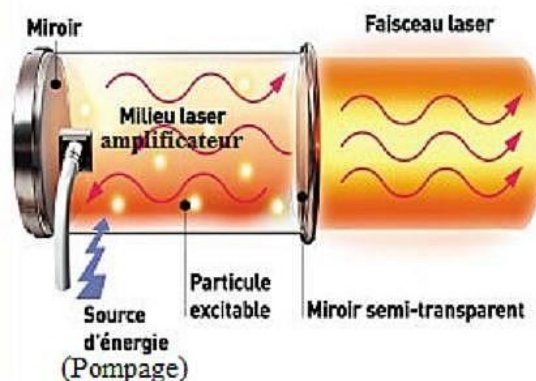


Figure 2: Schéma de la structure d'un laser. (<https://tpelelaser.wordpress.com/category/le-fonctionnement-du-laser/principe-et-fonctionnement/>)

1.1.6. Sélection de la longueur d'onde

La longueur d'onde spécifique du laser est déterminée par le matériau du milieu amplificateur et la configuration de la cavité résonante.

Les miroirs de la cavité sont souvent conçus pour être sélectifs en fréquence, permettant ainsi de favoriser certaines longueurs d'ondes spécifiques.

1.1.7. Cohérence

La lumière du laser est hautement cohérente, à la fois :

- Spatialement (cohérent)
- Temporellement (unidirectionnel)

Cela signifie que les photons sont émis en phase (cohérence temporelle) et voyagent dans la même direction (cohérence spatiale), ce qui donne au faisceau laser sa forme caractéristique. (Figure 3)

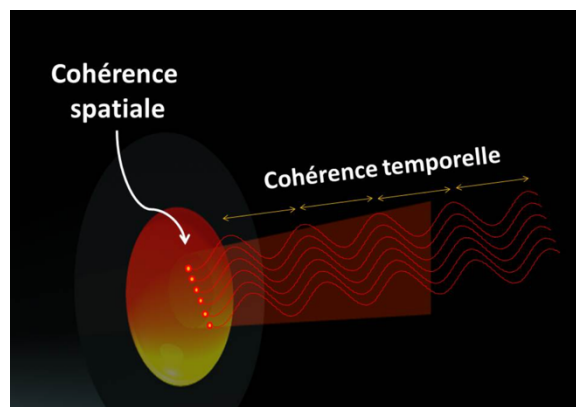
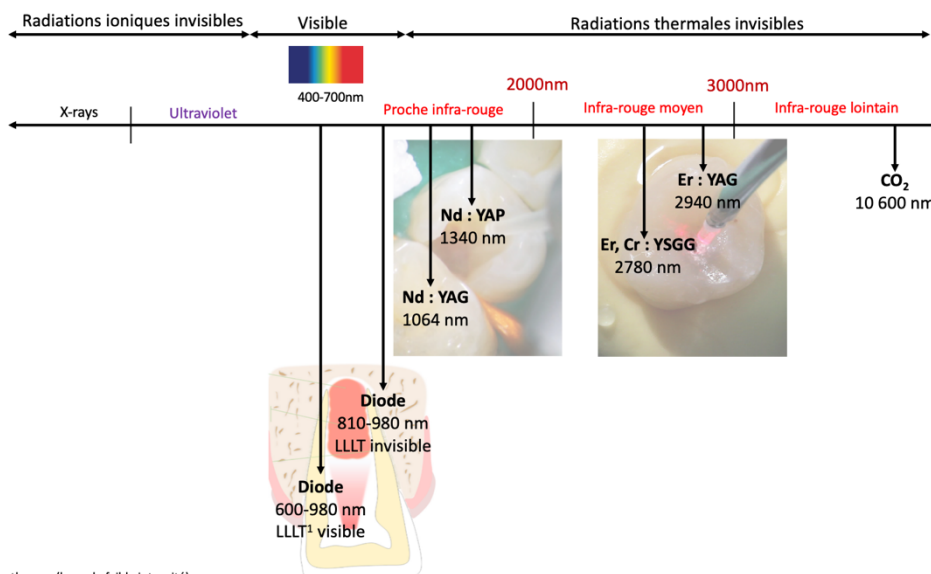


Figure 3: Cohérence spatiale et temporelle des lasers. (<https://www.gatinel.com/recherche-formation/laser/particularites-de-la-lumiere-laser/>)

1.1.8. Mono-chromaticité

Les lasers émettent de la lumière d'une seule longueur d'onde ou d'une bande très étroite de longueurs d'onde, ce qui contraste avec la lumière du domaine du visible qui est généralement composée d'un large spectre de longueurs d'onde. (Figure 4)



¹: Low-level laser therapy (laser de faible intensité)

Figure 4: Longueur d'onde des principaux lasers utilisés en endodontie. (schéma personnel inspiré de Dilouya et al.)

1.2. Spécificité par rapport à un tissu cible

1.2.1 Interactions possibles

Les effets d'un laser dépendent des propriétés optiques du tissu cible et de la longueur d'onde utilisée. La difficulté est de choisir celle la plus adaptée au traitement. Plusieurs interactions tissus-lumières sont possibles (Gidel, 2017; Dilouya *et al.*, 2019)(Figure 5):

- **La réflexion** : aucun effet sur le tissu cible, le rayon est dirigé sur une autre surface.
- **La transmission** : aucun effet sur le tissu cible, le rayon traverse la surface.
- **La diffusion** (ou pénétration ou dispersion) : changement de direction des photons. Ce qui peut occasionner des dégâts s'il n'est pas contrôlé. Cependant, s'il est contrôlé, des effets biostimulants et antalgiques peuvent être observés en raison de l'importante vasodilatation qui se produit.
- **L'absorption** : dépend des caractéristiques des tissus prédictibles par son spectre d'absorption. Plus un tissu absorbe un rayonnement laser, plus on obtient un effet précis, photo-ablatif et sans lésion en profondeur.

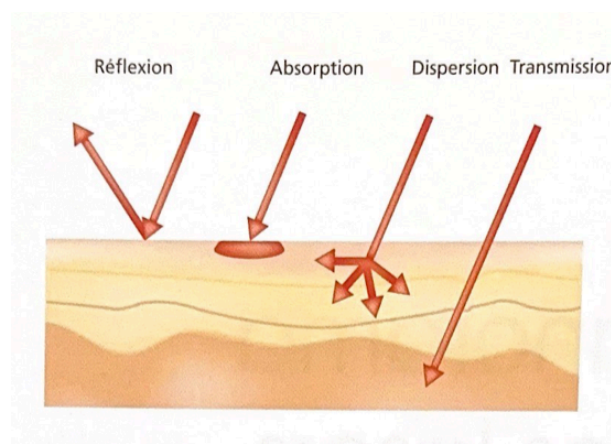


Figure 5: Interactions possibles entre le laser et un tissu cible. (Dilouya *et al.*)

1.2.2 Notion de spectre d'absorption

La notion de spectre d'absorption des tissus cibles est fondamentale pour comprendre comment les lasers interagissent avec les différents types de tissus biologiques. (Figure 6)

Le spectre d'absorption décrit la capacité d'un tissu à absorber la lumière à différentes longueurs d'ondes : chaque groupement moléculaire qui compose un tissu est caractérisé par un spectre d'absorption correspondant au mode de vibration des groupements soumis à une longueur d'onde lumineuse.

Cette absorption dépend des propriétés biochimiques et physiques des composants du tissu.

Un laser aura un effet photo-ablatif sur un tissu cible si sa longueur d'onde coïncide avec le pic d'absorption de ce dernier. (Marques *et al.*, 2019)(Figure 6)

Les tissus mous de la sphère buccale sont majoritairement constitués d'eau et d'hémoglobine, à l'inverse les tissus durs qui contiennent principalement de l'hydroxyapatite. (Gidel, 2017)

Ainsi, par exemple, un coefficient d'absorption élevé dans l'eau entraînera la section des tissus mous (riches en eau), alors qu'un faible coefficient peut entraîner leur nécrose. Un coefficient d'absorption dans l'hémoglobine élevé peut stimuler la coagulation alors qu'à l'inverse, si celui-ci est faible, induira des saignements. (Figure 6)

Coefficient d'absorption	Dans l'eau	Dans l'hémoglobine	Dans l'hydroxyapatite
Élevé	Section des tissus mous riches en eau	Stimulation de la coagulation	Suppression des éléments minéraux
Faible	Nécrose des tissus mous	Saignements	Fusion de la dentine

Tableau 1: Effet du laser sur les tissus cibles en fonction de leur composition et coefficient d'absorption (tableau personnel).

La compréhension du spectre d'absorption des tissus cibles est essentielle pour le choix et l'utilisation efficaces des lasers en endodontie. Cela permet de maximiser l'effet thérapeutique tout en minimisant les effets secondaires, offrant ainsi des traitements plus sûrs, précis et confortables pour les patients.

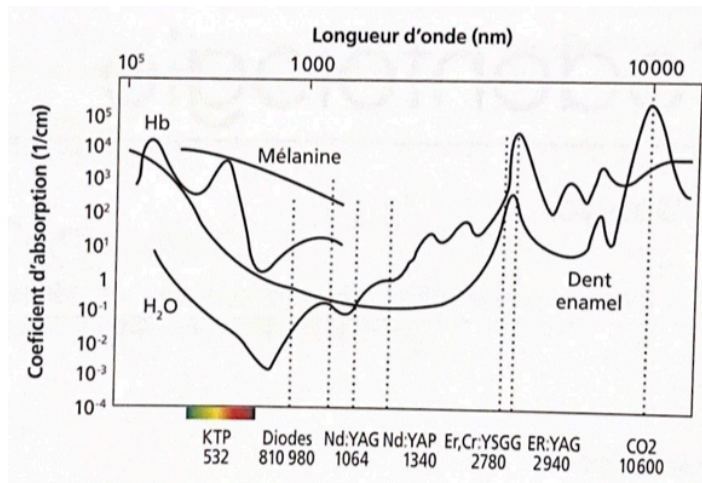


Figure 6: Rapport entre le coefficient d'absorption des tissus et longueur d'onde des lasers. (Dilouya et al.)

1.2.3 Classification des lasers en fonction de leurs effets

Les lasers peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur interaction avec le tissu : les lasers ablatifs et les lasers pénétrants. Ces deux types de lasers ont des caractéristiques distinctes et sont utilisés pour différentes applications cliniques. (Gidel, 2017 ; Dilouya et al., 2019)(Figure 7)

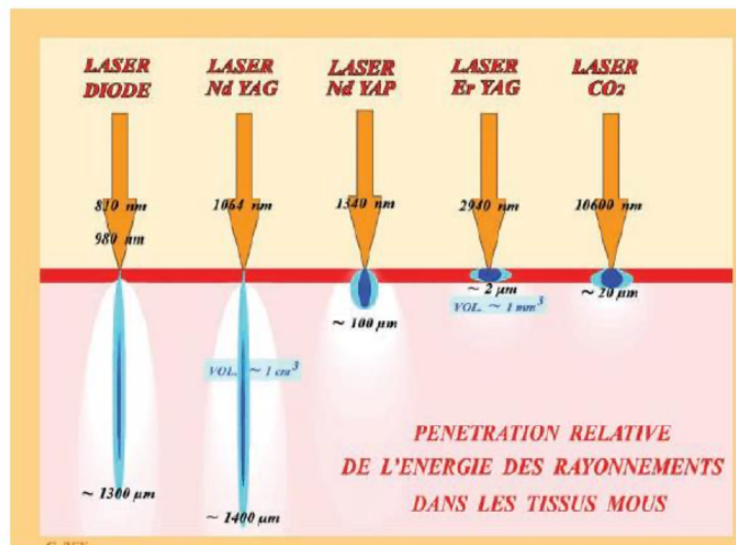


Figure 7: Profondeur de pénétration des lasers dans les tissus mous. (Gidel, 2017)

1.2.3.1 Les lasers ablatifs

Les lasers ablatifs vaporisent les tissus en augmentant rapidement leur température, ce qui entraîne l'évaporation de l'eau contenue dans les tissus et la destruction des cellules. Ils créent des micro-explosions de vapeur, ce qui permet d'enlever des couches de tissu de manière très précise.

Ils sont fortement absorbés par l'eau et sont généralement dans l'infrarouge lointain. La profondeur de pénétration est très superficielle (peu pénétrant), généralement limitée à quelques micromètres.

Ils sont généralement utilisés sur les tissus durs.

Exemples : laser Er: YAG, CO₂, etc. (Figure 7)

1.2.3.2 Les lasers pénétrants

Les lasers pénétrants délivrent leur énergie plus profondément dans les tissus permettant des effets thermiques à des niveaux plus internes. Ils sont souvent utilisés pour coaguler, désinfecter ou traiter les tissus sous-jacents sans ablation significative de la surface.

Ils sont moins absorbés par l'eau mais bien absorbés par d'autres chromophores tels que l'hémoglobine. Ils sont souvent dans le proche infra-rouge.

La profondeur de pénétration est beaucoup plus profonde, de l'ordre de plusieurs millimètres.

L'effet thermique de ces lasers est beaucoup plus important que pour les lasers ablatifs.

Exemple : diode. (Figure 7)

1.2.3.3 Tableau récapitulatif

	ABLATIFS	PÉNÉTRANTS
Absorption	Fortement absorbés par le tissu cible (peu pénétrants)	Peu absorbés par le tissu cible (peu ablatifs)
Mode d'action	Enlèvent le tissu par vaporisation.	Pénètrent plus profondément pour chauffer et coaguler les tissus sans les enlever.
Profondeur de pénétration	Interaction superficielle.	Interaction plus profonde, effets sur les couches internes du tissu.
Application clinique	Procédures d'ablation précise de tissu.	Procédures de coagulation et désinfection en profondeur, biostimulation et antalgique.
Effet thermique	Intense mais superficiel.	Distribué plus largement dans le tissu cible.
Exemple	Er: YAG	Diode

Tableau 2: Récapitulatif des caractéristiques et exemples des lasers ablatifs et pénétrants (tableau personnel).

1.3. Paramètres du rayonnement laser

Le laser se compose de trois paramètres :

- Une longueur d'onde unique (monochromatique), en mètre (m).
- Une énergie, qui se mesure en joules (J).
- La taille du faisceau lumineux, étroit (en mode focalisé) ou large en halo (mode défocalisé). (Figure 8)

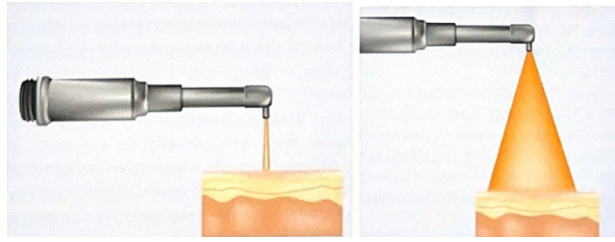


Figure 8: Utilisation du laser en mode focalisé (à gauche) et défocalisé (à droite). (Dilouya et al., 2019)

Le mode d'émission est lié à la notion de puissance. La puissance émise par un laser peut se mesurer en watts (W) qui correspond au taux d'énergie (en joules) par secondes. (Dilouya et al., 2019)

On peut distinguer 3 modes d'utilisation du laser :

- **Mode continu** : la radiation laser est émise en permanence. La puissance instantanée sera constante.
- **Mode discontinu** : la radiation laser est émise de façon discontinue avec un temps de repos suivi d'un temps d'émission.
- **Mode pulsé** : trois types de puissance seront définis dans ce cas. (Figure 9)
 - ↳ La puissance de crête : qui est la puissance maximale instantanée.
 - ↳ La puissance impulsionnelle : qui est la puissance moyenne d'une impulsion.
 - ↳ La puissance moyenne : qui est la puissance moyenne générale d'un période comprenant l'impulsion et le temps de repos.

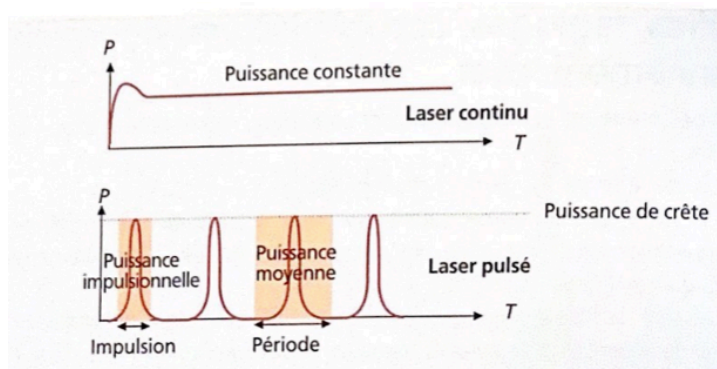


Figure 9: Mode continu et mode pulsé. (Dilouya et al., 2019)

1.4. Sécurité et contre-indications

1.4.1 Sécurité

La classification des lasers a été développée par plusieurs organismes internationaux et nationaux pour garantir la sécurité de leur utilisation. Les systèmes de classification les plus largement reconnus et utilisés sont ceux établis par l'International Electrotechnical Commission (IEC) et l'American National Standards Institute (ANSI). (Figure 10)

La majorité des laser en médecine étant de classe IV, il convient de mettre en place des précautions liées à l'utilisation du laser. La législation française interdit l'utilisation de lasers de classe supérieure à 2 en dehors d'une liste d'usages spécifiques autorisés. (Figure 10)

Classe 1	Lasers sans danger, à condition de les utiliser dans des conditions raisonnables prévisibles (exemple : imprimantes, lecteurs DVD...).
Classe 1M	Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments optiques, peut être dangereuse.
Classe 1C	Appareils lasers destinés à être appliqués en contact avec la cible prévue, les protections empêchant la fuite d'un rayonnement.
Classe 2	Lasers qui émettent un rayonnement visible dans la gamme de longueurs de 400 à 700nm. La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral, clignement de la paupière (par exemple, lecteurs de code barre).
Classe 2M	Lasers qui émettent un rayonnement visible de la gamme de longueurs de 400 à 700nm. Lasers dont la vision directe dans le faisceau, notamment à l'aide d'instruments optiques, peut être dangereuse (exemples : loupes et télescopes)
Classe 3R	Lasers dont l'exposition directe dépasse l'Exposition Maximale Permise (EMP) pour l'œil, mais dont le niveau d'émission est limité à cinq fois la Limite d'Émission Accessible (LEA) des classes 1 et 2. L'exposition oculaire peut être dangereuse dans la condition la plus défavorable.
Classe 3B	Lasers dont la vision directe du faisceau est toujours dangereuse. La vision de réflexions diffuses est normalement sans danger.
Classe 4	Lasers qui sont capables de produire des réflexions diffuses et dangereuses. Ils peuvent causer des dommages sur la peau et peuvent également constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requiert des précautions extrêmes. ⇒ Une grande majorité des lasers médicaux sont des lasers de classe 4.

Figure 10: Classification des lasers selon IEC (International Electrotechnical Commission) (tableau personnel).

1.4.2 Contre-indications

En 2010, la conférence de l'Association nord-américaine de thérapie au laser a organisé une réunion de consensus sur la sécurité et contre-indications de l'utilisation des lasers. Leurs principales recommandations rapportées étaient les suivantes (Carroll *et al.*, 2014) :

- Prévention du risque oculaire

Le laser ou la LED ne doivent pas être dirigés vers les yeux. Toutes les personnes présentes dans la pièce (praticien, assistante et patient) doivent porter des lunettes adaptées à la longueur d'onde du laser utilisé.

- Cancer

Il est déconseillé de traiter les zones présentant un carcinome primaire et toute métastase secondaire sauf si le patient est en cours de chimiothérapie. La technologie pourra toutefois être appliquée dans le cas où le patient est en phase terminale pour un recours palliatif.

- Grossesse

Par précaution, il ne faut pas traiter directement le fœtus en développement, les conséquences n'étant pas documentées.

- Épilepsie

Certains lasers ou LED qui sont pulsés peuvent déclencher une crise chez un patient épileptique photosensible.

1.5. Système de transmission

Le système de transmission du laser en endodontie est conçu pour permettre une application précise et efficace de l'énergie du laser, notamment dans les canaux radiculaires étroits et complexes de la dent.

- **Source de laser** : La source de laser émet le faisceau lumineux. En endodontie, les types de lasers couramment utilisés incluent les lasers à diode et Er: YAG (Erbium, yttrium, aluminium, grenat).

- **Fibre optique** : La lumière laser est transmise de la source à la dent via une fibre optique. La fibre optique est flexible, ce qui permet une manipulation facile et une précision accrue pour atteindre les parties les plus inaccessibles du système canalaire. Les fibres optiques sont généralement de très petit diamètre pour s'adapter aux dimensions étroites des canaux radiculaires.

Pour le laser diode, la fibre optique est de 200µm en endodontie alors que pour le laser Er: YAG le diamètre est compris entre 200 et 400µm. (Nunzi, 2018)(Figure 11, Figure 12)

- **Système de contrôle** : Un panneau de contrôle permet de régler les paramètres du laser tels que la puissance, la durée d'impulsion, et la fréquence. Ces réglages sont cruciaux pour adapter le traitement à la situation clinique spécifique et pour optimiser les résultats tout en minimisant les risques de dommages aux tissus environnants. Le laser diode est en général un appareil compact de petite taille contrairement aux autres lasers tels que le Er: YAG par exemple qui prend plus de place. (Baraba *et al.*, 2018; Nunzi, 2018)(Figure 11, Figure 12, Figure 21)



Figure 11: Laser Er:YAG LiteTouch™ (<https://scdistribution.fr/laser-erbium-yag/>)



Figure 12: Laser Diode ICONE2 EVOLUTION, KAELUX® (<https://www.kaelux.com/boutique/laser-diode-icone-2-evolution/>)

2. Le laser en endodontie

2.1. Applications du laser en endodontie

Les lasers ont de nombreuses applications en endodontie notamment (Figure 13, Figure 16) :

- **Le traitement radiculaire** : mise en forme canalaire, activation de l'irrigation, traitement de surface des tenons fibrés, retrait de matériaux d'obturation.
- **Les thérapies sur pulpes vivantes** : coiffages pulpaire directs et indirects, pulpotomie et revascularisation.
- **La gestion de la douleur**
- **Le traitement des hypersensibilités**
- **La chirurgie endodontique**

(Huang *et al.*, 2023)

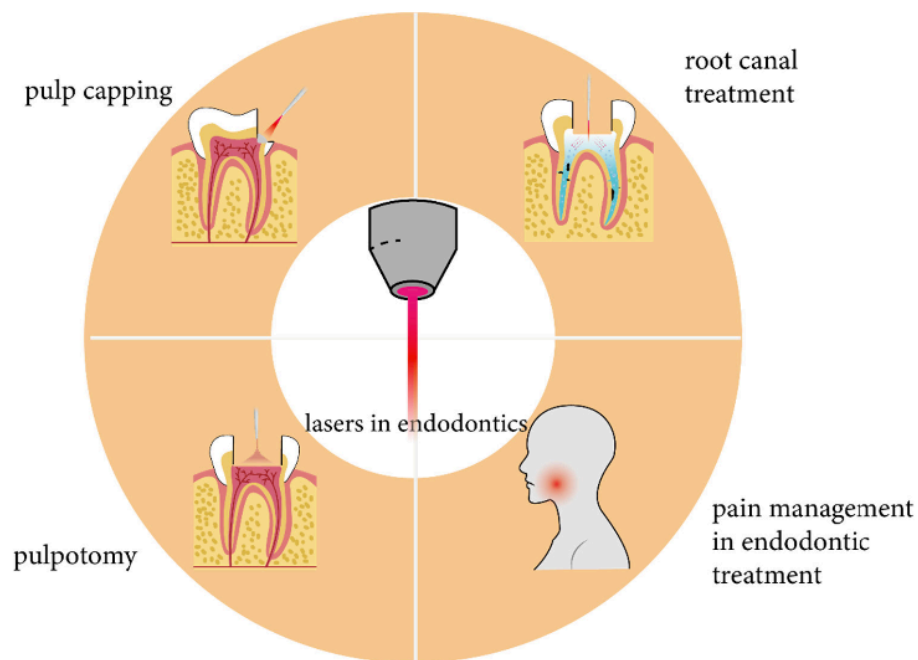


Figure 13: Principales applications du laser en endodontie : coiffage pulpaire, traitement canalaire, pulpotomie et gestion de la douleur. (Huang *et al.*, 2023)

2.2. Types de laser utilisés en endodontie

Les lasers couramment utilisés en endodontie comprennent (Tableau 3, Figure 16) :

- Erbium : yttrium- aluminum-grenat (Er: YAG)
- Erbium, chromium-doped-yttrium scandium gallium garnet (Er,Cr: YSGG)
- Neodymium-doped yttrium aluminum garnet (Nd: YAG)
- Neodymium-yttrium aluminum perovskite (Nd:YAP)
- Dioxyde de carbone (CO₂)
- Diode

(Huang *et al.*, 2023)

Type de LASER	Longueur d'onde	Caractéristiques	Application
Er: YAG	2940nm	Facilement absorbés par l'hydroxyapatite Ablation + élimination des tissus durs	Traitements radiculaires Pulpotomie Coiffage pulpaire
Er, Cr :YSGG	2780nm		
Nd : YAG	1064nm	Diffusion et pénétration de l'énergie dans les tissus biologiques adjacents Incapacité à couper des tissus durs	Irrigation canalaire
Nd : YAP	1340nm	Facilement absorbé par des tissus foncés, métaux et eau Transfert d'énergie dans les canaux incurvés (flexibilité de la fibre optique ++)	Élimination de la smear layer sur les parois canalaire
CO₂	10, 600nm	Facilement absorbé par l'émail et la dentine Hémostase	Coiffage pulpaire direct Élimination des micro-organismes dans les canaux
Diode	810-980nm	Bonne pénétration Agit sur les micro-organismes dans les tubuli dentinaires Divergence : faibles propriétés optiques.	Réduction des douleurs endodontiques post-interventionnelles (diminution des flare-up)
	600 à 980nm	Laser de faible intensité Augmente l'activité métabolique Agit sur la régénération et l'inflammation	Photobiomodulation

Tableau 3: Les principaux lasers utilisés en endodontie : leur longueur d'onde, caractéristiques et application. (tableau personnel)

3. Application du laser sur la thérapie des pulpes vitales

3.1. Généralités

La thérapie pulpaire vitale (ou VPT) vise principalement à préserver la vitalité du tissu pulpaire exposé à des caries, traumatismes ou restaurations.

Divers instruments, dont le laser, sont utilisés pour optimiser ce traitement. Conserver la vitalité de la dent permet d'éviter le traitement canalaire, réduisant ainsi le risque d'infections et de fractures qui en résulterait. (Afkhami *et al.*, 2023)

Elle ne se limite pas aux dents permanentes immatures, mais s'applique également aux dents permanentes matures avec apex fermé ainsi qu'aux dents lactéales.

De ce fait, les jeunes patients comme les personnes âgées peuvent bénéficier de ce type de traitement.

Le choix de la procédure VPT dépend du degré d'inflammation pulpaire et donc de proportion d'atteinte de la pulpe :

- Coiffage pulpaire indirect : la couche la plus profonde de dentine cariée (au préalable nettoyée et décontaminée) est recouverte d'un matériau bioactif et biocompatible.
- Coiffage pulpaire direct : réalisé lorsque le tissu pulpaire exposé est sain et le saignement contrôlé. La pulpe est mise en contact avec un matériau bioactif et biocompatible. Aboutit plus ou moins à la formation d'un pont dentinaire réparateur.
- Pulpotomie (partielle ou complète) : partielle lorsque le tissu pulpaire est retiré sur environ 2mm et complète lorsque la totalité de la pulpe camérale est retirée.

3.2. Photobiomodulation

La thérapie de photobiomodulation induite par laser (PBMT), qui regroupe différents lasers et lumières LED à faible densité énergétique, est proposée pour améliorer le potentiel de régénération des tissus de la pulpe dentaire. (Yong *et al.*, 2023)

Cette thérapie consiste à l'application directe de lumière issue d'un laser ou d'un système de diodes électroluminescentes (LED) pour stimuler la réponse cellulaire. Cela vise à favoriser la cicatrisation des tissus, réduire l'inflammation et produire une action antalgique, le tout sans échauffement tissulaire. (Carroll *et al.*, 2014; De Freitas and Hamblin, 2016)(Figure 14)

Largement utilisée en oncologie et en dermatologie, l'irradiation stimulerait la différenciation et la prolifération cellulaire, la production d'ATP, la respiration mitochondriale, la synthèse de protéines et donc favoriserait la régénération tissulaire (lorsque les paramètres sont adéquats).(Yong *et al.*, 2023)(Figure 15)

Dans notre étude, nous avons choisi de nous concentrer sur l'utilisation du laser et la photobiomodulation.

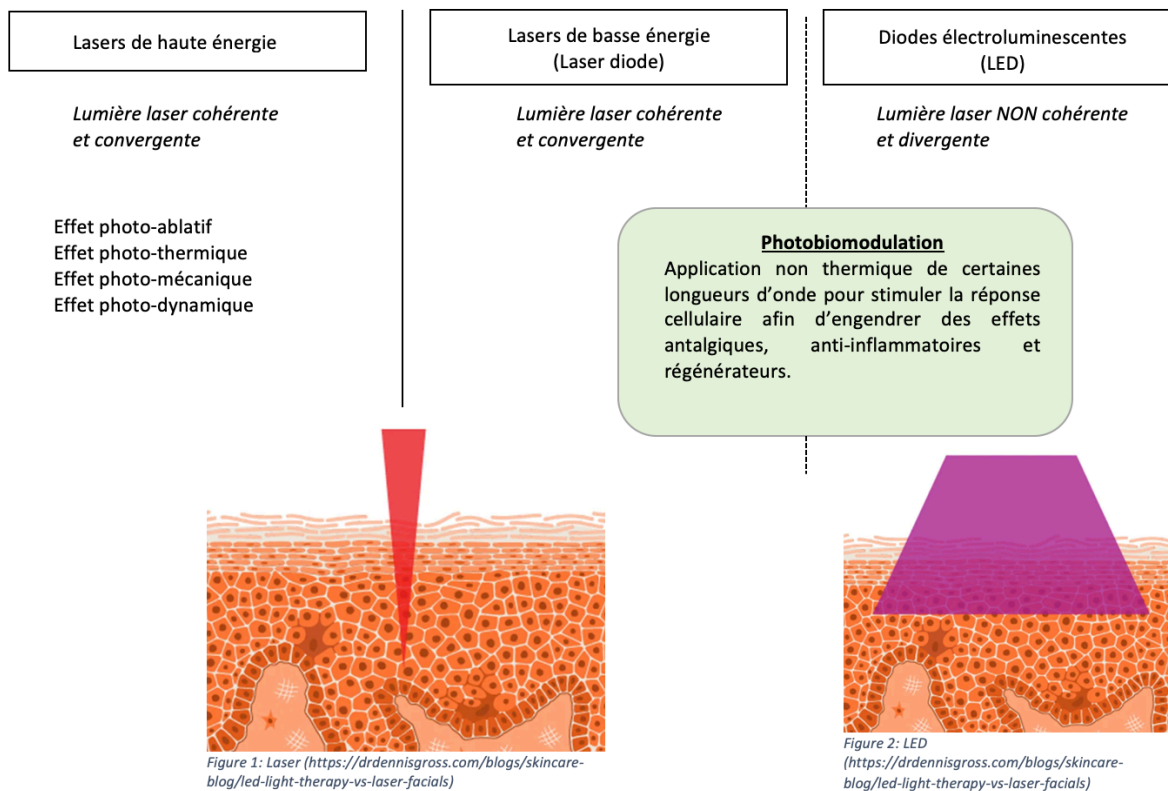


Figure 14: Schéma permettant de différencier le laser et le LED ainsi que leurs effets. (schéma personnel inspiré de Galindo, 2019).

Le laser de faible intensité (ou LLL : low laser level) est une nouvelle technologie qui augmente l'activité métabolique et promet des résultats en matière de régénération osseuse et cicatrisation. On parle également de biostimulation, photothérapie ou photo-biomodulation.

Les lasers de faible intensité :

- Possèdent un niveau d'énergie inférieur à **500mW**.
- Sont souvent irradiés dans le spectre visible **rouge** ou **infra-rouge** (de 600 à 1100nm).
- Ont une densité d'énergie variant **de 0,04 à 50 J/Cm²**.

Les principaux lasers utilisés pour cette technique sont les lasers diode. (De Freitas and Hamblin, 2016; El Nawam *et al.*, 2019; Asnaashari *et al.*, 2022; Afkhami *et al.*, 2023)

Contrairement aux thérapies laser qui fonctionnent sur des mécanismes ablatifs ou thermiques, la photobiomodulation utilise des mécanismes photochimiques où la lumière agit sur les cellules pour stimuler les systèmes enzymatiques mitochondriaux. (Afkhami *et al.*, 2023)(Figure 15)

Au niveau cellulaire, la lumière laser est absorbée par la chaîne respiratoire mitochondriale, le cytochrome C oxydase. (Asnaashari *et al.*, 2022)

Dans certaines études, de nombreux avantages ont été montrés (Figure 15, Figure 16) :

- Elle pourrait contrôler et diminuer l'inflammation via plusieurs mécanismes :
 - En inhibant l'expression et la libération de médiateurs pro-inflammatoires. (De Freitas and Hamblin, 2016; Afkhami *et al.*, 2023)
 - En diminuant l'infiltration des neutrophiles et le volume de l'œdème inflammatoire.(Alsofi *et al.*, 2022; Afkhami *et al.*, 2023)
- Elle favoriserait le processus de cicatrisation :

- En induisant une vasodilatation qui améliorerait la circulation sanguine locale et donc une oxygénation des tissus. (De Freitas and Hamblin, 2016; El Nawam *et al.*, 2019; Afkhami *et al.*, 2023)
- En accélérant le métabolisme local. (Afkhami *et al.*, 2023)
- En favorisant l'angiogenèse. (El Nawam *et al.*, 2019; Afkhami *et al.*, 2023)

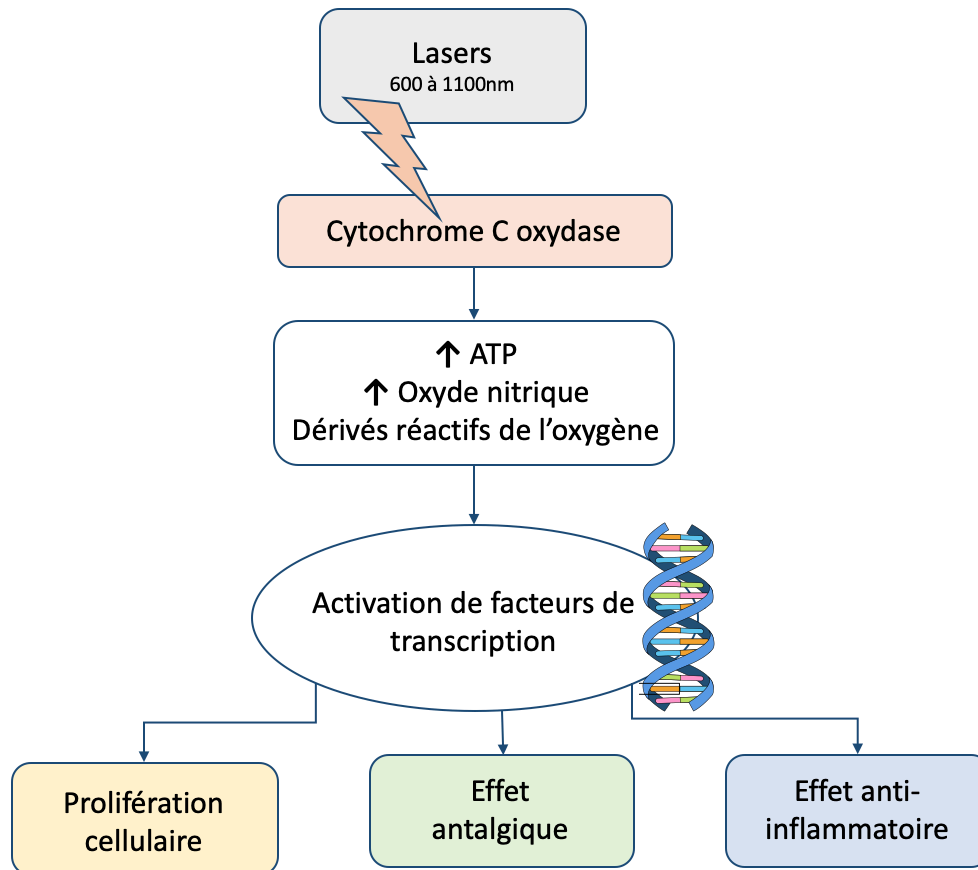


Figure 15: Schéma expliquant les effets biologiques de la photobiomodulation par laser. (schéma personnel inspiré par Dilouya *et al.*, 2019)

La photobiomodulation se distingue de la thérapie photodynamique :

- La thérapie photodynamique : elle consiste en l'irradiation d'un agent photosensibilisant avec une lumière de faible intensité. En présence d'oxygène, cela génère des espèces cytotoxiques qui provoquent la destruction cellulaire, ayant ainsi un effet antimicrobien.
- La thérapie par photobiomodulation : par stimulation de la chaîne mitochondriale avec une lumière de longueur d'onde spécifique et de faible intensité, favorise la régénération cellulaire et la formation de nouveaux tissus. Cela inclut la prolifération cellulaire, l'activation de la microcirculation et la formation de capillaires sanguins, ainsi que des effets anti-inflammatoires et analgésiques.

(Deluca *et al.*, 2021)

Les puissances laser étant généralement faibles dans ce type de thérapie, il n'y a pas de problème de chaleur, de son ou de vibration.

Cependant, l'utilisation de puissances excessivement élevées quel que soit le laser peut causer des dommages importants au niveau pulpaire.

Ainsi, au-dessus de 5,5°C d'élévation thermique, il a été observé une dégénérescence des odontoblastes pulpaire. (Asnaashari *et al.*, 2022)

Les paramètres d'irradiations doivent donc être optimisés cliniquement pour chaque type de laser et son application dentaire.

La thérapie par photobiomodulation a été proposée par (Marques *et al.*, 2019) comme étant « le 4^{ème} élément de l'ingénierie tissulaire avec les cellules souches, les « scaffold » (support matériel permettant l'adhésion initiale des cellules) et les facteurs de croissance ».

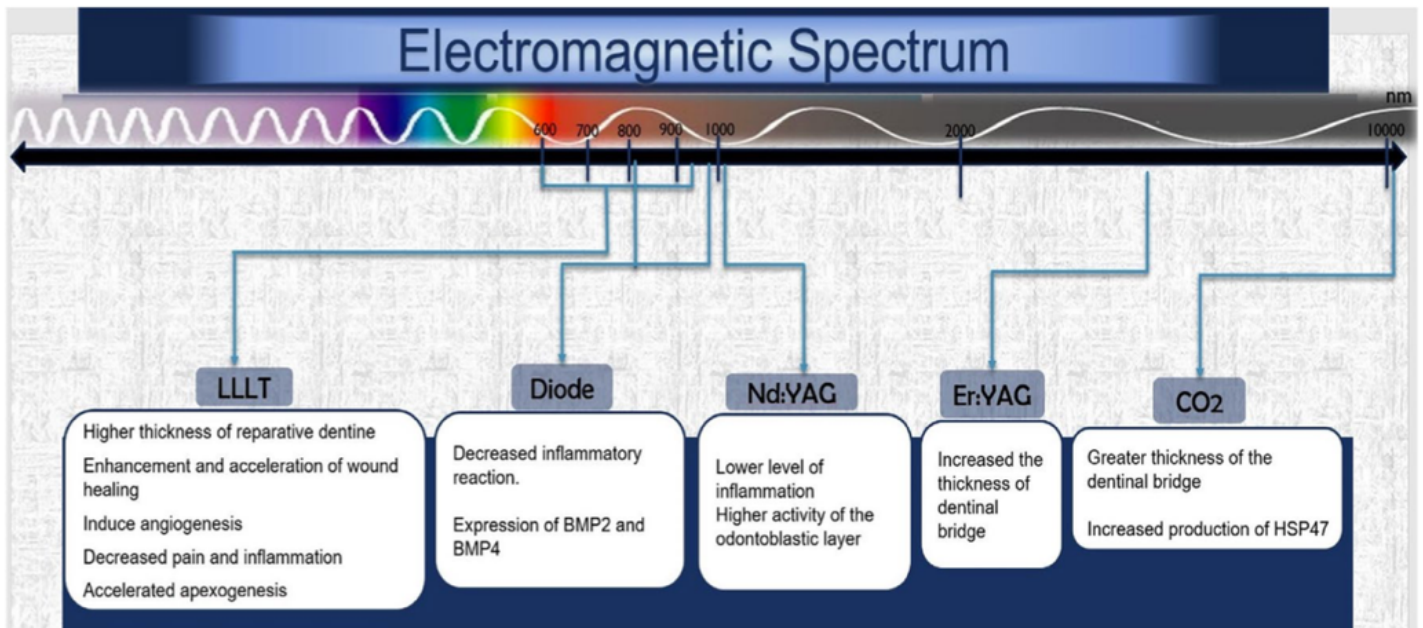


Figure 16: Les différents effets histologiques de différents lasers sur le tissu pulpaire dentaire (Afkhami *et al.*, 2023).

4. Analyse critique de la littérature sur le laser et les thérapies sur les pulpes vivantes.

4.1. Stratégie de recherche

Une recherche électronique dans les bases de données PubMed et Scopus couvrant la période 2018 à 2023 a été entreprise.

Les mots-clés, termes MESH suivants ont été utilisés : « Laser and endodontics » et « Laser and endodontic treatment ».

4.2. Sélection des articles

Les doublons ainsi que les articles qui ne sont ni en anglais ni en français ont été éliminés.

Les articles ont été catégorisés en fonction de leur application en endodontie :

- Traitement canalaire (n=355) : irrigation, TE, RTE...
- Thérapies sur pulpes vitales/dentisterie régénérative (n=57)
- Gestion de la douleur (n=48)
- Traitement de l'hypersensibilité dentinaire (n=11)
- Chirurgie endodontique (n=6)
- Autres (n=36)

Au vu de l'approche de plus en plus conservatrice de notre métier, nous avons choisi de nous concentrer et de traiter le sujet du laser et les thérapies sur pulpes vitales.

Un second tri a été effectué pour éliminer les articles dont l'impact factor de la revue qui l'a publié était faible (inférieur à 1,5) ou dont l'étude n'est pas assez bien menée. À la suite de ce tri et à la lecture de certains articles faisant référence à des études de manière récurrente, 5 articles ont été réincorporés.

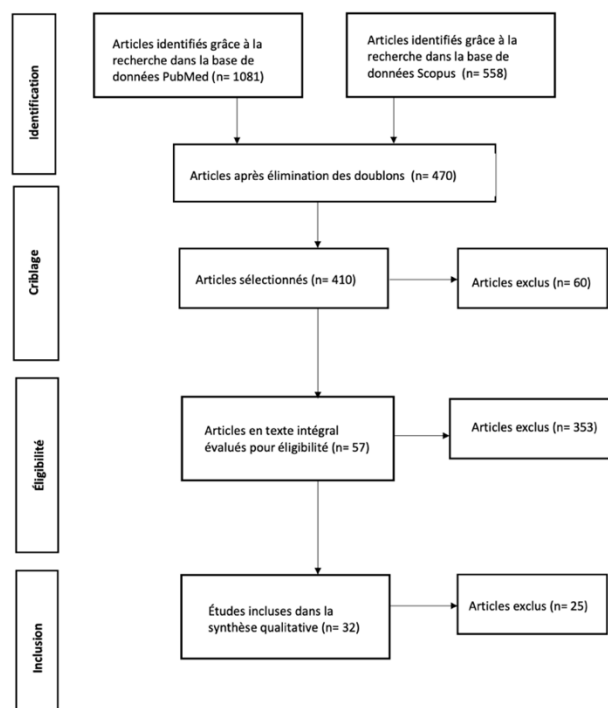


Figure 17: Organigramme de sélection des articles faisant référence au laser et les thérapies sur pulpe vivante. (organigramme personnel)

4.3. Niveau de preuve scientifique des articles inclus dans l'étude

La plupart des articles sont de faible niveau scientifique étant des études comparatives non randomisées de faible puissance ou l'échantillon étant trop faible. Trois articles sont des études de cas.

Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature	Grade des recommandations
Niveau 1 - Essais comparatifs randomisés de forte puissance - Méta-analyse d'essais comparatifs randomisés - Analyse de décision basée sur des études bien menées	Preuve scientifique établie
Niveau 2 - Essais comparatifs randomisés de faible puissance - Études comparatives non randomisées bien menées - Étude de cohorte	Présomption scientifique
Niveau 3 - Études cas témoin Niveau 4 - Études comparatives portant des biais importants - Étude rétrospectives - Séries de cas - Études épidémiologiques descriptives (transversale, longitudinale)	Faible niveau de preuve scientifique

Tableau 4: Niveau de preuve scientifique fourni par la littérature et les grades de recommandations. (cours de lecture critique d'article de 5^{ème} année)

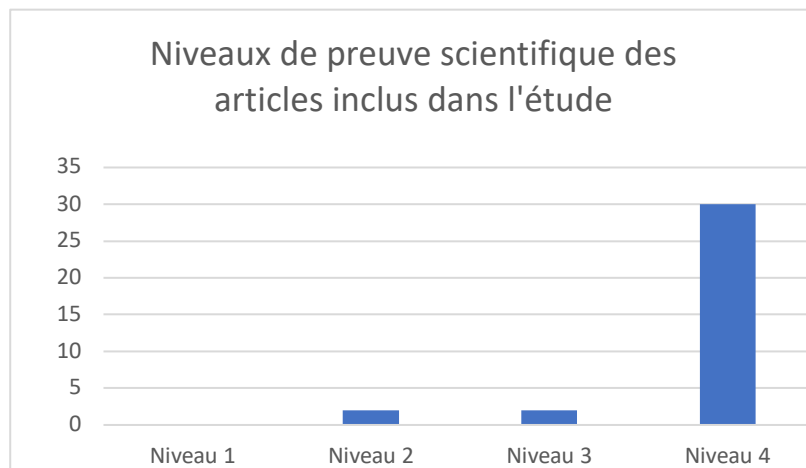


Figure 18 : Graphique représentant la part d'articles de niveau scientifique 4, 3 et 2. (graphique personnel)

4.4. Extractions d'informations

Pour chaque étude incluse, le texte a été examiné dans son ensemble afin d'extraire toutes les données intéressant l'étude : type d'étude, échantillon, traitement entrepris, type de laser et ses paramètres, le matériel utilisé, les critères évalués et l'objectif de l'étude ainsi que ses résultats.

4.5. Résultats et discussion

4.5.1 Durée de suivi des études

Études animales	0 à 4 mois
Études in vitro	1 à 7 jours
Études humaines	6 mois à 24 mois

Tableau 5: Durées minimales et maximales des études de l'analyse.

4.5.2 Proportion des types de laser utilisés dans les études

La majorité des articles utilisent le laser diode, à différentes longueurs d'onde (rouge ou infra-rouge) et avec différents paramètres. (Tableau 6)

Sur les 20 articles où le laser diode est utilisé, 8 concernent la photobiomodulation, 12 articles étudient la pulpotomie ou le coiffage pulpaire.

Sur les 5 articles où le laser Er: YAG est utilisé, 1 concerne le coiffage pulpaire direct, 1 concerne l'exérèse carieuse, 1 la revascularisation et 1 la pulpotomie. 1 article utilisait le laser Er: YAG et diode de manière concomitante dans le cadre de la photobiomodulation afin de comparer les deux (Yamakawa *et al.*, 2018).

L'article ayant recours au laser CO₂ l'utilise dans le cadre d'un coiffage pulpaire direct et celui qui utilise le Er,Cr:YSGG réalise une pulpotomie partielle.

Diode	Er :YAG	CO ₂	Er, Cr : YSGG
(Kuo <i>et al.</i> , 2018; Ngoc <i>et al.</i> , 2018; Yamakawa <i>et al.</i> , 2018; Al-Agele and Jamil, 2019; El Nawam <i>et al.</i> , 2019; Marques <i>et al.</i> , 2019; Al-Shaimaa Abdel Hafiz <i>et al.</i> , 2020; Bahman <i>et al.</i> , 2020; Yazdanfar, Berekatain and Zare Jahromi, 2020; Zaccara <i>et al.</i> , 2020; Bidar <i>et al.</i> , 2021; Deluca <i>et al.</i> , 2021; Moreira <i>et al.</i> , 2021; Alsofi <i>et al.</i> , 2022; Asnaashari <i>et al.</i> , 2022; Ebrahimi <i>et al.</i> , 2022; Kaya <i>et al.</i> , 2022; Shalash <i>et al.</i> , 2022; Zafari <i>et al.</i> , 2022; Alharbi <i>et al.</i> , 2023; Lee <i>et al.</i> , 2023)	(Baraba <i>et al.</i> , 2018; Yamakawa <i>et al.</i> , 2018; Kermanshah <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2022; Yu <i>et al.</i> , 2022)	(Suzuki <i>et al.</i> , 2019)	(Tozar and Erkmen Almaz, 2020)
20 études	5 études	1 étude	1 étude

Tableau 6: Proportion d'études utilisant le laser diode, Er: YAG, CO₂ ou Er,Cr:YSGG. (Tableau personnel)

4.5.3 Résultats des recherches : tableau récapitulatif des études menées en fonction du type d'étude, nombre de dents concernées, traitement réalisé, type de laser, paramètres du laser, durée de l'étude, résultats.

Auteur	Type d'étude	Nombre de dents	Traitement	Type de laser	Paramètres du laser	Matériel	Durée de l'étude	Résultats
(Marques <i>et al.</i> , 2019)	In vitro	/	Photobiomodulation	Diode InGaAlP ¹ 660nm (rouge) GaAlAs ² 780nm (infra-rouge)	50-60 Hz de fréquence Puissance 10mW Densité énergétique de 1,2 J/cm ² à 7,5J/cm ² Temps d'irradiation de 5 à 30sec	Cellules SHED ³ 4 groupes dans le rouge (R) et 4 en infra-rouge (IR) (8 au total + 2 contrôles) R ou IR 1,5 R ou IR 2,5 R ou IR 5,0 R ou IR 7,5 C+ contrôle positif (non irradié) C- contrôle négatif (non irradié)	3 jours (72h)	5J/cm ² appliqué avec un LLL rouge (ici 660nm) induit un haut taux de prolifération et de survie des cellules SHED La même dose d'irradiation appliquée en infra-rouge induit des effets négatifs 1,2 et 2,5 J/cm ² est délétère pour l'activité métabolique et la survie des SHED quel que soit le laser utilisé mais la diminution est supérieure avec le laser rouge.
(Bidar <i>et al.</i> , 2021)	Ex vivo	/	Photobiomodulation	Diode GaAlAs ² 810nm	Mode continu Puissance 200mW Densité énergétique de 10,5 J/cm ² à 22,5J/cm ² Temps d'irradiation de 45sec à 135sec	HDPSCs ⁴ et PRP ⁵ <u>4 groupes</u> Contrôle PRP groupe Laser group PRP + laser groupe	5 jours	PRP : augmentation de la prolifération et de l'ALP ⁶ jusqu'au 3 ^{ème} jour puis diminution. PRP + laser : augmentation de la prolifération et de l'ALP jusqu'au 3 ^{ème} jour puis diminution. Laser : augmentation de la prolifération et de l'ALP puis diminution <u>mais non significatif</u> . L'irradiation au laser a augmenté la prolifération et la viabilité cellulaire tout en

								diminuant l'activité de l'ALP. L'application de PRP n'est pas aussi efficace que le rayonnement laser en termes d'induction de la prolifération cellulaire.
(Asnaashari <i>et al.</i> , 2022)	In vitro	/	Photobiomodulation	Diode (LLL) InGaA1P 660nm (rouge) 808nm (infra-rouge)	Mode continu Puissance de 150mW à 250mW Densité énergétique 4,1J/cm2 Temps d'irradiation 9sec	HDPSCs <u>3 groupes :</u> - Contrôle non irradié - Irradié à 660nm - Irradié à 808nm <u>Paramètre évalué :</u> viabilité/survie cellulaire	3 jours (72H)	Les effets du laser sur la survie cellulaire sont significatifs en termes de longueur d'onde, moment de l'évaluation et en termes d'interaction groupe et temps. A 48 et 72H, la survie cellulaire était plus élevée dans les groupes irradiés que pour le groupe contrôle. Mais seulement la différence de survie cellulaire entre le groupe contrôle et le groupe irradié à 660nm à 72H est significatif (viabilité augmentée pour le groupe irradié).
(Bahman <i>et al.</i> , 2020)	Animal	36 dents antérieures et	Photobiomodulation	Diode GaA1As	Mode continu	Hydroxyde de calcium	14 jours	Des différences significatives ont été observées entre :

¹ Indium-gallium-aluminium phosphide laser

² Gallium-aluminium-arsénide laser

³ Human exfoliated deciduous teeth

⁴ Cellules souches de pulpe dentaire humaine

⁵ Platelet-rich plasma

⁶ Alkaline phosphatase

		prémolaires permanentes immatures de chiens		810nm (infrarouge)	Contact direct Puissance 300mW Densité énergétique 4,2J/cm ² Temps d'irradiation 9s	2 groupes : - Groupe hydroxyde de calcium + laser - Groupe hydroxyde de calcium seul Paramètre évalué : distance entre les lignes de tétracyclines qui témoignent de la formation de nouvelle dentine. ⇒ Plus la distance est grande, plus la dentine s'est formée.		<ul style="list-style-type: none"> - Le 7^{ème} et 14^{ème} jour - 1^{er} et 14^{ème} jour - 3^{ème} et 14^{ème} jour <p>⇒ Les odontoblastes n'étant pas tous au même stade ont pu à peu proliférés de manière accélérée.</p> <p>⇒ La combinaison du laser avec l'hydroxyde de calcium se révèle bénéfique pour le processus apexogénèse.</p>
(Deluca <i>et al.</i> , 2021)	In vitro	/	Photobiomodulation	Diode InGaIP ⁷ 660nm	Mode continu Puissance 100mW Densité énergétique 33,33J/cm ² Temps d'irradiation 10 et 180sec	Culture de cellules de papille apicale (APCs) et cellules endothéliales (HUVECs) 5 groupes : - Groupe contrôle - Photobiomodulation contrôle - Photodynamique contrôle - Photobiomodulation groupe (PBM) - Photodynamique groupe (PDT) Paramètres évalués :	96H (4jours)	<ul style="list-style-type: none"> • PDT et PBM ont favorisé une plus grande viabilité des APC que les témoins. • PDT a la plus grande viabilité cellulaire. • Tous les protocoles ont réduit la migration cellulaire (par rapport au groupe contrôle). • Germination des HUVEC : PBM>PDT=CT

⁷ Indium-gallium-aluminium-phosphide

						<ul style="list-style-type: none"> - Cytotoxicité APC - Indice de polarité APC - Migration APC - Germination des HUVEC 		⇒ PMB + PDT compléments potentiellement efficaces à la revascularisation des dents immatures non vitales.
(El Nawam <i>et al.</i> , 2019)	In vitro	/	Photobiomodulation	Diode GaAlAs 660nm (rouge) et 810nm (infrarouge)	<p>Pas de contact Mode continu</p> <p>Temps d'irradiation 6, 9.4, 18 et 28.3s</p> <p>Puissance 30mW</p> <p>Densité énergétique 1 et 3J/cm²</p>	<p>5 groupes :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1- Contrôle (pas de laser) 2- Laser 660nm et 1J/cm² 3- Laser 660nm et 3J/cm² 4- Laser 810nm et 1J/cm² 5- Laser 810nm et 3J/cm² <p>+ Recherche des marqueurs VEGF, VEGFR2, DSPP, DMP1 et BSP (via PCR).</p> <p>Objectifs : évaluer les effets de la LLLT avec un laser diode sur l'angiogenèse et la dentinogenèse du complexe pulpo-dentinaire dans un modèle in-vitro.</p>	7 jours	<p>La densité énergétique la plus faible (1J/cm²) avec une longueur d'onde de 660nm a montré une augmentation significative de la régulation des gènes angiogéniques (VEGF et VEGFR2) et odontogéniques (DSPP, DMP1, BSP).</p> <p>La densité énergétique la plus forte (3J/cm²) avec une longueur d'onde de 810nm a montré une augmentation significative des gènes odontogéniques alors que pour les gènes angiogéniques il y a un résultat variable :</p> <ul style="list-style-type: none"> - ↑VEGF - ↓VEGFR2 <p>⇒ LLLT = outils utiles pour promouvoir l'angiogenèse et l'odontogenèse.</p>
(Zaccara <i>et al.</i> , 2020)	In vitro	/	Photobiomodulation	Diode InGaAlP	Contact direct	2 groupes :	24H	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation significative de la

				660nm (rouge)	Mode continu Puissance 100mW Densité énergétique 33,33J/cm ² Temps d'irradiation 10s	<ul style="list-style-type: none"> - Groupe non irradié (contrôle) - Groupe irradié Paramètres étudiés : <ul style="list-style-type: none"> - Viabilité cellulaire - Migration cellulaire - Acétylation de l'histone H3 		viabilité cellulaire pour le groupe irradié. <ul style="list-style-type: none"> - Augmentation significative de la migration cellulaire pour le groupe irradié : <ul style="list-style-type: none"> • 6H et 12H ++ • 18H plateau - Augmentation significative de l'acétylation de H3 pour le groupe irradié. ⇒ Le laser induit une augmentation de la viabilité et de la migration cellulaire qui est étroitement corrélées à l'augmentation de l'acétylation de H3.
(Moreira <i>et al.</i> , 2021)	In vitro et in vivo	44 rats mâles adultes	Photobiomodulation	Diode laser InGaA1P 660nm	Mode continu Contact direct Puissance 20mW Densité énergétique	4 groupes (+2 sous-groupes) : <ul style="list-style-type: none"> - Chitosan scaffold - Chitosan scaffold + PMBT <ul style="list-style-type: none"> • 3J/cm² • 5J/cm² - Blood clot + chitosan scaffold - Blood clot + chitosan scaffold + PBMT <ul style="list-style-type: none"> • 3J/cm² 	120H	In vitro : <ul style="list-style-type: none"> - Viabilité, migration et prolifération significativement supérieure quand il y a une application du laser notamment à 5J/cm² In vivo :

					3J/cm ² et 5J/cm ² Temps d'irradiation 4s et 7s	<ul style="list-style-type: none"> • 5J/cm² 		<ul style="list-style-type: none"> - Formation de tissu semblable à du tissu pulpaire sur les dents irradiées ⇒ Chitosan + clou plaquettaire + PBMT pourraient à l'avenir améliorer les résultats de régénération pulpaire grâce à des approches de « cell-homing ».
(Yamakawa <i>et al.</i> , 2018)	In vitro	/	Photobiomodulation	Er: YAG Diode laser	Er: YAG : 50mJ (10pps) pendant 60s Diode (high-power) 1W en mode continu pendant 60s	Utilisation lignées cellulaires dérivées de la pulpe dentaire porcine (PPU-7) Paramètres évalués : <ul style="list-style-type: none"> - Taux de prolifération cellulaire - Apoptose - Effet sur la différenciation et l'expression des gènes - Effet sur l'induction de la minéralisation - Effet sur l'activation des protéases du tissu pulpaire - Effet sur l'activation de TGF-β 	5 jours	Taux de prolifération cellulaire <ul style="list-style-type: none"> ↳ Les 2 lasers augmentent le taux de prolifération cellulaire Apoptose <ul style="list-style-type: none"> ↳ Er: YAG a un index apoptotique > Diode Effet sur la différenciation et l'expression des gènes <ul style="list-style-type: none"> ↳ Niveau de mRNA du marqueur du gène odontoblastique + d'autres protéines sont augmentées avec la diode ↳ MMP2 est augmentée avec Er: YAG

						Objectifs : comprendre les effets de l'irradiation laser sur les cellules du tissu pulpaire dentaire et comprendre les mécanismes de régénération de dentine.		<ul style="list-style-type: none"> ↳ Les 2 lasers augmentent le taux de phosphatase alcaline : induction de la différenciation des PPU-7. <p>Effet sur l'induction de la minéralisation</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Pas de différence significative entre les 2 lasers. <p>Effet sur l'activation des protéases du tissu pulpaire</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Les 2 lasers activent 4 MMP du tissu pulpaire dentaire porcin. <p>Effet sur l'activation de TGF-β</p>
(Alsofi <i>et al.</i> , 2022)	Animal (6 lapins)	24 dents antérieures de lapins (4dents/lapins)	Coiffage pulpaire direct	Diode 980nm (LLL)	Mode continu Contact direct Puissance 250mW Densité énergétique 1,25J/cm ²	ERRM ⁸ pour le coiffage <u>Paramètres évalués :</u> <ul style="list-style-type: none"> - La réponse inflammatoire - Couche d'odontoblastes - Épaisseur de pré-dentine - Densité cellulaire 2 <u>groupes :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Irradié - Non irradié 	2 mois	Après 2 semaines : <ul style="list-style-type: none"> - Groupe irradié : légère inflammation et odontoblastes organisés + épaisseur de pré-dentine supérieure par rapport au groupe non irradié (significatif). - Groupe non irradié : inflammation plus

⁸ Endosequence Root Repair Material (ciment biocéramique)

					Temps d'irradiation 90s			<p>sévère et odontoblastes désorganisés, moins de densité cellulaire.</p> <p>Après 2 mois :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cellules inflammatoires clairsemées pour les 2 groupes. - Groupe irradié : vaisseaux sanguins dilatés et tissus conjonctifs fibreux épais au niveau de la zone péri-apicale. - Groupe non irradié : les vaisseaux sanguins sont congestionnés et moins de tissus fibreux. <p>⇒ La combinaison d'un matériau de coiffage et du laser à faible intensité (LLL) peut améliorer la cicatrisation et diminuer la phase inflammatoire.</p>
(Suzuki <i>et al.</i> , 2019)	Humain	28 molaires (dents de sagesse)	Coiffage pulpaire direct	CO ₂ 10 600nm	Mode pulsé	Dycal® <u>2 groupes :</u>	12 mois	Pas de différence significative entre les 2 groupes pour tous les

					Puissance 500mW Densité énergétique 0,32 à 16,99J/cm ² Temps d'irradiation 15sec	<ul style="list-style-type: none"> - CO₂ laser group - Dycal® group <u>Paramètres évalués :</u> <ul style="list-style-type: none"> - Organisation du tissu pulpaire - Présence de cellules inflammatoires - Formation de dentine tertiaire (pont de dentine) - Présence de bactéries 		paramètres à 6 et 12 mois post-traitement mais : <ul style="list-style-type: none"> - La formation de dentine tertiaire semble retardée pour le groupe laser par rapport au groupe Dycal® - Plus de la moitié (4 sur 7) des dents du groupe irradiées ont produit un pont dentinaire complet contrairement au groupe avec Dycal®. L'irradiation au laser CO ₂ n'influence pas le processus de cicatrisation ni la formation de dentine dans la pulpe exposée. Cependant, elle a montré une activité favorable comparable à celle du Dycal®.
(Kermanshah <i>et al.</i> , 2020)	Humain	26 dents définitives	Coiffage pulpaire direct	Er : YAG laser 2940nm	Pas de contact Mode pulsé Fréquence 10 Hz Temps de pulse : 450µs	2 groupes : <ul style="list-style-type: none"> - Groupe MTA seul - Groupe MTA + laser Objectif : comparer le taux de succès de la pulpotomie avec du MTA seul et du MTA en combinaison avec du laser.	6 mois	Le pourcentage de dents vitales à 1 et 3 mois pour le groupe irradié est inférieur au groupe non irradié. ⇨ Taux de réussite moindre pour le groupe irradié par rapport au groupe avec MTA seul mais différence non

					Temps d'irradiation 10s			significative (échantillon trop faible).
(Zafari <i>et al.</i> , 2022)	In vitro	/	Coiffage direct	GaAlAs diode 630nm	Contact direct Mode continu Puissance 5 mW Densité énergétique 4J/cm ² Temps d'irradiation 1min	12 groupes : - MTA - MTA + EMD ⁹ - MTA + EMD + LLLT ¹⁰ - MTA + LLLT - CEM ¹¹ - CEM + EMD - CEM + EMD + LLT - CEM + LLT - EMD - EMD + LLLT - LLLT - Groupe contrôle Objectifs : étudier l'effet de différents agents de coiffage pulpaire combinés (MTA, EMD, CEM) et la thérapie par laser sur l'amélioration de la viabilité et prolifération de cellules souches de la papille apicale (SCAPs).	7 jours (168H)	- MTA seul = impact négatif sur la viabilité des SCAPs (pH basique) - La viabilité cellulaire est augmentée par combinaison de MTA, LLLT et EMD. - Viabilité cellulaire est supérieure avec MTA par rapport à CEM. ⇒ LLLT peut être un stimulateur de viabilité des SCAPs lorsqu'il est appliqué en combinaison avec des agents de coiffages pulpaire.
(Shalash <i>et al.</i> , 2022)	Animal	48 dents de chiens	Coiffage pulpaire direct	Diode laser 870nm	Mode continu	2 groupes : - CaOH ₂ seul (I) A = 1 semaine B = 2 semaines	16 semaines	Réponse inflammatoire - Moins intense avec laser à 1 semaine (significatif)

⁹ Emdogain

¹⁰ Low level laser therapy

¹¹ Calcium-enriched mixture

					Puissance 50mW Temps d'irradiation 120s	C= 16 semaines - CaOH ₂ + laser (II) A = 1 semaine B= 2 semaines C= 16 semaines Objectif : évaluer l'efficacité du CaOH ₂ seul et en combinaison avec un laser dans le coiffage pulpaire direct. Paramètres étudiés : - Réponse inflammatoire histologique - Formation de pont dentinaire		- Pas de différence significative à d'autres intervalles entre les 2 groupes. Formation de pont dentinaire : - Épaisseur significativement supérieure avec laser à 16 semaines comparativement au CaOH ₂ seul. ⇒ Le laser s'est révélé être un complément bénéfique aux procédures de coiffage pulpaire direct.
(Al-Agele and Jamil, 2019)	Animal	40 incisives de lapins	Coiffage pulpaire direct	Diode laser 808nm	Mode continu Non contact Puissance 10W Temps d'irradiation 2s	4 groupes : - Groupe contrôle - Groupe laser seul - Groupe BMP-7 ¹² seul - Groupe laser + BMP-7 (+MTA en coiffage pour chaque groupes) Paramètres évalués : - Épaisseur de pré-dentine - Réponse inflammatoire	4 semaines	Épaisseur de pré-dentine : différences significatives entre le groupe contrôle VS tous les autres groupes. Réponse inflammatoire : pas de différence significative entre les groupes. Présence d'odontoblastes : pas de différence

¹² Bone morphogenic protein

						<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'odontoblastes <p>Objectif : évaluer histologiquement les effets de la BMP-7 sur la régénération pulpaire avec et sans laser.</p>		<p>significative entre les groupes.</p> <p>⇒ Comme illustrent les résultats obtenus, la thérapie par laser n'a pas ajouté d'effet notable sur l'efficacité du BMP en termes d'accélération du processus de guérison.</p>
(Yazdanfar, Barekatin and Zare Jahromi, 2020)	Humain	20 dents	Coiffage pulpaire direct	Laser diode 808nm	<p>Mode continu Contact direct</p> <p>Puissance 1,5W</p> <p>Densité énergétique 381,97J/cm²</p> <p>Temps d'irradiation 2s</p>	<p>2 groupes :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Groupe TheraCal®seul - Groupe TheraCal® + laser <p>Paramètres évalués :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cliniques : perte de vitalité, douleur spontanée, réaction aux stimuli thermiques et percussion. - Radiographiques : élargissement desmodontal. <p>Objectif : Évaluer l'efficacité du laser (selon certains paramètres) combiné à une résine tricalcique type TheraCal® dans le cas d'un coiffage pulpaire direct suite à</p>	6 mois	<p>Cliniquement : le groupe avec laser présente de meilleurs résultats avec moins de sensibilités au froid (significatif)</p> <p>Radiographiquement : pas de différence significative entre les 2 groupes.</p> <p>Dans les 2 groupes, la formation de dentine tertiaire est la plus haute lors du 1^{er} mois.</p> <p>⇒ Le laser combiné au TheraCal® peut être recommandé pour les cas de coiffage pulpaire direct.</p>

						une carie sur une dent permanente après 6 mois.		
(Alharbi <i>et al.</i> , 2023)	Animal	64 dents (chiens)	Coiffage pulpaire direct	Diode laser GaAlAs 870nm	Mode continu Contact direct Puissance 100mW Densité énergétique 1,08J/cm ² Temps d'irradiation 90s	4 groupes : - Groupes irradiés ↳ ERRM prise normale + LLL (RL) ↳ ERRM prise rapide + LLL (FL) - Groupes non irradiés ↳ ERRM prise normale ↳ ERRM prise rapide Objectif : évaluer la qualité de la barrière dentinaire formée et la réaction pulpaire avec l'utilisation de ERRM combinée avec la low-level laser thérapie. Paramètres évalués : - Continuité de la barrière calcique - Qualité de la formation de dentine au niveau du pont - Connexion des tissus au niveau du pont - Présence de double pont - Présence d'îlots de dentine au niveau du matériau	2 mois	Analyse de la barrière calcique et formation de pont dentinaire : ↳ Tous les échantillons présentent une formation de pont dentinaire. ↳ Les groupes irradiés ont un taux significativement supérieur, notamment RL, de barrière calcifiée, double pont dentinaire, meilleure minéralisation des ponts dentinaires. Statut pulpaire : ↳ Le groupe RL présente significativement moins d'inflammation au contact du matériau que les groupes FL et R, en termes de lymphocytes et cellules infiltrées. Analyse immunohistochimique :

						<ul style="list-style-type: none"> - Impaction de particules de matériel dans le tissu pulpaire - Présence d'inflammation 		<ul style="list-style-type: none"> ↳ Les groupes irradiés présentent plus de marqueur RUNX2. ⇒ La laser combiné au ERRM est efficace dans l'induction de formation de dentine de réparation.
(Tozar and Erkmen Almaz, 2020)	Humain	90 molaires permanentes immatures	Pulpotomie partielle	Er,Cr :YSGG ¹³ 2780nm (pas écrit dans l'article)	Mode pulsé Pas de contact Fréquence 20Hz Puissance 500mW Temps d'irradiation 10sec	MTA ¹⁴ 2 groupes : <ul style="list-style-type: none"> - MTA group (n=45) - Laser + MTA group (n=45) 	12 mois	<p>Pas de différence significative entre les 2 groupes avec un taux de succès à :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 95,5% pour MTA + laser - 88,8% MTA seul <p>L'utilisation du laser n'a pas contribué au taux de réussite de la pulpotomie partielle sur dent permanente immature par rapport au MTA seul. MAIS dans cette étude la formation de tissu dur dentaire sous le matériau de coiffage n'est pas considéré comme un critère de succès. Or dans le groupe MTA+ laser la formation de tissu dur est</p>

¹³ Erbium, chromium-doped yttrium, scandium, gallium and garnet laser

¹⁴ Mineral trioxide aggregate

								supérieure par rapport au groupe MTA seul.
(Kuo <i>et al.</i> , 2018)	Humain	145 molaires temporaires (74 enfants)	Pulpotomie	Diode laser 970nm (infrarouge)	Contact direct Mode pulsé Puissance 3W Fréquence 5 Hz	3 groupes : - Groupe laser - Groupe hypochlorite de sodium à 6% - Groupe « pas de médicaments » Objectifs : évaluer les taux de réussite clinique et radiographique des molaires traitées par ces 3 thérapeutiques par rapport au formocrésol.	24 mois (2 ans)	Taux de réussite clinique et radiographique : supérieur pour les groupes laser et sans médicament par rapport au groupe NaOCl. A 2 ans : laser > sans médicament > NaOCl. Taux de réussite influencé +++ par l'opérateur (enseignant ou externe) et l'étanchéité de restauration définitive. ⇒ Toutes les techniques ont un taux de succès comparables au formocrésol (mais il n'est plus d'actualité dans notre pratique...).
(Kaya <i>et al.</i> , 2022)	Humain	172 molaires temporaires	Pulpotomie	Diode laser 820nm	Puissance 10mW Densité énergétique 2,5J/cm ²	4 groupes : - Groupe formocrésol (FC) - Groupe MTA - Groupe hydroxyde de calcium seul (CH) - Groupe hydroxyde de calcium et laser (CH + PBMT)	12 mois	Suivi à 6 mois et 12 mois : En termes de succès clinique ↳ Pas de différence significative entre le groupe CH + PMBT et les autres groupes. ↳ Différences significatives entre

					Temps d'irradiation 12s	Paramètres évalués : <ul style="list-style-type: none"> - Succès clinique de la pulpotomie - Succès radiographique de la pulpotomie Objectifs : évaluer le succès clinique et radiographique des 4 groupes tout en les comparant dans le cadre d'une pulpotomie sur molaire temporaire.		les groupes FC, CH et MTA. En termes de succès radiographique <ul style="list-style-type: none"> ↳ Différence significative entre le groupe CH et les autres groupes qui présente le pire résultat. ↳ CH + PMBT présente des résultats similaires aux groupes MTA et FC. ↳ CH + PMBT > CH ⇒ MTA et FC ont le plus fort pourcentage de succès clinique et radiographique. ⇒ Le laser en complément de l'hydroxyde de calcium (CH) augmente le succès d'une pulpotomie comparé au CH seul.
(Ebrahimi <i>et al.</i> , 2022)	Humain	63 molaires temporaires	Pulpotomie	Laser diode InGaA1P 660nm	Mode continu Contact direct	3 groupes : <ul style="list-style-type: none"> • MTA seul • MTA + LLLT (660nm) • MTA + DL (810nm) Paramètres évalués :	18 mois	Suivi à 6, 9 et 18 mois. Taux de réussite clinique <ul style="list-style-type: none"> ↳ 100% pour groupe MTA et MTA+LLLT

				<p>GaAlAs 810nm</p> <p>Puissance 200mW et 1W</p> <p>Densité énergétique 7,1J/cm²</p> <p>Durée d'irradiation 10s</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Succès clinique de la pulpotomie - Succès radiographique de la pulpotomie <p>Objectifs : efficacité clinique et radiographique de la pulpotomie partielle avec un laser à faible et à forte puissance combinés au MTA sur une molaire temporaire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ↳ 95,2% à 6 et 9 mois, 87,5% à 18 mois pour le groupe MTA + DL <p>Taux de succès radiographique</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Groupe MTA <ul style="list-style-type: none"> 6 mois : 90,5% 9 mois : 90,6% 18 mois : 87,5% ↳ Groupe MTA + LLLT <ul style="list-style-type: none"> 6 mois : 100% 9 mois : 95,2% 18 mois : 88,2% ↳ Groupe MTA + DL <ul style="list-style-type: none"> 6 mois : 85,7% 9 mois : 76,2% 18 mois : 69,7% <p>Aucune différence significative n'a été constatée dans la fréquence des événements cliniques ou radiographiques parmi les groupes à tout intervalle (p>0,05).</p> <p>⇒ La pulpotomie partielle par coiffage au MTA est une technique appropriée pour les thérapies pulpaires sur dent de lait. L'irradiation au laser n'apporte pas de</p>
--	--	--	--	--	--	---

								différence significative en termes de taux de réussite.
(Wang <i>et al.</i> , 2022)	Humain	100 molaires temporaires (40 enfants)	Pulpotomie	Er : YAG 2940nm	Mode pulsé Non contact Puissance 0,3W Densité énergétique 0,64J/cm ² Fréquence 15Hz Durée d'irradiation des pulse 300ms	2 groupes : - Groupe irradié - Groupe « conventionnel » non irradié Objectif : Étudier les effets cliniques de l'irradiation au Er : YAG lors d'une pulpotomie sur une dent temporaire ayant une carie profonde mais asymptomatique chez un enfant. Paramètres évalués : ▪ Durée du traitement ▪ Efficacité clinique	24 mois	Temps de la pulpotomie ↳ Plus long pour le groupe irradié mais le temps d'hémostase et de traitement total était plus court. Taux de succès clinique ↳ A 6 mois : laser (100%) > conventionnel (98%) mais non significatif. ↳ A 24 mois : laser (89,58%) > conventionnel (82,98%) mais non significatif. ⇒ Lors d'un temps d'observation plus long, on remarque que le taux de succès décline plus vite pour le groupe conventionnel par rapport au groupe irradié. ⇒ Er : YAG laser réduit significativement le temps de

								pulpotomie ce qui peut être un atout utile en odontologie pédiatrique.
(Ngoc <i>et al.</i> , 2018)	Humain CASE REPORT	10 dents (molaires temporaires + canines temporaires mandibulaires)	Pulpotomie	Laser diode 810nm	Mode continu Puissance 0,5W	Patient atteint d'hémophilie A Protocole pour pulpotomie sur dent temporaire (hémostase obtenue grâce au laser diode)	3 mois	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de symptômes à M+3 - Radiographiquement satisfaisant <p>Le laser s'avère utile pour obtenir l'hémostase dans les cas de pulpotomie chez les patients atteints de maladie entravant la coagulation.</p>
(Baraba <i>et al.</i> , 2018)	In vitro	/	Exérèse carieuse	Er :YAG ¹⁵ (2 lasers : FFC laser et square pulse technology laser)	Mode pulsé Contact direct et non-contact Densité énergétique 39,1 et 54,7 J/cm ² Fréquence 10Hz Temps des pulses : 400, 300, 100 et 50 μs	4 groupes expérimentaux : 1- Groupe contrôlé par feedback par fluorescence à 400μs (FFC) 2- Super short pulse 50μs (SSP) 3- Medium short pulse 100μs (MSP) 4- Short pulse 300μs (SP) + un groupe contrôle positif et un groupe contrôle négatif. 2 objectifs : - Évaluer l'efficacité d'élimination des bactéries cariogènes et de la dentine cariée	?	<p>Tous les groupes irradiés sont exempts de bactéries cariogènes après irradiation.</p> <p>La température :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Est significativement plus élevées pour les groupes SSP, MSP et SP par rapport au groupe FFC. - T° MSP < SP < SSP <p>⇒ La température est plus basse pour groupe FFC car il possède un contrôle par rétroaction du laser (+/-</p>

¹⁵ Erbium-doped :yttrium-aluminium-garnet

						<ul style="list-style-type: none"> - Mesurer la température lors de l'ablation par laser des tissus carieux. 		<p>interrupteur → empêche d'émettre par intermittence).</p> <ul style="list-style-type: none"> ⇒ Les pulses courts diminuent le temps de refroidissement des tissus. ⇒ L'utilisation du Er : YAG est utile dans l'ablation des tissus carieux mais en mode FFC pour éviter une augmentation de température trop importante.
(Al-Shaimaa Abdel Hafiz <i>et al.</i> , 2020)	Humain CASE REPORT	1 incisive centrale permanente immature traumatisée à la suite d'un choc	Revascularisation	Laser diode 635nm (Aseptim®)	Temps d'irradiation 150s	<p>Utilisation de MTA</p> <ul style="list-style-type: none"> ↳ Protocole de revascularisation : formation d'un clou plaquettaire, mise en place d'une matrice collagénique, MTA ↳ + irradiation au laser pour activer l'hypochlorite (à l'aide d'un photo-sensibilisateur). 	12 mois	<p>T0 : apex ouvert, croissance radiculaire non achevée, test de sensibilité négatif, test percussion positif, test palpation vestibulaire négatif.</p> <p>M+3 : pas de douleurs.</p> <p>M+6 : pas de douleurs, augmentation de la longueur radiculaire et de l'épaisseur de la paroi radiculaire.</p> <p>M+12 : apex complètement fermé, pas de douleurs.</p> <p>⇒ Succès de l'apexogenèse.</p>

(Yu <i>et al.</i> , 2022)	Humain CASE REPORT	1 prémolaire mandibulaire définitive immature	2 nd Revascularisation	Er : YAG	Mode pulsé Fréquence 15Hz Durée d'irradiation 15μs	Protocole revascularisation mais pas de saignement provoqué : mise en place d'un PRF (activation de l'irrigation au Er : YAG en mode PIPS)	53 mois	Succès de la revascularisation à 53 mois ↳ Asymptomatique ↳ Fonctionnelle ↳ Répond positivement au test au froid et test électrique ↳ Fermeture apicale avec épaisseur de dentine radiculaire
---------------------------	--------------------------	---	--------------------------------------	----------	---	--	---------	---

4.5.4 Critères biologiques et histologiques

4.5.4.1 Effet sur les cellules souches (viabilité, prolifération, migration)

Dans plusieurs études, il a été montré que l'application de laser, majoritairement diode, dans la longueur d'onde rouge (660nm) induit une augmentation de la prolifération cellulaire. Cependant, la même dose d'irradiation appliquée en infra-rouge induit des effets négatifs sur les cellules souches. (Marques *et al.*, 2019) (Bidar *et al.*, 2021) (Moreira *et al.*, 2021) (Yamakawa *et al.*, 2018)

Le laser Er :YAG (Yamakawa *et al.*, 2018) semble induire également une augmentation de prolifération de cellules souches, surtout à une densité énergétique de 5J/cm² (Marques *et al.*, 2019)(Moreira *et al.*, 2021). En revanche, des densités énergétiques inférieures à ce seuil peuvent être délétères. (Marques *et al.*, 2019)

La survie et la viabilité des cellules souches sont optimisées par une irradiation à faible puissance, en particulier avec le laser diode à 660 nm. Différentes densités énergétiques (3J/cm², 4.1J/cm², 5J/cm², 33.33J/cm²) ont toutes montré une amélioration de la survie, de la viabilité et de la migration cellulaire par rapport aux groupes contrôles (Asnaashari *et al.*, 2022)(Zaccara *et al.*, 2020; Deluca *et al.*, 2021; Moreira *et al.*, 2021; Zafari *et al.*, 2022).

Néanmoins, le laser Er :YAG semble induire un taux apoptotique plus élevé que le laser diode (Yamakawa *et al.*, 2018).

Un laser diode à 810 nm avec une densité énergétique de 10.5J/cm² favorise la prolifération et la migration cellulaire, bien que ces paramètres et résultats proviennent d'une seule étude (Bidar *et al.*, 2021).

4.5.4.2 Effet sur la réaction inflammatoire

Dans de nombreuses études, majoritairement histologiques, il a été relevé la présence d'inflammation ou non lors de l'irradiation. (Al-Agele and Jamil, 2019; Suzuki *et al.*, 2019; Alsofi *et al.*, 2022; Shalash *et al.*, 2022). La réponse inflammatoire est classée selon l'absence, la présence légère, modérée ou sévère d'inflammation. Les systèmes de notation vont de grade 1 (inflammation sévère et nécrose) à 4 (absence d'inflammation) selon la classification histologique d'Asgary.

Les facteurs pris en compte sont la présence ou non de cellules inflammatoires et leur répartition, la présence de saignement ou d'abcès, la modification de la morphologie pulpaire. (Tableau 7)

Les études histologiques révèlent que l'irradiation laser réduit la réponse inflammatoire comparativement aux groupes non irradiés, qui montrent des signes d'inflammation plus sévère (Alsofi *et al.*, 2022; Shalash *et al.*, 2022; Alharbi *et al.*, 2023). Cependant, certains chercheurs n'ont pas observé de différences significatives en termes d'inflammation entre les groupes irradiés et non irradiés (Al-Agele and Jamil, 2019; Suzuki *et al.*, 2019).

4.5.4.3 Effet sur l'angiogenèse

L'irradiation avec un laser diode à 660 nm et une densité énergétique de 1J/cm² augmente la régulation des gènes angiogéniques VEGF et VEGFR2, alors qu'une longueur d'onde plus élevée à 810 nm diminue VEGFR2 (El Nawam *et al.*, 2019)(Figure 19). Aussi, un laser diode à 980 nm favorise la dilatation des vaisseaux sanguins, améliorant l'apport d'oxygène aux tissus (Alsofi *et al.*, 2022).

Ainsi, le laser de faible intensité semble promouvoir l'angiogenèse et accélérer la cicatrisation.

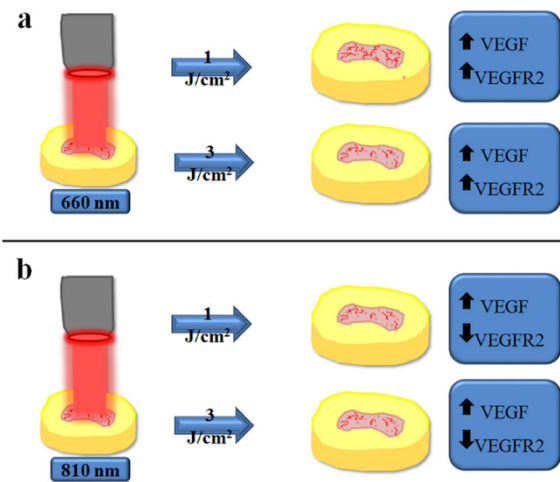


Figure 19: Représentation des différents effets du laser à faible intensité sur l'angiogenèse en fonction des paramètres de laser utilisés. (El Nawam et al., 2019)

4.5.4.4 Effet sur les odontoblastes

Les études biologiques étudient la présence ou non de certaines molécules indicatrices de formation de tissus dentaires notamment DMP1, HSP47, TGF ou encore certaines métallo-protéases responsables de cascades de réactions et donc aboutissant sur l'activation du métabolisme cellulaire. Il est démontré qu'une densité énergétique de 1 à 3J/cm² avec un laser diode émettant dans la longueur d'onde de 660nm augmente significativement la transcription des gènes odontogéniques tels que DSPP, DMP1 et BSP induisant ainsi la formation de néo-tissu semblable à du tissu pulpaire sur les dents irradiées (El Nawam et al., 2019; Moreira et al., 2021) (Figure 20)

Le laser Er :YAG augmente également l'expression des marqueurs odontoblastiques et des métallo-protéases, favorisant la régénération tissulaire (Yamakawa et al., 2018) (Figure 20).

Ainsi, ces 2 lasers ont des effets sur l'activation de molécules au sein des cellules souches pulpaire favorisant donc la régénération de tissu.

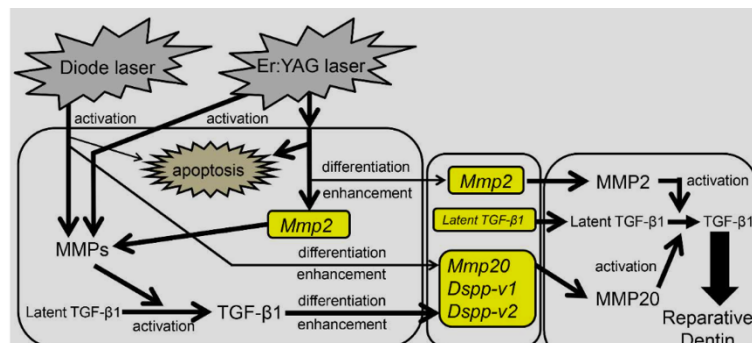


Figure 20: Mécanismes de réactions biologiques au sein des cellules pulpaires dentaires porcines induites par l'irradiation aux lasers ER:YAG et diode. (Yamakawa et al., 2018)

La néoformation de tissu dentaire dans les études histologiques est fréquemment catégorisée selon l'étendue de formation de pont dentinaire (dentine réparatrice) en l'absence, de formation incomplète ou de formation complète de pont dentinaire. (Tableau 7)

D'autres études évaluent la qualité et la morphologie tubulaire de la dentine nouvellement formée. (Al-Agele and Jamil, 2019; Suzuki et al., 2019; Alsofi et al., 2022; Shalash et al., 2022; Alharbi et al., 2023)

Elles relèvent également la modification ou non de la morphologie pulpaire avec une organisation ou désorganisation des odontoblastes, présence de fibres de collagène et autres processus qui mettraient en évidence le processus de guérison.

La majorité des études histologiques évaluent l'efficacité de l'irradiation au laser combiné à un matériau bioactif type ciment tricalcique (hydroxyde de calcium, MTA, TheraCal® ou Dycal®) ou matériaux dit « biocéramique ». L'étude compare les résultats entre un groupe irradié et coiffé par un matériau bioactif par rapport au groupe avec matériau seul.

Les groupes irradiés présenteraient une épaisseur de formation de néo-dentine supérieure aux groupes non irradiés, ainsi que la formation de pont dentinaire de meilleure qualité et avec une minéralisation supérieure. Les odontoblastes seraient mieux organisés avec une densité cellulaire supérieure. (Bahman *et al.*, 2020; Tozar and Erkmen Almaz, 2020; Alsofi *et al.*, 2022; Shalash *et al.*, 2022; Alharbi *et al.*, 2023)

A l'inverse, (Al-Agele and Jamil, 2019; Suzuki *et al.*, 2019; Tozar and Erkmen Almaz, 2020; Yazdanfar, Berekatain and Zare Jahromi, 2020) n'observent pas de résultats significativement supérieurs pour le groupe irradié avec aucune différence significative en termes de formation de néo-dentine et une formation de dentine tertiaire qui semble même retardée. (Suzuki *et al.*, 2019)

(Tozar and Erkmen Almaz, 2020) n'observe pas de différence significative entre le groupe irradié et non irradié mais la formation de néo-tissu n'est pas considérée comme un critère de succès de la pulpotomie. Toutefois, il a été relevé que le groupe irradié présente une épaisseur de formation de tissu dur supérieur par rapport au groupe MTA seul.

(Suzuki *et al.*, 2019) remarque qu'il n'y a pas de différence significative entre le groupe irradié et le groupe avec du Dycal® seul entre 6 et 12 mois mais que plus de la moitié des dents irradiées présentent un pont dentinaire complet contrairement au groupe avec Dycal®.

Feature	Category	Grading		
		I	II	III
Pulp Inflammation	Type	Chronic and acute inflammation	Chronic inflammation	No inflammation
	Intensity	Severe > 60 inflammatory cells	Mild [0-30] to moderate [0-60] inflammatory cells	No inflammation
	Extension	Entire coronal Pulp	Localized under exposure area	No inflammation
Hard Tissue Formation	Continuity	No hard tissue formation	Incomplete dentine bridge	Complete Dentine Bridge
	Thickness	<100µm	Between 100µm and - 250µm	More than 250µm

Tableau 7: Méthode de mesure utilisée pour catégoriser la réponse inflammatoire et l'épaisseur de pont de dentine (Asgary *et al.*, 2008 modifié par Shalash *et al.*, 2022)

4.5.5 Critères cliniques

4.5.5.1 Symptômes/ Douleur

Les études cliniques évaluent généralement les critères de succès ou d'échec cliniques basés sur la présence ou non de symptômes. Les signes d'échecs cliniques sont la douleur spontanée, douleur à la percussion axiale, formation d'abcès, mobilité ou perte prématurée de la dent.

Trois études portant sur la pulpotomie sur dent temporaire observent un taux de succès clinique supérieur pour les groupes irradiés par rapport aux groupes non irradiés (Kuo *et al.*, 2018; Ngoc *et al.*, 2018; Ebrahimi *et al.*, 2022). Une de ces études, observe un meilleur pourcentage de succès clinique lors de l'irradiation par laser de faible intensité comparativement au laser à plus haute intensité. (Ebrahimi *et al.*, 2022).

Cependant, d'autres études ne notent aucune différence significative en termes de succès clinique (Kaya *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022).

(Yazdanfar, Barekatin and Zare Jahromi, 2020) qui évalue l'efficacité du laser diode 808nm combiné à une résine tricalcique dans le cas d'un coiffage pulpaire direct établit que le groupe avec laser présente moins de sensibilités au froid à 6 mois que le groupe non irradié.

4.5.5.2 Réponse aux tests cliniques (froid/chaud, percussion, palpation apicale)

(Kermanshah *et al.*, 2020) a comparé le pourcentage de dents vivantes à la suite d'un coiffage pulpaire direct avec et sans irradiation au laser Er : YAG à 2940nm. Il a démontré que les résultats pour le groupe irradié étaient inférieurs (mais non significatifs) par rapport au groupe coiffé avec du MTA seul. Le nombre de dent nécrosées est supérieur dans le groupe irradié.

Dans ce cas présent, le laser ne semble pas promouvoir la guérison pulpaire.

(Tozar and Erkmen Almaz, 2020) dans le cadre d'une pulpotomie partielle démontre que le groupe avec laser à un pourcentage du succès plus élevé que celui sans mais la différence reste non significative.

(Yu *et al.*, 2022) dans son étude de cas sur un patient nécessitant la revascularisation d'une incisive centrale supérieure permanente à la suite d'un traumatisme expose qu'à 53 mois post-irradiation, le patient n'évoque aucun symptôme et la dent répond positivement au test au froid ainsi que négativement au test de percussion. Ainsi, dans ces deux études, le laser semble promouvoir cliniquement la vitalité pulpaire.

4.5.5.3 Radiographie

La radiographie peut s'avérer être un bon complément pour décider du succès ou non d'une étude. Ainsi, un élargissement desmodontal et la présence d'une lésion apicale peuvent être décelés, une fermeture apicale et développement radiculaire peuvent être également mis en évidence.

(Al-Shaimaa Abdel Hafiz *et al.*, 2020; Bahman *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022) observent que l'irradiation au laser s'avère être bénéfique pour le processus d'apexogenèse et donc augmente le succès de la thérapie sur pulpe vivante.

Ainsi, (Al-Shaimaa Abdel Hafiz *et al.*, 2020; Yu *et al.*, 2022) reportent dans leurs études respectives sur des cas de revascularisation une augmentation de la longueur radiculaire et de l'épaisseur de la paroi à 6 mois avec un fermeture apicale complète à partir de 12 mois, suite à une irradiation au laser diode 635nm et Er :YAG.

Cependant, (Yazdanfar, Barekatin and Zare Jahromi, 2020; Ebrahimi *et al.*, 2022; Kaya *et al.*, 2022) n'observent aucune différence radiographique significative dans leurs études.

(Ebrahimi *et al.*, 2022), qui étudie le succès clinique et radiographique d'une pulpotomie sur molaire temporaire avec du MTA en combinaison ou non avec une irradiation au laser ne constate aucune différence significative. Mais le groupe MTA combiné à du laser à faible intensité présente de meilleurs taux de succès radiographiques en comparaison avec les autres groupes.

(Kaya *et al.*, 2022) observe qu'il n'y a pas de différence significative entre les groupes irradiés comparativement aux non irradiés en termes de succès radiographique. Mais le groupe irradié avec de l'hydroxyde de calcium présente, de manière non significative, des résultats supérieurs à de l'hydroxyde de calcium seul.

Ainsi, l'irradiation au laser ne semble pas apporter d'atout majeur en termes de taux de réussite radiographique.

4.5.6 Facteurs liés aux paramètres du laser

Différents paramètres d'exposition ont été utilisés dans les études ayant recours au même type de laser tels que le mode de fonctionnement, la puissance moyenne, la fréquence des impulsions

(« pulse »), le temps d'exposition et la densité énergétique. La modification de certains influence la nature de l'effet laser sur les tissus pulpaire dentaires. (Figure 21)

Ainsi, (Baraba *et al.*, 2018) a étudié le comportement des tissus face à une augmentation de la température suite à l'irradiation au laser Er :YAG sous différents modes.

La température est significativement plus élevée pour les groupes avec des impulsions (super petits, petits, moyens) par rapport au groupe contrôlé par feedback par fluorescence. (Figure 21)

En effet, plus le temps des impulsions est faible, plus le temps de repos entre les phases d'activités du laser est faible et donc le temps de refroidissement des tissus aussi.

Il est donc préférable de choisir un laser Er : YAG avec un « feed-back » contrôle qui permet d'éviter une trop forte élévation de la température au niveau des tissus.

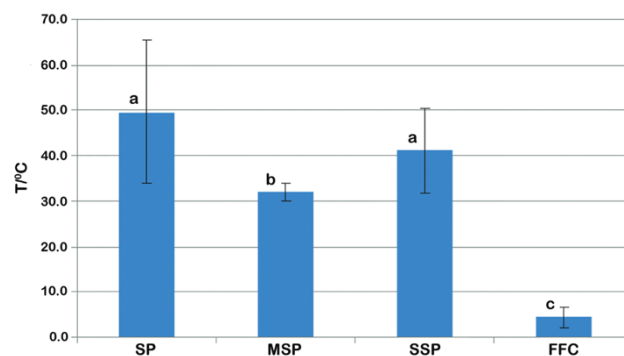


Figure 21: Diagramme représentant les températures (en °C) atteintes en fonction de la durée des pulses (SP : short pulse; MSP: medium short pulse; SSP: super short pulse; FFC: fluorescence feedback control) (Baraba *et al.*, 2018)

Les lasers, en particulier les lasers diode à faibles densités énergétiques, semblent avoir un effet bénéfique sur la prolifération, la viabilité et la migration des cellules souches dentaires, ainsi que l'apexogenèse et la formation de tissus dentaires. Cependant, les résultats varient selon les types de lasers et paramètres d'irradiation utilisés. Il est crucial de continuer à optimiser ces paramètres pour maximiser les bénéfices cliniques et biologiques tout en minimisant les effets négatifs.

Conclusion

Les thérapies au laser sur les pulpes vivantes montrent un potentiel significatif pour améliorer les traitements endodontiques, en stimulant la régénération tissulaire, en réduisant l'inflammation et en favorisant la guérison. Les études citées montrent des résultats encourageants dans le domaine de la photobiomodulation. Les résultats obtenus dans les études in vitro montrent des résultats prometteurs. En revanche, les études in vivo et cliniques, moins probantes, offrent des résultats mitigés, équivalents voire inférieurs aux techniques actuelles.

Le laser majoritairement utilisé reste le laser diode du fait de sa facilité de manipulation (appareil compact), son coût moindre et les multiples traitements possibles.

Cependant, les résultats dépendent fortement des paramètres d'irradiation utilisés. Nous pouvons observer des puissances, un temps d'irradiation et une densité énergétique très variées.

Ainsi, une optimisation et une standardisation de ces paramètres sont essentielles pour maximiser les bénéfices cliniques et biologiques du laser ainsi que d'éviter les effets potentiellement néfastes.

Au vu des multiples lasers existants ainsi que des nombreux paramètres possibles, il paraît essentiel et évident pour le praticien de se former avant toute chose.

De plus, des recherches supplémentaires sont primordiales pour affiner ces paramètres et établir des protocoles de traitement optimisés pour différentes conditions cliniques. Il est indispensable de réaliser des études cliniques in vivo et à plus grande échelle avec un échantillon plus important pour prouver de l'efficacité réelle du laser.

BIBLIOGRAPHIE

- Afkhami, F. *et al.* (2023) 'The application of lasers in vital pulp therapy: a review of histological effects', *Lasers in Medical Science*, 38(1), p. 215.
- Al-Agele, A.D.N. and Jamil, B.A.G. (2019) 'In vivo Histological Evaluation of Effect of Direct Pulp Capping with BMP7 with and without Laser Therapy', *J. Pharm. Sci.*, 11.
- Alharbi, H. *et al.* (2023) 'The effect of low-level laser on the quality of dentin barrier after capping with bioceramic material: A histomorphometric analysis', *Australian Endodontic Journal*, 49(1), pp. 27–37.
- Al-Shaimaa Abdel Hafiz, A.R. *et al.* (2020) 'Case Report: Single visit photo-activated disinfection in regenerative endodontics', *F1000Research* 2020, 8:1519
- Alsofi, L. *et al.* (2022) 'Pulpal and periapical tissue response after direct pulp capping with endosequence root repair material and low-level laser application', *BMC Oral Health*, 22(1), p. 57.
- Asnaashari, M. *et al.* (2022) 'The Effect of Low-Level Laser Therapy on the Viability of Human Dental Pulp Stem Cells', *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 13, p. e60.
- Bahman, S. *et al.* (2020) 'Combined effects of calcium hydroxide and photobiomodulation therapy on apexogenesis of immature permanent teeth in dogs', *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 207, p. 111867.
- Baraba, A. *et al.* (2018) 'Efficacy of removal of cariogenic bacteria and carious dentin by ablation using different modes of Er:YAG lasers', *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 51(3), p. e6872.
- Bidar, M. *et al.* (2021) 'Does the application of GaAlAs laser and platelet-rich plasma induce cell proliferation and increase alkaline phosphatase activity in human dental pulp stem cells?', *Lasers in Medical Science*, 36(6), pp. 1289–1295.
- Carroll, J.D. *et al.* (2014) 'Developments in low level light therapy (LLLT) for dentistry', *Dental Materials*, 30(5), pp. 465–475.
- De Freitas, L.F. and Hamblin, M.R. (2016) 'Proposed Mechanisms of Photobiomodulation or Low-Level Light Therapy', *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 22(3), pp. 348–364.
- Deluca, M.C.D.C. *et al.* (2021) 'Cytotoxic, Migration, and Angiogenic Effects of Photodynamic Therapy and Photobiomodulation Associated with a Revascularization Protocol', *Journal of Endodontics*, 47(1), pp. 69–77.
- Dilouya, D.V. *et al.* : *Les Lasers tout simplement*. Information dentaire; 2019.
- Ebrahimi, M. *et al.* (2022) 'Clinical and radiographic effectiveness of mineral trioxide aggregate (MTA) partial pulpotomy with low power or high power diode laser irradiation in deciduous molars: a randomized clinical trial', *Lasers in Medical Science*, 37(4), pp. 2293–2303.
- El Nawam, H. *et al.* (2019) 'Low-level laser therapy affects dentinogenesis and angiogenesis of in vitro 3D cultures of dentin-pulp complex', *Lasers in Medical Science*, 34(8), pp. 1689–1698.
- Gidel, A. 'La biostimulation assistée par laser en parodontologie'. Th D Odontol Marseille; 2017

Huang, Q. *et al.* (2023) 'Current Applications and Future Directions of Lasers in Endodontics: A Narrative Review', *Bioengineering*, 10(3), p. 296.

Kaya, C. *et al.* (2022) 'The comparison of calcium hydroxide + biostimulation, calcium hydroxide, formocresol, and MTA pulpotomies without biostimulation in primary teeth: 12-months clinical and radiographic follow-up', *Lasers in Medical Science*, 37(5), pp. 2545–2554.

Kermanshah, H. *et al.* (2020) 'Direct Pulp Capping With ProRoot MTA Alone and in Combination With Er:YAG Laser Irradiation: A Clinical Trial', *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 11(Suppl 1), pp. S60–S66.

Kuo, H.-Y. *et al.* (2018) 'Clinical outcomes for primary molars treated by different types of pulpotomy: A retrospective cohort study', *Journal of the Formosan Medical Association*, 117(1), pp. 24–33.

Lee, H.-N. *et al.* (2023) 'Efficacy assessment of laser Doppler imager in diagnosing the pulp vitality after dental trauma', *Journal of Dental Sciences*, 18(2), pp. 618–625.

Marques, N.P. *et al.* (2019) 'A preliminary comparison between the effects of red and infrared laser irradiation on viability and proliferation of SHED', *Lasers in Medical Science*, 34(3), pp. 465–471.

Moreira, M.S. *et al.* (2021) 'Physical and Biological Properties of a Chitosan Hydrogel Scaffold Associated to Photobiomodulation Therapy for Dental Pulp Regeneration: An In Vitro and In Vivo Study', *BioMed Research International*. Edited by I. Voza, 2021, pp. 1–10.

Ngoc, V.T.N. *et al.* (2018) 'Pulpotomy management using laser diode in pediatric patient with severe hemophilia A under general anesthesia—A case report', *Special Care in Dentistry*, 38(3), pp. 155–159.

Nunzi, D. 'Utilisation du laser en endodontie'. Th D Odontol Marseille; 2018

Shalash, I.A. *et al.* (2022) 'Efficacy of photobiomodulation when used with calcium hydroxide for pulp capping of dogs' teeth', *International journal of health sciences*, pp. 9120–9132.

Suzuki, M. *et al.* (2019) 'Clinical and Histological Study on Direct Pulp Capping With CO2 Laser Irradiation in Human Teeth', *Operative Dentistry*, 44(4), pp. 336–347.

Tozar, K.N. and Erkmén Almaz, M. (2020) 'Evaluation of the Efficacy of Erbium, Chromium-doped Yttrium, Scandium, Gallium, and Garnet Laser in Partial Pulpotomy in Permanent Immature Molars: A Randomized Controlled Trial', *Journal of Endodontics*, 46(5), pp. 575–583.

Wang, J. *et al.* (2022) 'Clinical efficacy of Er:YAG laser application in pulpotomy of primary molars: a 2-year follow-up study', *Lasers in Medical Science*, 37(9), pp. 3705–3712.

Yamakawa, S. *et al.* (2018) 'Effects of Er:YAG and Diode Laser Irradiation on Dental Pulp Cells and Tissues', *Int. J. Mol. Sci.* [Preprint].

Yazdanfar, I., Barekatin, M. and Zare Jahromi, M. (2020) 'Combination effects of diode laser and resin-modified tricalcium silicate on direct pulp capping treatment of caries exposures in permanent teeth: a randomized clinical trial', *Lasers in Medical Science*, 35(8), pp. 1849–1855.

Yong, J. *et al.* (2023) 'Photobiomodulation Therapy and Pulp-Regenerative Endodontics: A Narrative Review', *Bioengineering*, 10(3), p. 371.

Yu, L. *et al.* (2022) 'Revascularization of an Immature Permanent Tooth with Periapical Periodontitis Using Concentrated Growth Factor Assisted by Erbium Laser (2940 nm) Irrigation: A Case Report', *Applied Sciences*, 12(9), p. 4751.

Zaccara, I.M. *et al.* (2020) 'Photobiomodulation therapy improves human dental pulp stem cell viability and migration in vitro associated to upregulation of histone acetylation', *Lasers in Medical Science*, 35(3), pp. 741–749.

Zafari, J. *et al.* (2022) 'Combination of Dental Capping Agents With LowLevel Laser Therapy Increases the Cell Viability Percent of Stem Cells From Apical Papilla (SCAPs)', *Journal of Lasers in Medical Sciences*, 13, p. e58.

REHEL Thelma

Le laser et les thérapies sur pulpes vivantes : Revue de littérature

RÉSUMÉ : L'utilisation des lasers en médecine a révolutionné de nombreux domaines, offrant des solutions innovantes et moins invasives pour diverses pathologies.

Dans le domaine de la dentisterie, l'utilisation du laser représenterait une avancée significative offrant une alternative moderne aux méthodes traditionnelles.

Cette revue de littérature porte sur l'utilisation des lasers dans les thérapies sur pulpes vivantes, telles que le coiffage pulpaire, la pulpotomie et la photobiomodulation. Basée sur une sélection de 32 articles en anglais issus des bases de données PubMed et Scopus, cette étude met en évidence la récurrence de l'utilisation de certains types de lasers, notamment le laser diode, qui semble être le plus performant pour ce type de traitement visant à préserver une pulpe vivante et saine.

Divers paramètres ont été testés, certains se révélant plus pertinents que d'autres. Le laser, notamment utilisé dans la photobiomodulation, montre des résultats encourageants pour l'avenir. En revanche, selon les études, son utilisation pour le coiffage pulpaire ou la pulpotomie paraît moins prometteuse, offrant des résultats équivalents, voire inférieurs, aux techniques actuelles. Il paraît essentiel de poursuivre les recherches en photobiomodulation à travers des études in vivo, afin de confirmer la validité des résultats obtenus lors des expériences in vitro.

RUBRIQUE DE CLASSEMENT :

REVUE DE LITTÉRATURE

MOTS-CLÉS :

- Laser
- Endodontie
- Thérapies sur pulpes vivantes
- Photobiomodulation

JURY :

Président : M. Le Professeur Reza ARBAB-CHIRANI

Directrice : Mme. Le Docteur Karen VALLAEYS

Assesseurs : Mme. Le Docteur Valérie CHEVALIER-HÉRISSET

Mme. Le Docteur Fanny BERBEL

M. Le Docteur Kevin-John FOUILLEN

Invité : M. Le Docteur Christophe MORVAN