



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 4971

To cite this version :

MASSET, Mikaël. *Le laser CO2 en ophtalmologie : perspectives d'utilisation chez l'animal*. Thèse d'exercice, Médecine vétérinaire, Toulouse 3, 2011, 124 p.

Any correspondance concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@inp-toulouse.fr.

LE LASER CO₂ EN OPHTALMOLOGIE : PERSPECTIVES D'UTILISATION CHEZ L'ANIMAL

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par

MASSET Mikaël, Maurice, Mohammed

Né, le 20 mai 1983 à MEULAN (78)

Directeur de thèse : M. Alain REGNIER

JURY

PRESIDENT :

M. Jean-Louis ARNE

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEURS :

M. Alain REGNIER

Professeur à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Mme Patricia MEYNAUD-COLLARD

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Jean-Louis ARNE

Président de notre jury de thèse

Professeur des Universités à Toulouse

Praticien hospitalier

Ophthalmologie

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.

Hommages respectueux.

A Monsieur le Professeur Alain REGNIER

Directeur de thèse

Professeur de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Physiopathologie oculaire

Pour ses précieux conseils dans l'élaboration de ce travail.

Profonde reconnaissance.

A Madame le Docteur Patricia MEYNAUD-COLLARD

Assesseur du jury

Maître de Conférences de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie Chirurgicale

Qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse.

Sincères remerciements.

A mes parents Claude et Malika, du fond du cœur, pour l'amour qu'ils m'ont donné tout au long de ma vie, pour leur soutien indéfectible à chaque fois que j'ai eu besoin d'eux, malgré la distance. Pour m'avoir toujours poussé à travailler dur et pour les sacrifices auxquels ils ont consenti afin que je puisse réaliser ce que voulais faire dans la vie. Je n'ai compris que récemment que cela a souvent été plus dur pour eux que pour moi... Le résultat est là.
Je vous aime.

A ma sœur Barbara, également pour son soutien et son amour, pour tous les bons moments que l'on passe ensemble, et pour son écoute si attentive, malgré ses propres préoccupations. Pour sa rare capacité à exploiter la vertu cathartique de la verbalisation. Je sais que je ne suis pas toujours à la hauteur, mais je te promets d'arranger ça...La complicité qui nous uni se réveille à chaque fois qu'on se revoit.

A mon grand-père Farid, qui fut pour moi un second père, pour tout ce qu'il m'a appris et enseigné. Tu me manques.

Je sais que tu me regardes de là-haut (ce qui est un peu flippant parfois ...), et j'espère que tu es fier de ton petit fils. Merci pour tout Papi...

A ma grand-mère Francette, également pour l'amour et l'éducation qu'elle m'a prodigué, durant toute ma jeunesse et encore maintenant...Merci Mamie.

A Typhon, pour m'avoir démontré qu'on peut très bien avoir quatre pattes, des poils et des mamelles, et ne pas pouvoir être défini comme un « Mammifère Supérieur ».

A mes grands-parents Maurice et Micheline, également pour toute leur affection, leur gentillesse, les bons petits plats, et pour leur soutien indispensable notamment pour le concours. Je n'aurais pas pu réussir sans vous. Gros bisous.

A toute ma petite famille que j'aime et que je retrouve toujours avec plaisir : Mimi et Laurent, Thierry et Nadia, Djamila et Pasquale, Karimus, Michel et Françoise, mon gang de

cousins-cousines, Laura, Marine, Vincent, Emma, Céline, Jérôme et bien sûr Anne, Aurélien et Claire, Emilie et David, pour les réunion de famille chez les uns et les autres...

A mes amis de Gargenville

Guillaume *aka* le grand Guigui (je sais, j'ai toujours été le seul à t'appeler comme ça), Jérémie *aka* Mouch'o'War (la terreur des assureurs) et Julien *aka* Julien (chirurgien auriculaire dans l'âme depuis tout p'tit)

25 ans qu'on se connaît, à nos âges, on peut parler d'amitié solide...

A Lalouze, le plus grand groupe de rock de l'Histoire de l'Humanité de L'ENVT, dont les attentats sonores auront fait trembler le Cercle sur ses fondations.

A Léni, pour son interprétation de « Santana meurt sur scène ». T'es un vrai copain.

A Taquet, le Guitar Hero, qu'un inconscient aura montré à Michael Jackson dans une vidéo où il danse sur Billie Jean en fin de Boom (c'était le 25 juin 2009...)

A Mathieu, bassiste-pianiste-percussionniste de talent que j'espère revoir bientôt

A Far-West, pour être toujours partant pour un bœuf, une répèt', ou une bière

A Bilitis, pour avoir mis un peu de finesse dans ce monde de brute

A Lotfi, chanteur loveur avec qui on aura bien trippé, du rock au raï (nan j'déconne pas le raï)

Aux p'tits jeunes Vincent, Maxime et Marie qui auront bien supporté ces gros lourds de vieux avec leur musique de m...

A tous les musicos qui ont mis, mettent et mettront l'ambiance cette Ecole.

A mes colloc's des P'tits Lu, première version,

Baptiste, Léni et Mymy mon amie... Cette colloc' a été une des périodes les plus sympas de ma vie... pour tous nos délires, les plans galères, les révisions à plusieurs c'est mieux et puis non en fait on avance pas, les bonnes bouffes à l'arrache devant la cheminée ou les barbeucs sur la terrasse au rythme des essais de l'A380, la queue à la salle de bain, la vaisselle de 2 semaines et la superbe décoration des toilettes du haut.

A mes colloc's des P'tits Lu, deuxième version,

Walou, Valentine, et surtout le bon vieux Pinpin, avec ses pintades/faisans chassés du jour et fristouillés comme il faut.

D'une association fortuite et improbable est née une profonde affection (surtout pour Val mais enfin bref...) encore une époque que j'ai adoré.

A tous les Saint-Louisards, devenus Toulousains ou non, Delphine P. ma petite carrée, Gus, Brice, Pascal B co-piaule forever, Guillaume L. pour les tontes mutuelles entre deux ronéos, Paupau, Mando, Mathieu, Yann, Khony, Elodie, Mag., Pierre, Sophie et Julie mes bizuthes, pour ces deux années de détente à Paris dans la douceur de vivre la plus béate. La déconne était alors proportionnelle à la masse de travail : nucléaire.

A mes meilleurs amis de la Cité, Piton, Pozzanne, et Delphine, pour les squattes réciproques, promenades de chiens et autres préchauffes...j'espère qu'on se reverra bientôt.

A toute la promo Brard, une belle équipe de fêtards interdite de restau dans un périmètre de 50 km...Aude, Big Ben, JM, Foufoune, Milou, Walou, Gazou naturellement, ce bon vieux Nath, Bep, Mado, Jeanne, Bousse, Babar, Nico, Papa, Stephanie D., Cyrielle, Majida, Florian, Thomas, Marie F., Marie B., MLB, FX, Raoul, Crado, Larigue, Arnaud, Alexandra L., Alexandra A., Vincent, Cyril, Alex B., Fanny, Ronsard et les autres...

A tous les potes et potesses de ces années d'Ecole, Docteurs, plumes, barbots et poulots (voire petits poulots) grâce à qui j'aurai passé des moments d'anthologie, en boom, aux cliniques ou dans les caves (« même jeu, mêmes règles, par la droite ! »...)

Mickey, Aurélie L., Aurélie D., Charlotte, Virginie, Manu S., Isa, Alien, Iban, Davy, Kara, Erik Van Leui, Nico A., Thomas, Laure, Vincent, Marie V., Lionel, Hélène, Sophie A., Romain J., Claire C.

A Valentine, pour ces 2 ans et demi passés ensemble. J'ai beaucoup appris avec toi et la Pitch' sur le bien-être des lagomorphes en milieu urbain, entre autres choses. Je ne peux pas mettre tout ce que je voudrais te dire, mais le cœur y est.

A Mariusz Pudzianowski, l'homme le plus fort du monde ...J'te prends quand tu veux.

A tous ceux que j'ai oubliés parce que je suis à la bourre pour aller à l'imprimerie, ne m'en veuillez pas...

**Ministère de l'Agriculture et de la Pêche
ECOLE NATIONALE VETERINAIRE DE TOULOUSE**

Directeur : M. A. MILON

Directeurs honoraires : M. G. VAN HAVERBEKE.
M. P. DESNOYERS

Professeurs honoraires :

M. L. FALIU M. J. CHANTAL M. BODIN ROZAT DE MENDRES NEGRE
M. C. LABIE M. JF. GUELFY M. DORCHIES
M. C. PAVAU M. EECKHOUTTE
M. F. LESCURE M. D.GRIESS
M. A. RICO M. CABANIE
M. A. CAZIEUX M. DARRE
Mme V. BURGAT M. HENROTEAUX

PROFESSEURS CLASSE EXCEPTIONNELLE

M. **AUTEFAGE André**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BRAUN Jean-Pierre**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **EUZEBY Jean**, *Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie*
M. **FRANC Michel**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
M. **MARTINEAU Guy**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*
M. **PETIT Claude**, *Pharmacie et Toxicologie*
M. **TOUTAIN Pierre-Louis**, *Physiologie et Thérapeutique*

PROFESSEURS 1° CLASSE

M. **BERTHELOT Xavier**, *Pathologie de la Reproduction*
Mme **CLAUW Martine**, *Pharmacie-Toxicologie*
M. **CONCORDET Didier**, *Mathématiques, Statistiques, Modélisation*
M. **CORPET Denis**, *Science de l'Aliment et Technologies dans les Industries agro-alimentaires*
M. **DELVERDIER Maxence**, *Anatomie Pathologique*
M. **ENJALBERT Francis**, *Alimentation*
M. **REGNIER Alain**, *Physiopathologie oculaire*
M. **SAUTET Jean**, *Anatomie*
M. **SCHELCHER François**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

PROFESSEURS 2° CLASSE

Mme **BENARD Geneviève**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
M. **BOUSQUET-MELOU Alain**, *Physiologie et Thérapeutique*
Mme **CHASTANT-MAILLARD Sylvie**, *Pathologie de la Reproduction*

- M. **DUCOS Alain**, *Zootchnie*
M. **DUCOS DE LAHITTE Jacques**, *Parasitologie et Maladies parasitaires*
M. **FOUCRAS Gilles**, *Pathologie des ruminants*
Mme **GAYRARD-TROY Véronique**, *Physiologie de la Reproduction, Endocrinologie*
M. **GUERRE Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mme **HAGEN-PICARD Nicole**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **JACQUIET Philippe**, *Parasitologie et Maladies Parasitaires*
M. **LEFEBVRE Hervé**, *Physiologie et Thérapeutique*
M. **LIGNEREUX Yves**, *Anatomie*
M. **PICAVET Dominique**, *Pathologie infectieuse*
M. **SANS Pierre**, *Productions animales*
Mme **TRUMEL Catherine**, *Pathologie médicale des Equidés et Carnivores*

PROFESSEURS CERTIFIES DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

- Mme **MICHAUD Françoise**, *Professeur d'Anglais*
M **SEVERAC Benoît**, *Professeur d'Anglais*

MAITRES DE CONFERENCES HORS CLASSE

- Mle **BOULLIER Séverine**, *Immunologie générale et médicale*
Mme **BOURGES-ABELLA Nathalie**, *Histologie, Anatomie pathologique*
M. **BRUGERE Hubert**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mle **DIQUELOU Armelle**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
M. **JOUGLAR Jean-Yves**, *Pathologie médicale du Bétail et des Animaux de Basse-cour*

MAITRES DE CONFERENCES (classe normale)

- M. **ASIMUS Erik**, *Pathologie chirurgicale*
M. **BAILLY Jean-Denis**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mme **BENNIS-BRET Lydie**, *Physique et Chimie biologiques et médicales*
M. **BERGONIER Dominique**, *Pathologie de la Reproduction*
M. **BERTAGNOLI Stéphane**, *Pathologie infectieuse*
Mle **BIBBAL Delphine**, *Hygiène et Industrie des Denrées alimentaires d'Origine animale*
Mme **BOUCLAINVILLE-CAMUS Christelle**, *Biologie cellulaire et moléculaire*
Mle **CADIERGUES Marie-Christine**, *Dermatologie*
M. **CONCHOU Fabrice**, *Imagerie médicale*
M. **CORBIERE Fabien**, *Pathologie des ruminants*
M. **CUEVAS RAMOS Gabriel**, *Chirurgie Equine*
M. **DOSSIN Olivier**, *Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores*
Mlle **FERRAN Aude**, *Physiologie*
M. **GUERIN Jean-Luc**, *Elevage et Santé avicoles et cunicoles*
M. **JAEG Jean-Philippe**, *Pharmacie et Toxicologie*
Mle **LACROUX Caroline**, *Anatomie Pathologique des animaux de rente*
Mme **LETRON-RAYMOND Isabelle**, *Anatomie pathologique*
M. **LIENARD Emmanuel**, *Parasitologie et maladies parasitaires*
M. **LYAZRHI Faouzi**, *Statistiques biologiques et Mathématiques*
M. **MAILLARD Renaud**, *Pathologie des Ruminants*
M. **MAGNE Laurent**, *Urgences soins-intensifs*
M. **MATHON Didier**, *Pathologie chirurgicale*
M **MEYER Gilles**, *Pathologie des ruminants.*
Mme **MEYNAUD-COLLARD Patricia**, *Pathologie Chirurgicale*
M. **MOGICATO Giovanni**, *Anatomie, Imagerie médicale*
M. **NOUVEL Laurent**, *Pathologie de la reproduction*
Mle **PALIERNE Sophie**, *Chirurgie des animaux de compagnie*
Mme **PRIYMENKO Nathalie**, *Alimentation*

- Mme **TROGELER-MEYNADIER Annabelle**, *Alimentation*
M. **VOLMER Romain**, *Microbiologie et Infectiologie*
M. **VERWAERDE Patrick**, *Anesthésie, Réanimation*

MAITRES DE CONFERENCES et AGENTS CONTRACTUELS
--

- M. **SOUBIES Sébastien**, *Microbiologie et infectiologie*

ASSISTANTS D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE CONTRACTUELS

- Mlle **DEVIERS Alexandra**, *Anatomie-Imagerie*
M. **DOUET Jean-Yves**, *Ophthalmologie*
Mlle **LAVOUE Rachel**, *Médecine Interne*
Mlle **PASTOR Mélanie**, *Médecine Interne*
M. **RABOISSON Didier**, *Productions animales*
Mlle **TREVENEC Karen**, *Epidémiologie, gestion de la santé des élevages avicoles et porcins*
M. **VERSET Michaël**, *Chirurgie des animaux de compagnie*

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	1
Table des Matières.....	13
Introduction	21
Première Partie - Le Laser CO₂ : Principe de fonctionnement et effets sur les tissus.	23
A. Le Principe du Laser	23
1. Qu'est-ce que la Lumière ?	23
a. Définition	23
b. Comportement Ondulatoire de la Lumière.....	23
c. Approche Corpusculaire de la Lumière	24
d. Considérations Actuelles.....	24
2. De la Lumière au Laser	25
a. Trois possibilités d'Interaction Lumière/Matière.....	26
• Absorption	26
• Emission Spontanée.....	26
• Emission Stimulée	27
b. Le Laser : Une Emission Stimulée de Photons de Longueur d'Onde Déterminée 27	
• L'Inversion de Population	28
• Le Pompage	28
3. Production et Propriétés d'un Rayon Laser.....	28

a.	Une Cavité Résonnante/Optique	28
b.	Un Milieu Amplificateur	29
c.	Un Moyen de Pompage	29
d.	Les Propriétés d'un Faisceau Laser.....	30
4.	Transmission d'un Faisceau Laser	32
a.	Rappels d'Optique Géométrique.....	32
b.	Transmission par un Jeu de Miroirs	34
c.	Transmission par une fibre optique.....	34
d.	Transmission via un guide d'onde creux.....	35
B.	Effets d'un Rayonnement Laser sur les Tissus	36
1.	Importances des effets : Paramètres et puissances délivrées.....	36
2.	Natures des effets : interactions laser/tissus.....	36
a.	Effets Thermiques des Lasers	38
•	Création de la Source de Chaleur.....	38
•	Mécanismes de Transferts de Chaleur	39
•	Mécanismes de Dénaturation Tissulaire	39
•	Résultats de l'Effet Thermique sur les Tissus :	40
	Hyperthermie / Dénaturation:.....	40
	Coagulation :	40
	Vaporisation/Carbonisation :.....	40
b.	Effets Photochimiques.....	42
c.	Effets Photomécaniques	43
d.	Effet Photo-ablatif	44
C.	Conséquences pratiques pour le laser CO ₂	44
1.	Caractéristiques spécifiques	47

a.	Un milieu Amplificateur Gazeux	47
b.	Des Puissances et des Modes de Sortie Variables.....	48
c.	Une Transmission Particulière du Faisceau	50
2.	De nombreux Avantages en tant que « Bistouri optique ».....	52
a.	Excellente précision de coupe en mode focalisé.....	52
b.	Coagulation instantanée des capillaires sanguins.....	52
c.	Diminution de l'œdème post-opératoire	52
d.	Diminution de la sensation douloureuse	53
e.	Prévention des contaminations microbiennes	53
f.	Réduction des risques de dissémination tumorale.....	53
g.	Diminution des fasciculations musculaires	53
h.	Utilisation possibles sur des Patients équipés de pace-makers	54
3.	Inconvénients par rapport aux outils de section traditionnels	54
a.	Une cinétique de cicatrisation modifiée	54
b.	Des mesures de sécurité nécessaires	55
•	Sécurité du patient.....	55
•	Sécurité du personnel	55
•	Prévention des contaminations.....	55
c.	Un Coût Important	56
•	Coût d'Achat et d'Entretien	56
•	Coût de Formation.....	56
d.	Une difficulté d'analyse des pièces d'exérèses	56

Deuxième Partie - Les Applications du Laser CO₂ en Ophtalmologie Humaine. 58

A.	Utilisation du laser CO ₂ en mode focalisé : Outil de section.....	59
----	---	----

1.	Les Blépharoplasties	59
a.	Les blépharoplasties à visées purement esthétiques.....	60
	• Généralités.....	60
	• Les blépharoplasties par voie transcutanée	61
	• Les blépharoplasties par voie transconjonctivale.....	61
b.	Traitement de malpositions palpébrales.....	62
	• Rappels anatomiques.....	62
	• Le Ptosis	63
	Origines/Définitions	63
	Traitements.....	64
	Le laser CO ₂ dans le traitement du ptosis	64
	• L'Entropion	64
	Origines/Définitions	64
	Traitements.....	66
	• L'Ectropion	66
	Origines/définition	66
	Conséquences oculaires.....	67
	Traitement	67
2.	Autres interventions réalisables au laser CO ₂ focalisé	68
a.	Exérèses de masses palpébrales	68
	• Tumeurs.....	68
	• Masses non-tumorales	68
b.	Chirurgie des voies lacrymales	68
c.	Autres chirurgies	69
B.	Utilisation du laser CO ₂ en mode défocalisé : Outil de vaporisation.....	69

1.	Le laser CO ₂ en mode défocalisé, ultrapulsé, scanné : le relissage cutané au laser.	69
2.	Chirurgie de tumeurs d'origine vasculaires	70
a.	Les Lymphangiomes Oculaires	70
b.	Les Hémangiomes	71
3.	Chirurgies de tumeurs d'origine cutanées	72
a.	Kératose séborrhéique	72
b.	Carcinome basocellulaire des paupières	72
c.	Carcinome épidermoïde des paupières.....	73
4.	Exérèse d'autres lésions	74
a.	Xanthelasma palpebrum.....	74
b.	Lésions d'origines virales.....	75
•	Molluscum contagiosum :.....	75
•	Verrues/papillomes squameux	75
5.	Chirurgies de la tunique fibreuse de l'œil	76
a.	Chirurgie filtrante pour le traitement du glaucome.....	76
b.	Chirurgie cornéenne	76

Troisième partie : Utilisations du Laser CO₂ en Ophtalmologie Vétérinaire
..... **78**

A.	Chirurgie des paupières réalisables au laser CO ₂	79
1.	Tumeurs palpébrales	79
a.	Généralités.....	79
•	Les tumeurs palpébrales chez le chien	80
•	Les tumeurs palpébrales chez le chat	80
b.	Les adénomes des glandes de Meibomius.....	81
2.	Correction des malpositions palpébrales.....	86

a.	L'entropion.....	86
•	Contraction du collagène dermique des paupières au laser CO ₂ (14).....	87
•	Techniques classiques de corrections de l'entropion réalisables au laser CO ₂ (14,55).....	88
b.	L'ectropion.....	90
3.	Correction des anomalies ciliaires ou pileuses.....	90
4.	Autres lésions.....	91
B.	Chirurgie de la conjonctive, de la membrane nictitante et du système lacrymal réalisables au laser CO ₂	92
1.	Les masses conjonctivales.....	92
2.	Affections de la membrane nictitante.....	92
a.	Chirurgie d'enfouissement de la glande.....	92
b.	Eversion/inversion du cartilage.....	93
c.	Exérèse partielle /totale de la MN.....	93
3.	Traitement de la sténose du point lacrymal.....	94
C.	Chirurgie de la sclère et du limbe et de la cornée réalisables au laser CO ₂	94
1.	Les ulcères cornéens épithéliaux atones du chien.....	95
2.	Les séquestres cornéens superficiels du chat.....	96
3.	L'œdème cornéen par décompensation endothéliale.....	96
4.	Kératites microbiennes.....	97
5.	Vaporisation de tumeurs.....	97
D.	Enucléation.....	98
E.	Utilisations du laser CO ₂ en ophtalmologie équine.....	99
1.	La chirurgie des formes oculaires du carcinome épidermoïde chez le cheval.....	99
a.	Définition.....	99

b. Options thérapeutiques	100
c. Une utilisation du laser CO ₂ en fonction de la localisation du carcinome	100
2. Utilisation dans le traitement d'abcès cornéens	103
Conclusion	105
Annexes.....	107
Liste des figures	112
References BIBLIOGRAPHIQUES.....	114

INTRODUCTION

Le LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations, soit « amplification de la lumière par émission stimulée de radiations ») peut être défini comme étant une source de rayonnement optique cohérent, émettant le plus souvent un faisceau de rayonnement monochromatique (ultraviolet, visible, infrarouge).

Bien que le principe de l'émission stimulée de photons soit connu depuis le début du 20^e siècle (41), le développement des lasers n'est que relativement récent : en 1960 Maiman réalise le premier laser solide à rubis et en 1964 Patel réalise le premier laser à gaz CO₂.

Les lasers sont utilisés dans des secteurs d'activité aussi variés que l'industrie, les arts et spectacles, le domaine médical, la recherche fondamentale ou le domaine militaire. Leurs applications sont à l'origine de plusieurs Prix Nobel de Physique (1964, 1966, 1981, 1997, 2000, 2001 et 2005).

Depuis leur avènement en 1960, les secteurs des sources et des systèmes lasers ont toujours été des marchés en forte croissance ; selon la revue *Source Laser Focus*, en 2005, le marché mondial des sources lasers a été estimé à 1,5 milliards de dollars (hors diodes lasers) alors que le marché des systèmes lasers a été estimé à 6,3 milliards de dollars (hors diodes lasers).

Les lasers ont pris une importance croissante en médecine humaine depuis les 35 dernières années, pour devenir des outils maintenant indispensables, en dermatologie, en chirurgie générale et également en ophtalmologie.

Il existe une grande variété de lasers à usage médical (outils diagnostiques ou thérapeutiques). Leurs utilisations dépendent des longueurs d'onde qui les caractérisent, de la puissance qu'ils délivrent, et de leur durée d'émission. Ces paramètres (choisis par les

opérateurs) déterminent les types tissulaires avec lesquels ils vont interférer, ainsi que leurs effets sur ces tissus.

Le laser CO₂ à usage médical est principalement utilisé pour ses capacités de photo-section et de photo-ablation.

Malgré de nombreuses applications possibles, l'utilisation du laser CO₂ en médecine vétérinaire reste marginale en France, alors que de plus en plus de cliniques Nord-Américaines s'en équipent.

Connaissant son principe de fonctionnement, ses avantages et ses contraintes d'utilisation, ainsi que les applications actuelles en ophtalmologie humaine, quelles perspectives d'emploi sont envisageables en ophtalmologie vétérinaire ?

PREMIERE PARTIE - LE LASER CO₂ : PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET EFFETS SUR LES TISSUS.

A. Le Principe du Laser

(21,25,35,45)

1. *Qu'est-ce que la Lumière ?*

a. Définition

La lumière désigne communément le spectre des ondes électromagnétiques visibles par l'œil humain, c'est-à-dire comprises dans des longueurs d'onde comprises entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge).

En physique, on appelle souvent «lumière» des ondes électromagnétiques dont les longueurs d'ondes n'appartiennent pas à ce spectre : domaine de l'infrarouge ($\lambda > 780\text{nm}$) ou de l'ultra-violet ($\lambda < 380\text{nm}$).

(Cf. Annexe 1)

La lumière est intimement liée à la notion de couleur. C'est Newton qui proposa pour la première fois au XVII^e siècle un cercle des couleurs chromatiques basé sur la décomposition de la lumière blanche par un prisme.

b. Comportement Ondulatoire de la Lumière

En 1801, Thomas Young expérimente la diffraction et les interférences de la lumière, mais il faudra attendre près d'un demi-siècle pour que James Clerk Maxwell explique ce phénomène : il publie en 1865 un traité sur les ondes électromagnétiques, définissant la lumière comme une onde qui se propage sous la forme d'un rayonnement, le spectre de ce rayonnement n'étant

qu'une partie de l'ensemble du rayonnement électromagnétique, beaucoup plus large : infrarouge, ultraviolet, ondes radio, rayons X... . Les équations de Maxwell définissant le rayonnement électromagnétique auront de nombreuses applications dès le XIX^e siècle, et encore plus au XX^e siècle. Cependant, cette considération ondulatoire n'explique que les effets d'interaction de la lumière avec la matière (interférence et diffraction), mais pas la quantité d'énergie transportée par les ondes électromagnétiques.

c. Approche Corpusculaire de la Lumière

Au début du XX^e siècle, Einstein développe le concept de photon (de *photos*, lumière), particule de masse et de charge nulle, transportant un certain quantum d'énergie constituant l'unité de base de la lumière. Max Planck avait auparavant supposé que la matière interagissant avec une onde électromagnétique de fréquence ν ne pouvait recevoir ou émettre de l'énergie électromagnétique que par *paquets* de valeur bien déterminée égale à $h\nu$ – ces paquets étant appelés des *quanta*.

d. Considérations Actuelles

Au final, après de nombreuses hésitations sur le caractère strictement ondulatoire ou bien corpusculaire de la lumière, il est de nos jours admis que les rayonnements électromagnétiques puissent être considérés comme des photons, corpuscules de masse nulle transportant un *quantum* d'énergie E proportionnel à leur « vitesse d'ondulation », c'est-à-dire à leur fréquence (ou à leur longueur d'onde.), se déplaçant selon un vecteur globalement rectiligne dans le vide (Cf. Annexe 2). C'est la dualité onde-particule.

$$E = h.\nu$$

où h désigne la constante de Planck, et ν la fréquence du photon.

$$(h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s})$$

2. De la Lumière au Laser

De manière générale, on peut considérer qu'un atome (ou une molécule), peut se trouver dans deux types d'état : un état stable, fondamental, et un état « excité », instable. Ces états sont définis par les niveaux d'énergie (les orbites, définies et d'un nombre limité) des électrons gravitant autour du ou des noyaux. C'est le modèle planétaire de Bohr qui est repris ici, le plus simple pour expliquer le principe de la transition électronique, bien que se révélant inadéquat pour justifier les lois de l'électromagnétisme, et notamment les équations de Maxwell, ainsi que le fait que les interactions entre les rayonnements électromagnétiques peuvent être quantifiées.

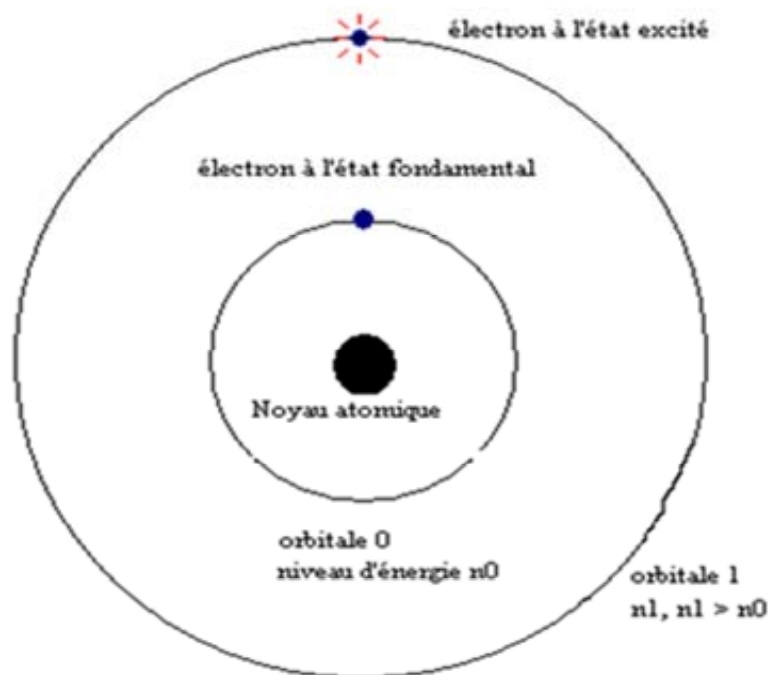


Figure 1 : Modèle des orbitales électroniques (Atome à 1 électron)

D'après (17)

Le passage d'un état à un autre s'accompagne d'un échange d'énergie avec l'extérieur, au profit de l'atome ou de l'extérieur, selon que l'atome passe d'un état fondamental à un état

excité ou inversement. L'état excité correspondant à un niveau plus élevé de l'énergie de l'atome.

Ainsi, si un atome passe d'un état excité à un état stable, il « restitue » à l'extérieur une quantité d'énergie correspondant à la différence d'énergie interne qui existe entre un atome avec un électron sur une orbite élevée et un atome avec un électron sur une orbite basse (fondamentale).

Inversement, pour passer d'un état stable à un état excité, l'atome doit recevoir une quantité d'énergie équivalente.

Ce quantum d'énergie correspond à un photon, caractérisé par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν (sachant que dans le vide, $\lambda=c/\nu$)

$$E = h.\nu$$

E = quantité d'énergie du photon émis ou absorbé (en Joules ou électronvolt)

h = constante de Planck ($h = 6,626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

ν = fréquence d'ondulation du photon (en Hertz)

a. Trois possibilités d'Interaction Lumière/Matière

- ***Absorption***

Lorsqu'un photon rencontre un atome possédant un électron sur une orbite fondamentale, l'énergie de ce photon peut provoquer la transition de cet électron vers une orbite atomique plus élevée, amenant ainsi l'atome à un état excité, instable. L'énergie véhiculée par ce photon correspond à la différence E_2-E_1 .

Il y a absorption de l'énergie lumineuse par la matière (Cf. Annexe 4 gauche).

- ***Emission Spontanée***

Il s'agit d'un processus inverse de celui décrit précédemment. Lorsqu'un atome est dans état excité, et donc instable par rapport à son état fondamental, il tend spontanément à émettre un photon dont l'énergie correspondra à la différence E_2-E_1 .

Il y a émission spontanée de lumière (ou d'onde électromagnétique) par la matière (Cf. Annexe 4 droite).

C'est par exemple le cas de la matière naturellement radioactive.

- *Emission Stimulée*

Lorsqu'un atome à l'état excité E2 reçoit un photon incident α d'énergie $h\nu$, et si cette énergie correspond à la différence de niveau intrinsèque E2-E1 (E1 étant le niveau d'énergie de l'atome à l'état fondamental), l'atome retourne au niveau E1 en émettant un photon β de même fréquence ; cette émission « déclenchée » par le photon incident constitue un exemple de transition provoquée à partir d'un état métastable vers un état stable : elle a donc été baptisée stimulée ou induite. Pour compléter le modèle, Einstein a émis l'hypothèse que ce phénomène était instantané, donc que le photon induit était en phase avec le photon incident, et enfin que sa direction était également celle du photon incident.

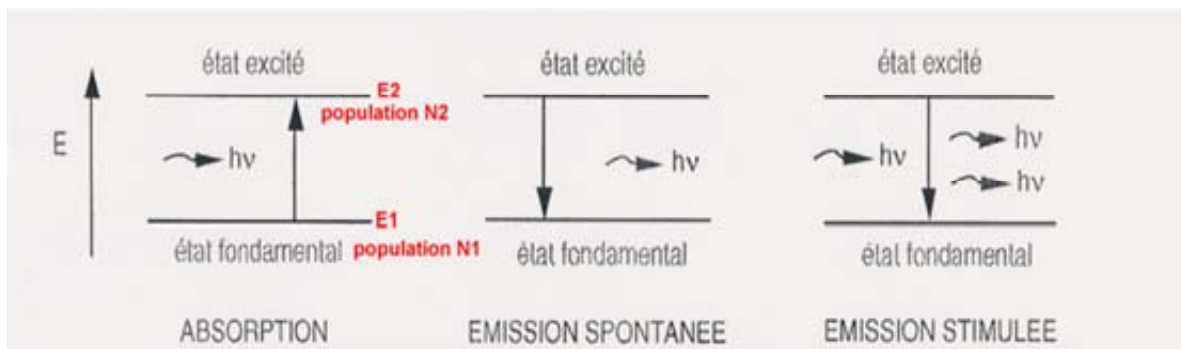


Figure 2 : Les trois possibilités d'interaction lumière/matière (photon d'énergie $h\nu$)

C'est ce phénomène qui est utilisé pour générer un faisceau laser : on part d'une population d'atomes excités identiques afin d'obtenir une multitude de photons identiques (c'est-à-dire de même longueur d'onde, et de même direction).

L'ensemble des principes décrits ici correspond au cas où le milieu est constitué d'atomes seuls. Mais ces mécanismes s'appliquent aussi sur des milieux constitués de molécules (comme le CO₂ par exemple). Les interactions se produisant dans ces conditions, plus complexes et difficiles à schématiser, ne seront pas détaillées.

b. Le Laser : Une Emission Stimulée de Photons de Longueur d'Onde Déterminée

L'émission d'un faisceau laser consiste à générer une multitude de photons identiques en direction et en longueur d'onde, de manière continue ou pulsée, en utilisant le principe de

l'émission stimulée. Si toutes les molécules que l'on va placer dans un même état excité (le milieu amplificateur) sont identiques, les photons émis le seront aussi.

- ***L'Inversion de Population***

L'émission stimulée exige donc de peupler le milieu d'atomes de niveau d'énergie supérieur, l'idéal étant de maintenir la condition : N_2 (pourcentage d'atomes excités) $>$ N_1 (pourcentage d'atomes stables), afin de disposer d'une réserve permanente d'atomes excités susceptibles d'émettre les photons désirés : cette condition constitue une **inversion de population** puisqu'à l'équilibre thermodynamique « naturel », N_2 serait très inférieur à N_1 , du moins à température raisonnable. On doit donc réaliser une inversion dans les proportions excités/stables de la population des atomes du milieu.

- ***Le Pompage***

Tout processus artificiel pour obtenir cette inversion est appelé **pompage**. Un milieu contenant une majorité d'atomes (ou de molécules) à l'état excité renferme d'avantage d'énergie interne que si ces derniers étaient à l'état stable, fondamental. Le pompage revient donc à fournir de l'énergie au milieu. On pourrait employer également le terme d'excitation du milieu. Cet apport d'énergie peut se faire de diverses manières (cf. infra), et la quantité d'énergie à fournir nécessaire pour obtenir l'énergie lumineuse de sortie voulue rentre dans le calcul du rendement du système laser.

Un laser est donc un système de production de lumière amplifiée par l'émission stimulée de photons (Cf. acronyme).

3. Production et Propriétés d'un Rayon Laser

a. Une Cavité Résonnante/Optique

Elle constitue le corps du système laser. C'est un espace fermé et opaque, le plus souvent équipé d'un système de refroidissement, possédant à une extrémité un miroir à réflexion totale, et à l'autre un miroir à réflexion partielle (de l'ordre de 95 à 98 %). Elle renferme le

milieu actif ou amplificateur et le dispositif de pompage. On parle également d'oscillateur laser.

b. Un Milieu Amplificateur

Il s'agit de la réserve d'atomes ou de molécules que l'on va utiliser pour produire le laser. La nature du milieu actif détermine la longueur d'onde précise qu'il délivre, cette longueur d'onde étant spécifique d'un type d'atome ou de molécule subissant une transition électronique donnée (spectrophotométrie). Les lasers se différencient par la nature du milieu actif : on distingue les lasers à gaz (hélium-néon, CO₂...), à solide (laser à rubis, néodyme...), à semi-conducteur (laser diode), à colorants, ou à liquides. Il existe en réalité des milliers de modèles de lasers différents, mais certains ne servent encore aujourd'hui que dans le domaine de la recherche.

c. Un Moyen de Pompage

Pompage optique :

Une lampe à décharge impulsionnelle puissante délivre un intense flash de lumière dans un large spectre (lumière blanche et ultraviolette). Le plus souvent le processus est répétitif avec une fréquence de quelques hertz à quelques dizaines d'hertz, imposée par le fonctionnement de la lampe elle-même et par les phénomènes thermiques. Le rendement de ce type de pompage reste cependant faible en raison de la dispersion spatiale de la lumière du flash.

Pompage électronique ou électrique :

Ce type de pompage s'adresse essentiellement aux lasers à gaz. La décharge électrique communique l'énergie nécessaire à l'inversion de population. Les électrons fortement accélérés d'une décharge électrique cèdent une partie de leur énergie cinétique aux atomes ou molécules d'un gaz sous pression réduite.

Pompage chimique :

Le stockage d'énergie sous forme de réactifs chimiques est très répandu; il présente l'avantage de pouvoir libérer rapidement, et dans un volume réduit, une énergie élevée en faisant appel à des réactions chimiques exothermiques pouvant provoquer l'excitation des molécules.

d. Les Propriétés d'un Faisceau Laser

Un faisceau laser a quatre principales propriétés : (89)

· Monochromaticité :

La lumière issue d'un laser est pratiquement monochromatique : la longueur d'onde est très précise car issue d'un seul type de transition électronique (la plupart du temps). Cette monochromaticité est capitale dans le choix de l'application du laser, car la « couleur » (terme courant employé même pour les lasers émettant hors du spectre visible) définira le type d'interaction avec la cible, selon le spectre d'absorption de celle-ci.

Pour le laser hélium néon : $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ (rouge)

Pour le laser CO_2 : $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ (invisible, infrarouge).

· Cohérence :

La lumière laser est cohérente. Tous les photons qui constituent le faisceau sont émis de façon ordonnée et avec la même identité de phase.

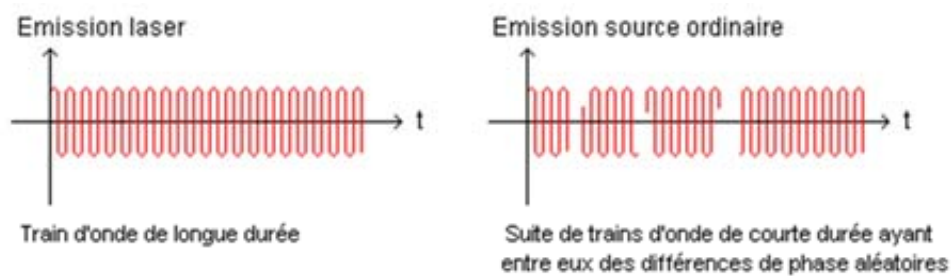


Figure 3 : Comparaison des trains d'ondes selon le mode d'émission

- L'émission de lumière par un laser s'effectue par des trains d'onde très longs, beaucoup plus longs que ceux émis par une source ordinaire (bonne cohérence temporelle). Cela joue sur la monochromaticité.

- Cette lumière laser a également une grande cohérence spatiale : deux points de la même source laser placés orthogonalement à la direction de propagation produisent des vibrations lumineuses (oscillations électromagnétiques) en accord de phase.

· Directivité :

Le faisceau laser est peu divergent. Il est très directif : par opposition à une source lumineuse « classique » (ampoule électrique par exemple), l'énergie lumineuse produite se concentre dans une direction très précise, ne divergent que de l'ordre de quelques minutes d'angle, même à plusieurs kilomètres).

· Puissance :

La directivité mentionnée plus haut explique le fait que même des lasers de faible puissance (quelques mW) peuvent avoir des effets importants sur leur cible : la puissance lumineuse solaire reçue par une loupe de 5 cm de diamètre suffit à enflammer du papier lorsqu'elle est correctement focalisée.

La puissance des lasers est très variable. Faible (quelques mW) ou moyenne pour des lasers à fonctionnement continu, elle peut devenir très élevée pour des lasers fonctionnant par impulsion, et atteindre 10^6 W, voire 10^{15} W pendant des durées très brèves (10^{-12} s.). C'est principalement dans l'industrie de la découpe et dans le domaine militaire que l'on emploie des lasers si puissants.

A la sortie du système laser, on a donc un faisceau lumineux monochromatique, extrêmement directif, dont la puissance lumineuse (également appelée irradiance) est stable et choisie selon les besoins.

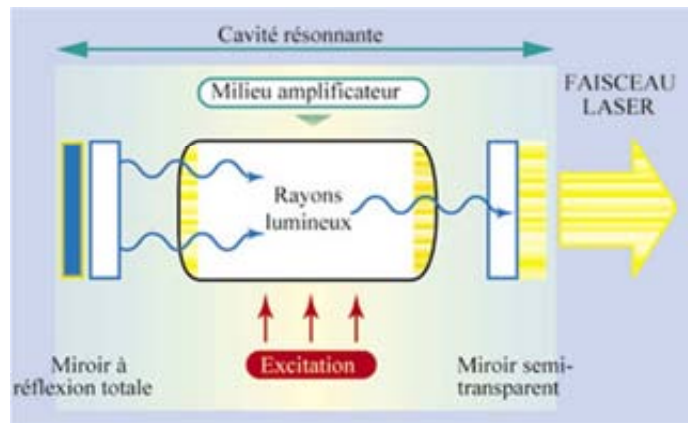


Figure 4 : Schéma d'un oscillateur laser

Comment transmettre ce faisceau jusqu'à la cible voulue, en ne perdant qu'un minimum de puissance et de directivité ?

4. Transmission d'un Faisceau Laser

a. Rappels d'Optique Géométrique

C'est la loi de la réflexion qui est mise en jeu dans la transmission d'un faisceau laser.

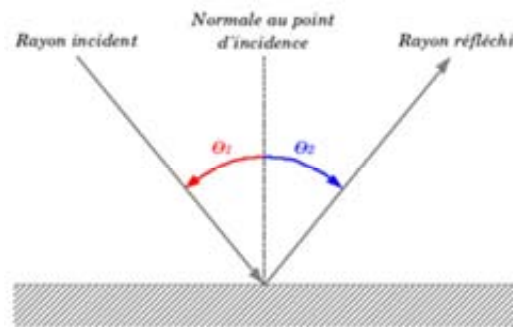


Figure 5 : Relation entre angle d'incidence et de réflexion d'un rayon lumineux sur une surface plane

On appelle angle d'incidence l'angle orienté θ_1 pris entre la normale au point d'incidence et le rayon incident. On appelle angle de réflexion l'angle orienté θ_2 pris entre la normale au point d'incidence et le rayon réfléchi.

Moyennant ces définitions la loi de la réflexion s'énonce ainsi :

- le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans le plan d'incidence
- $\theta_2 = -\theta_1$

Dans le cas des lasers, on assimile l'ensemble des photons émis à un seul rayon lumineux. Il en résulte deux types de transmission possibles : par des jeux de miroirs orientables, ou par un flexible dont les parois internes agiront comme une multitude de miroirs.

Les principales contraintes à respecter sont :

. Une perte de puissance minimale au cours de la transmission (le plus souvent l'énergie est perdue sous forme d'échauffement du dispositif de transmission.). Les matériaux doivent tendre vers une réflexion totale, afin de limiter l'absorption du flux. Par analogie à la transmission d'ondes sonore, on parle de pertes en décibels.

. Le maintien d'une directivité optimale (on peut toutefois corriger une divergence de sortie à l'aide d'une lentille judicieusement placée). Néanmoins, un certain nombre de situations nécessitent un faisceau divergent à la sortie finale : c'est par exemple le cas dans l'utilisation du laser CO₂ en mode défocalisé (détaillé plus loin).

Le choix du type de transmission dépend de la longueur d'émission et du régime d'émission (continu ou impulsionnel). Le faisceau en sortie du système de transmission est pratiquement toujours divergent et l'effet thérapeutique est fonction de la distance système de transmission-tissus (paramètre opérateur dépendant). Des systèmes de balayage automatisés ont donc été développés pour obtenir des effets homogènes et reproductibles sur de grandes surfaces.

b. Transmission par un Jeu de Miroirs

Le principe en est simple : pour amener le faisceau laser depuis la sortie de la cavité résonante jusqu'à la cible, on place des miroirs correspondant aux articulations du bras de transmission. Un jeu d'engrenages très précis permet de faire que le faisceau laser rencontre le miroir avec un angle systématiquement égal à la moitié de l'angle formé par l'articulation. Il est réfléchi par le miroir avec le même angle, en étant donc toujours parfaitement aligné avec le segment suivant du bras articulé. Les lasers CO2 ancienne génération, les lasers excimères et rubis nécessitent ce mode de transmission. Ces bras sont encombrants, fragiles, et onéreux à entretenir.

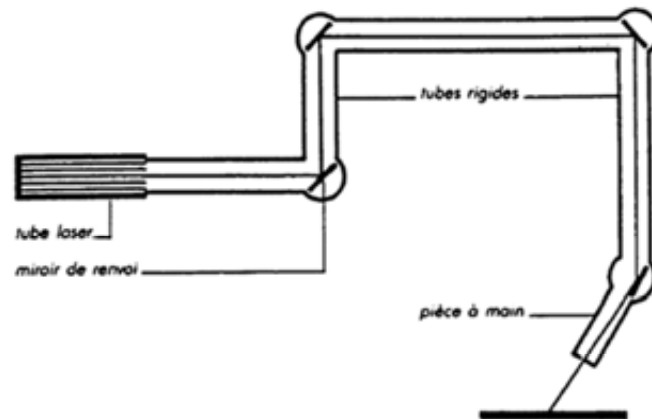


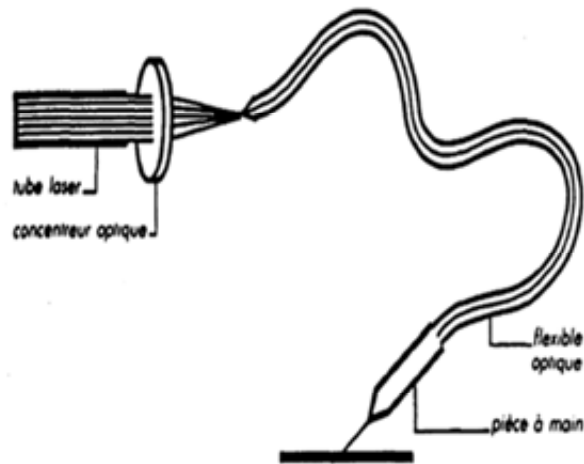
Figure 6 : Transmission d'un faisceau laser par bras articulé

Reproduit d'après (35)

c. Transmission par une fibre optique

Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions internes et totales. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique quasiment sans perte, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes même lorsque la fibre est courbée.

Les fibres optiques sont des fibres de quartz flexibles de faible diamètre très utiles pour la chirurgie de zones difficilement accessibles, ou des interventions sous endoscopie. Elles constituent le mode de transmission laser le plus économique à l'achat comme à l'entretien. Les lasers Nd :YAG, KTP, holmium et diode en sont le plus souvent équipés. Néanmoins, certains lasers ne peuvent en être équipés, les longueurs d'onde les caractérisant étant incompatible avec les matériaux utilisés habituellement.



*Figure 7 : Transmission d'un faisceau laser par fibre optique
Reproduit d'après (35)*

d. Transmission via un guide d'onde creux

Les guides d'ondes creux sont une sorte d'hybride entre les bras articulés à jeu de miroirs et les fibres optiques. De conception récente, ils sont constitués de tubes flexibles de métal, de plastique ou de céramique, avec une fine couche de métal réfléchissant en guise de tube interne. Ils présentent donc les avantages (maniabilité, coût d'entretien...) de la transmission par fibre optique, avec l'avantage de pouvoir être utilisés sur des lasers incompatibles avec celle-ci, tel le laser CO₂. (34,50,69)

B. Effets d'un Rayonnement Laser sur les Tissus

1. Importances des effets : Paramètres et puissances délivrées

L'effet d'un laser sur un tissu est corrélée à l'énergie qu'il va délivrer au tissu. Celle-ci dépend de trois paramètres : le temps d'exposition, la surface exposée (et donc le diamètre du faisceau) et la puissance de sortie délivrée. (8,23,28,30,35,98)

La puissance lumineuse, autrement appelée **irradiance**, s'exprime en Watt/cm². Multipliée par le temps d'exposition, elle donne l'énergie reçue par le tissu visé, ou encore **fluence** en Joules/cm². Pour une même irradiance, l'énergie reçue décroît quand augmente le diamètre du spot laser. Cela se produit lorsque l'on éloigne la cible de la distance focale d'un laser qui n'est pas absolument rectiligne. Ce phénomène permet donc d'employer un laser en mode focalisé ou bien défocalisé.

Lorsque l'on utilise un laser médical, on contrôle ces trois paramètres :

- Réglage de la puissance lumineuse : opéré sur l'appareil
- Réglage de la durée des impulsions : opéré sur l'appareil
- Taille du spot laser (et donc surface exposée) : distance de la cible établie par l'opérateur.

$$\text{Irradiance} = P_{\text{laser}} / \text{Surface du spot en Watts/cm}^2$$

$$\text{Fluence} = \text{Irradiance} \times \text{Temps}_{\text{expo}} \text{ en Joules/cm}^2$$

$$E_{\text{reçue}} = P_{\text{laser}} \times \text{Temps}_{\text{expo}} \text{ en Joules}$$

$$E_{\text{reçue}} = \text{Irradiance} \times \text{Surface du spot} \times \text{Temps}_{\text{expo}} \text{ en Joules}$$

2. Natures des effets : interactions laser/tissus

Lorsqu'un faisceau laser rencontre une surface, biologique ou non, plusieurs phénomènes sont mis en jeu : une partie du laser est simplement **réfléchi**e, et n'aura donc pas plus de conséquences sur la surface. Ce pourcentage réfléchi est important à connaître car il constitue une perte d'énergie, et une source de danger pour l'utilisateur. Il faut donc tenir compte du taux de réflectivité d'un tissu relatif à la longueur d'onde émise par le laser utilisé.

La lumière qui va alors effectivement pénétrer la surface sera soit **transmise** en profondeur, soit **absorbée** au fur et à mesure, les deux phénomènes s'équilibrant graduellement.

Dans le cas des tissus biologiques, la lumière qui a pénétré ne peut plus se propager selon un faisceau rectiligne comme à la sortie du tube laser : l'hétérogénéité des structures rencontrées produit une multitude de petites déviations : c'est la **diffusion optique**.

La diffusion joue un rôle important dans la distribution spatiale de l'énergie absorbée. Lorsque la lumière est peu absorbée (rouge et proche infrarouge), la pénétration en profondeur du faisceau serait importante si elle ne décroissait pas rapidement à cause de la diffusion.

L'effet recherché lors de l'utilisation d'un laser sur une matière biologique est celui impliquant la partie d'énergie lumineuse effectivement absorbée par le tissu visé.

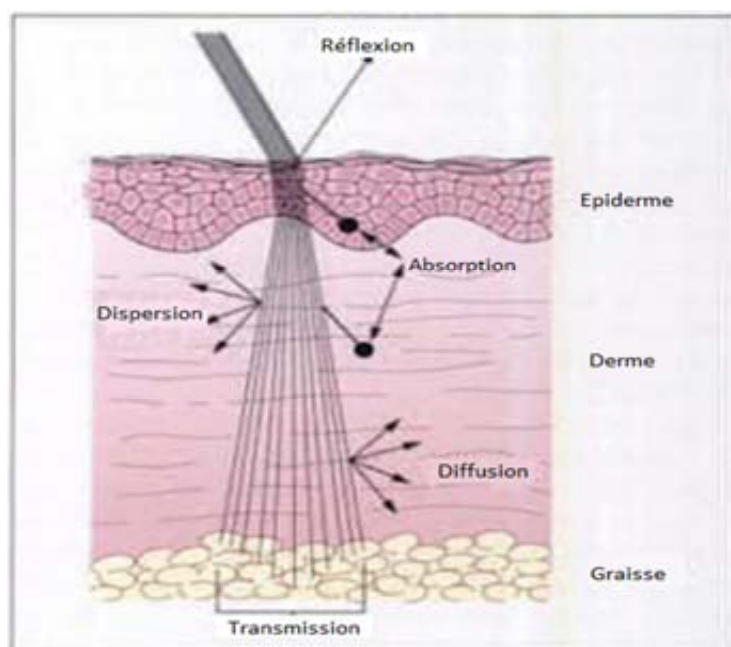


Figure 8 : Ensemble des phénomènes observés lorsqu'un laser rencontre la peau.

Les applications thérapeutiques des lasers peuvent être classées selon les 4 effets suivants sur les tissus biologiques :

- L'effet *thermique* : l'énergie lumineuse est transformée en chaleur ; c'est celui qui est le plus souvent impliqué dans les lasers médicaux, et celui qui nous intéresse dans l'étude du laser au CO₂.
- L'effet *photochimique* : la lumière induit des réactions chimiques ;
- L'effet *mécanique* : la lumière crée une onde de choc, un plasma ;
- L'effet *photoablatif* : la lumière provoque une ablation pure par rupture des liaisons chimiques sans effet thermique direct ;

a. Effets Thermiques des Lasers

L'effet thermique des lasers sur les tissus biologiques est un processus complexe résultant de trois phénomènes distincts : une **conversion** de lumière en chaleur, un **transfert** de chaleur et une **réaction tissulaire** liée à la température et la durée d'échauffement.

Cette interaction conduit à la dénaturation ou à la destruction d'un volume tissulaire variable. Les données connues sont les paramètres du laser (forme du faisceau, puissance, longueur d'onde, temps et mode d'émission) et le tissu à traiter (coefficients optiques, paramètres thermiques et coefficients de la réaction de dénaturation). (22)

- Création de la Source de Chaleur

La source de chaleur est créée par la conversion de la lumière laser en chaleur (comme évoqué dans le I.A.2.a, c'est l'interaction de type absorption qui est ici mise en jeu : l'énergie des photons incidents est convertie en agitation thermique des molécules cibles). La réflexion optique détermine quelle proportion du faisceau va effectivement pénétrer dans le tissu. La connaissance précise de la réflectivité des tissus est importante car elle peut atteindre des valeurs élevées (30 % à 50 % du faisceau de certains lasers sont réfléchis par la peau).

Cependant, pour les longueurs d'onde supérieures au spectre visible, la réflexion tend à diminuer considérablement.

L'absorption est fonction du couple longueur d'onde/chromophore. La plupart des molécules organiques ont une forte absorption dans l'ultraviolet (U.V.). En conséquence, les profondeurs de pénétration dans l'U.V. sont extrêmement faibles (quelques micromètres). Dans le visible (bleu, vert, jaune) l'absorption s'effectue principalement au niveau de l'hémoglobine et de la mélanine. Le rouge et le proche infrarouge (0,6 à 1,2 μm) sont peu absorbés et pénètrent profondément dans les tissus (cette pénétration est cependant limitée par la diffusion optique). Ensuite, dans l'infrarouge moyen et lointain, c'est l'eau qui absorbe intensément la lumière. Étant donné que l'eau est le principal composant de quasiment tous les tissus, les faisceaux de ces longueurs d'onde ne pénétreront que très superficiellement avant d'être convertis en chaleur. C'est la conversion en chaleur de la lumière absorbée qui est à l'origine d'une source de chaleur que l'on peut appeler "primaire".

- Mécanismes de Transferts de Chaleur

Le transfert de la chaleur dans les tissus va tendre à augmenter le volume de cette source de chaleur "primaire". Ce transfert est essentiellement assuré par le mécanisme de **conduction**, car l'influence de la circulation sanguine (transport par **convection**) est négligeable. La conduction peut être considérée comme un transfert d'énergie par interaction des particules du tissu. Ce transfert se fait aléatoirement des particules les plus énergétiques vers celles qui le sont le moins et aboutit à un volume chauffé "secondaire" plus volumineux que la source "primaire" où s'est effectuée la conversion de la lumière en chaleur. C'est ce volume chauffé "secondaire" qu'il faut prendre en considération pour étudier la dénaturation du tissu. Dans certains cas, notamment celui du laser au CO_2 , ce transfert de chaleur est indésirable, car il va concerner une zone périphérique où l'on ne souhaite pas intervenir.

- Mécanismes de Dénaturation Tissulaire

La dénaturation du tissu est le résultat final de l'action thermique. La connaissance de la cinétique de cette transformation est nécessaire pour décrire le processus de dénaturation.

Cette cinétique dépend de la température atteinte dans les tissus, de la durée de l'échauffement, du temps de relaxation thermique du tissu et de la susceptibilité du tissu à l'agression thermique.

- Résultats de l'Effet Thermique sur les Tissus :

Hyperthermie / Dénaturation:

Elle signifie une élévation modérée de la température, de quelques degrés centigrades, pouvant correspondre par conséquent à des températures de 41°C à 44°C pendant plusieurs dizaines de minutes et entraînant une mort cellulaire retardée, par atteinte des processus enzymatiques. Il s'agit d'un processus difficile à contrôler qui est donc peu utilisé en pratique. Néanmoins, de récentes études visent à évaluer le bénéfice du laser CO₂ défocalisé à faible puissance utilisé pour chauffer un tissu, dans le but d'augmenter la perfusion tissulaire (température-dépendante), et donc la vitesse de régénération suite à une blessure ou à une plaie chirurgicale. (15)

Coagulation :

Il se produit une nécrose irréversible sans destruction tissulaire immédiate. La température atteinte (de 50°C à 100°C) pendant une durée de l'ordre de la seconde, produit une dessiccation, un blanchissement, et une rétraction des tissus par dénaturation des protéines et du collagène. Les tissus vont secondairement s'éliminer (détersion) avec apparition ensuite de processus de cicatrisation. La coagulation est utilisée soit pour détruire des petits phénomènes tumoraux qui seront éliminés lors de la détersion, soit pour réaliser une hémostase.

Vaporisation/Carbonisation :

Elle correspond à une perte de substance. Les différents constituants tissulaires se consomment à une température supérieure à 100°C dans un temps relativement bref, de l'ordre du dixième de seconde. On observe sur les berges de la zone volatilisée une zone de nécrose de coagulation car la transition thermique entre zone volatilisée et zone saine se fait graduellement. C'est cette zone de nécrose de coagulation qui est responsable de l'*effet hémostatique*. Si la zone volatilisée a une grande surface (quelques millimètres de diamètre), il est possible de détruire des phénomènes tumoraux plus volumineux que ceux atteints lors

d'une simple coagulation. Si la zone volatilisée est étroite (100 à 500 μm , on obtient alors un *effet d'incision*.

L'effet photothermique est typique des lasers CO_2 , Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet ou grenat d'yttrium-aluminium dopé au néodyme), ou diode. Ces trois types de lasers peuvent produire une vaporisation des tissus, mais ils diffèrent dans leurs applications en fonction de la teneur d'eau des tissus. L'eau absorbe ces lumières lasers de manière différente selon leur longueur d'onde. D'autres composants tissulaires, comme l'hémoglobine, la mélanine, et d'autres protéines, jouent aussi un rôle dans les absorptions respectives de ces lasers selon leur longueur d'onde. La pénétration du laser CO_2 est très superficielle (de l'ordre de 0,1 mm), alors que celle des lasers diode et Nd:YAG peut atteindre 5 mm.

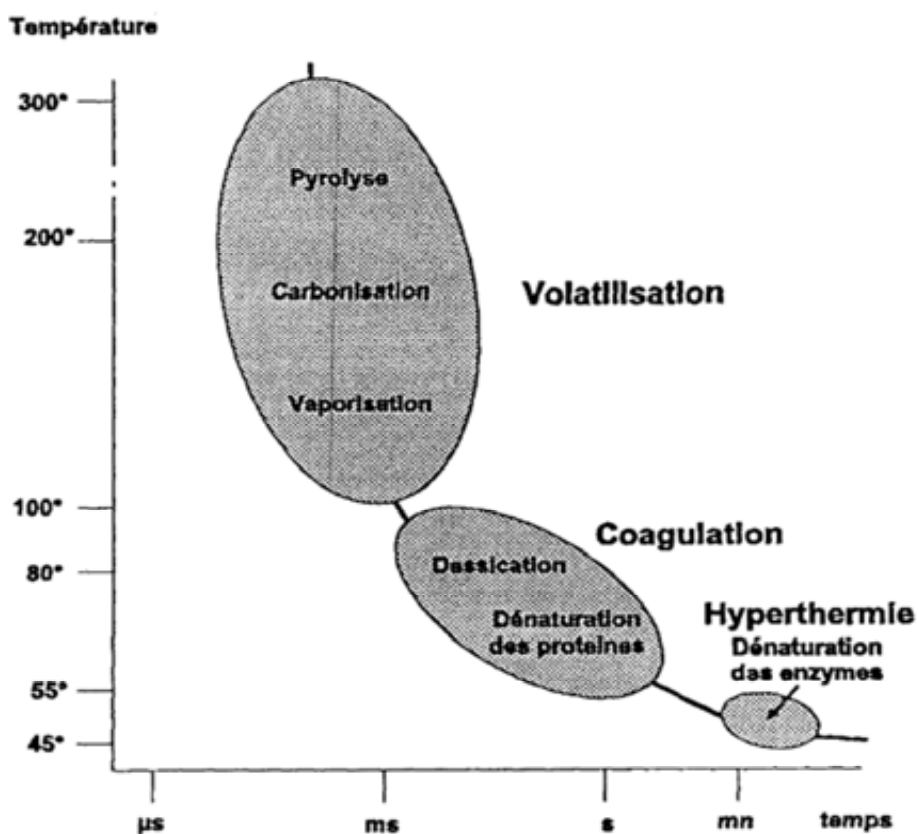


Figure 9 : Résultats de l'action thermique d'un laser sur un tissu vivant.

D'après (23)

Les effets thermiques des lasers sont utilisés dans presque toutes les spécialités médicales, essentiellement en coagulation et en vaporisation. On peut classer les applications en fonction de la manière de diriger le faisceau sur le site à traiter en utilisant différentes voies d'application :

Une pièce à main : dermatologie, chirurgie, odontologie, (application directe),

Un bio-microscope : gastro-entérologie, pneumologie, urologie, gynécologie, arthroscopie ophtalmologie.

Un guidage radiographique : angioplastie.

b. Effets Photochimiques

Les applications issues de cet effet ne font pas nécessairement appel à un laser comme source lumineuse.

La photochimiothérapie consiste à injecter par voie générale une molécule photosensibilisante ayant une spécificité pour un tissu pathologique puis à éclairer le tissu dans un but diagnostique (localisation) ou thérapeutique (destruction sélective du tissu pathologique). Après avoir marqué la zone à traiter par l'agent photosensibilisant, on éclaire le tissu par une lumière dont la longueur d'onde correspond à un pic d'absorption de l'agent.

L'absorption de la lumière fait passer le photosensibilisant d'un état basal à un état excité. Le retour à l'état basal se fait soit par échange thermique, soit par transfert énergétique intramoléculaire à l'origine de réactions chimiques, productrices de radicaux libres, et donc, cytotoxiques (destruction de tumeurs). Dans le cas d'une application diagnostique, cela se traduit par l'émission d'un rayonnement fluorescent.

Cet effet est caractéristique des lasers à colorant (« dye lasers » en anglais) ou des lasers diode nouvelle génération.

c. Effets Photomécaniques

Effets multiphotoniques :

Les flux lumineux intenses concentrés sur de petites surfaces au moyen de lasers à impulsions picoseconde et de forte irradiance (1000 W/cm^2) permettent la création d'un plasma. A la frontière entre milieu ionisé et milieu externe apparaît un gradient de pression qui induit la propagation d'une onde de choc. C'est l'expansion de cette onde de choc qui provoque les principaux effets destructifs. Ce plasma et cette onde de choc sont produits par le laser Nd:YAG à émission picoseconde.

Effets thermo-ioniques :

Lorsque l'émission laser est très brève (μs à ns), la chaleur produite par l'absorption de la lumière n'a pas le temps de diffuser hors de la source de chaleur "primaire". Si l'irradiance est suffisamment importante (100 à 1000 W/cm^2), il va se produire un plasma dont l'onde de choc induira les effets mécaniques. Ce type d'effet est actuellement obtenu avec un laser à colorant émettant dans le bleu des pulses d'une microseconde, le laser à alexandrite ($0,755 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{s}$), ou le laser Nd:YAG nanoseconde.

Domaine d'application des effets mécaniques :

Les effets mécaniques sont utilisés en ophtalmologie pour couper de fines membranules intraoculaires et en endoscopie pour fragmenter des calculs rénaux ou biliaires par voie endoscopique (laser holmium :YAG). En ophtalmologie, on utilise essentiellement des lasers nanoseconde. La transmission du faisceau laser par miroirs n'est pas une gêne dans cette discipline. En endoscopie, la transmission par fibre optique est obligatoire ce qui explique l'utilisation des lasers à colorant microseconde et les travaux de recherche pour les remplacer par des lasers solides émettant dans la gamme $0,1$ à $100 \mu\text{m}$.

Les lasers à Alexandrite Q-switched, avec des impulsions de 50 à 100 nanosecondes, ne recouvrant pas le spectre d'absorption de l'hémoglobine, sont ainsi particulièrement recommandés pour le traitement de lésions superficielles pigmentées.(60,99)

d. Effet Photo-ablatif

Cet effet se traduit par une ablation pure de matériel sans lésion thermique sur les berges.

Il est le plus récent effet des lasers décrit pour l'ablation.

Il génère une ionisation instantanée des atomes, et donc une rupture des liaisons des molécules organiques constitutives des tissus, sous l'effet du champ électrique associé à la lumière ou par volatilisation du tissu, théoriquement sans diffusion thermique sur les berges, ni effet mécanique. Cet effet est obtenu avec des lasers dont la lumière est très fortement absorbée par les tissus visés directement et dont la longueur d'onde est très énergétique comme les lasers émettant dans l'ultraviolet (lasers excimères émettant à 0,193 μm (ArF), 0,248 μm (KrF) ou 0,308 μm (XeCl)). Cet effet peut également être obtenu avec des lasers émettant dans l'infrarouge au niveau d'un pic d'absorption de l'eau comme le laser Erbium-YAG (2,9 μm) ou le laser CO₂ Ultra pulse, et où la durée très brève du pulse évite les phénomènes de diffusion thermique.

On utilise l'effet photoablatif lorsque l'on souhaite éviter tout phénomène thermique associé à l'ablation, ou encore lorsque l'on souhaite procéder à une exérèse couche par couche. Le terme photoablation est souvent employé lorsque l'on utilise le laser CO₂ en mode défocalisé et superpulsé pour vaporiser une surface. Il s'agit néanmoins de l'effet thermique du laser qui est alors mis en jeu, mais la cible étant plus étendue et moins profonde qu'en mode focalisé.

C. Conséquences pratiques pour le laser CO₂

Le laser au dioxyde de carbone chirurgical est un laser dont le milieu amplificateur est un mélange gazeux, émettant un faisceau lumineux d'une longueur d'onde de 10,6 μm . (des modèles émettant à 7,5 ou 9,6 μm sont également disponibles, mais sont beaucoup moins utilisés). Cette longueur d'onde appartient à l'infrarouge lointain (cf. annexe 1). Le faisceau est donc invisible. Pour des raisons pratiques de guidage, il est parfois couplé à un laser

visible de faible puissance, qui lui est coaxial, dont le seul rôle est de visualiser le trajet du faisceau interventionnel.

La particularité principale de ce laser est sa longueur d'onde qui est très absorbée par l'eau, constituant principal de tous les tissus biologiques animaux. L'énergie délivrée par le laser CO₂ n'est donc pas particulièrement absorbée par l'hémoglobine, la mélanine (chromophores naturellement présents dans les organismes) ou par un chromophore synthétique spécifique à implanter avant l'intervention, comme c'est le cas d'autres lasers. Il est moins sélectif, et permet donc de s'affranchir de nombreuses contraintes. Cet avantage est également un inconvénient nécessitant de grandes précautions d'utilisation, car le faisceau affectera aussi bien les tissus que l'on souhaite traiter que des tissus visés « par erreur ».

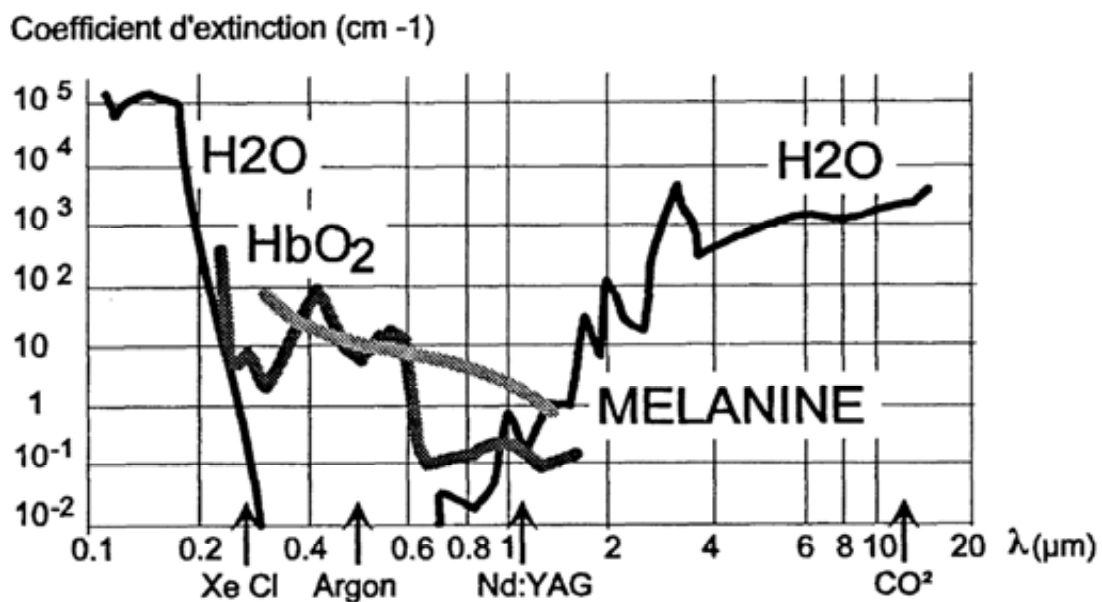


Figure 10 : Spectre d'absorption des 3 principaux chromophores des tissus : eau, hémoglobine et mélanine. D'après (21)

Cette action potentielle sur **quasiment tous les types de tissus mous** a conduit au développement d'innombrables applications médicales et chirurgicales du laser au CO₂ depuis sa création en 1964 par Patel.

C'est l'effet thermique des lasers qui est mis en œuvre, générant une augmentation de la température de l'eau au point d'impact (La chaleur massique de l'eau est de 4,2 J·g⁻¹·C^{o-1}).

Lorsque la puissance délivrée est suffisante, le laser produit une vaporisation de l'eau, et donc du tissu visé (L'énergie de vaporisation de l'eau est d'environ 2250 J.g^{-1}).

Une autre raison de son expansion est son utilisation selon **deux modes distincts** :

Le mode focalisé, où le diamètre du faisceau est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres avec une forte puissance, et où la vaporisation instantanée de l'eau des tissus produit un effet **d'incision** (on parle de « bistouri optique »).

Le mode défocalisé, où le diamètre du spot est de quelques millimètres, et donc la puissance moindre, qui génère **la vaporisation** d'une zone plus étendue mais moins profonde. On parle de photoablation.

On peut passer au cours d'une chirurgie à l'un ou l'autre de ces modes simplement en faisant varier la distance entre la pièce à main et la cible.

Ces deux techniques chirurgicales peuvent être employées en utilisant le même équipement, sans avoir besoin de changer de lentilles ou de pièce à main, voire même de réglages, puisqu'au final, l'irradiance délivrée reste la même. (10,18,122)

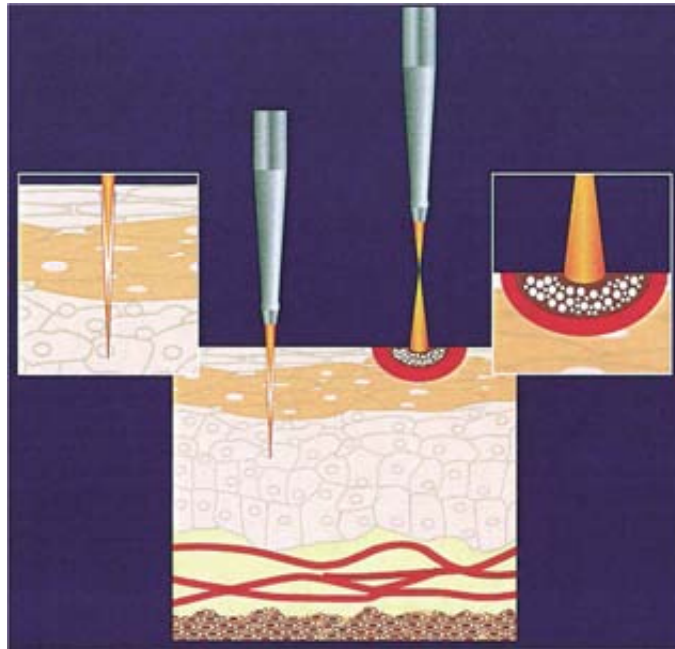


Figure 11 : Illustration des effets d'un laser CO₂ selon le degré de focalisation du rayon au point d'impact.

Le laser CO₂ délivré via une pièce à main focalisant le faisceau, qui peut être éloignée du tissu afin de diminuer la fluence. Un laser focalisé (gauche) produit une incision nette, tandis qu'un laser défocalisé (droite) génère une zone plus étendue mais moins profonde de coagulation et de dommages thermiques. D'après (117)

1. Caractéristiques spécifiques

a. Un milieu Amplificateur Gazeux

Le milieu amplificateur est un gaz — refroidi par un circuit d'eau dans le cas des grandes puissances — dans lequel on réalise une décharge électrique, qui « pompe » le milieu vers un état excité. Le gaz utilisé dans le tube à décharge se compose de :

- Dioxyde de carbone (CO_2), environ 10 à 20% ;
- Diazote (N_2), environ 10 à 20%,
- Dihydrogène (H_2) et/ou xénon (Xe), quelques pour cents, généralement uniquement dans un tube fermé ;
- Hélium (He) en quantité nécessaire pour compléter.

Les proportions varient selon le type précis de laser qu'on souhaite obtenir.

b. Des Puissances et des Modes de Sortie Variables

En plus des modes focalisés ou défocalisés, il existe d'autres variantes dans la délivrance des lasers, concernant non-pas leur distribution spatiale, mais leur distribution temporelle.

Les lasers peuvent fonctionner en **mode continu** (leur puissance est constante) ou en **mode impulsionnel** (ils émettent alors pendant une durée brève, s'arrêtent. puis émettent de nouveau). Le mode impulsionnel peut être **relaxé** (émission de quelques millisecondes ou microsecondes), ou **déclenché** (Q-switching, quelques nanosecondes).

En mode continu, la puissance de sortie est relativement constante dans le temps.

En mode pulsé, la puissance émise varie dans le temps par alternance de cycle marche-arrêt.

Le mode pulsé permet d'émettre des flashes de plus haute intensité lumineuse pendant des durées très brèves.

Il existe des lasers Super-pulsés, Ultra-pulsés...appelés ainsi en fonction de la durée des impulsions.

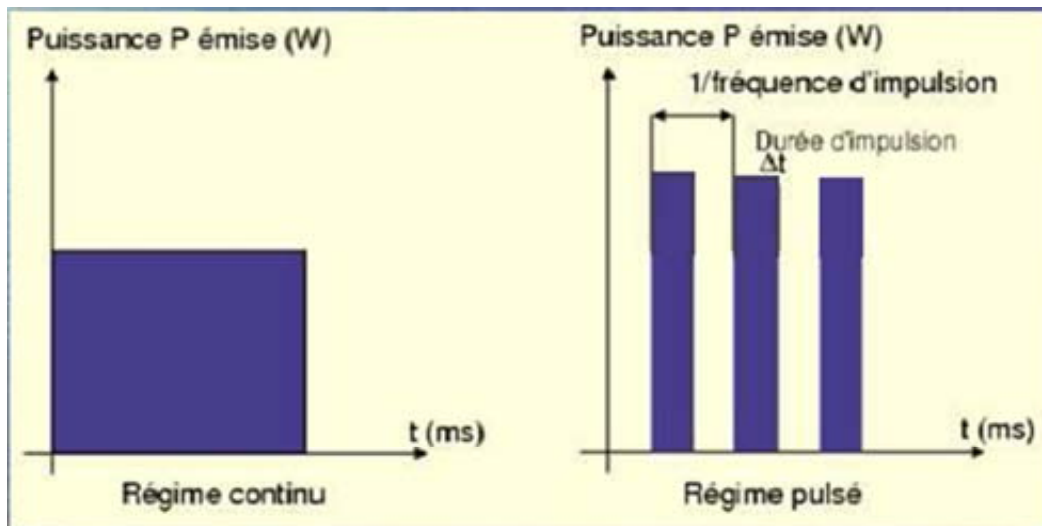


Figure 12 : Différences entre les régimes d'émission continu/pulsé

Le Q-switching, un système de production pulsé :

Le Q-switching (qu'on traduirait par « déclencheur Q ») est un dispositif réalisé en incorporant un atténuateur à l'intérieur de la cavité résonante. Lorsqu'il est activé, la lumière quittant le milieu amplificateur n'est pas réfléchi par le miroir et le faisceau laser ne peut être émis. L'atténuation au sein de la cavité correspond à une diminution du facteur Q, ou facteur qualité de la cavité résonante. Il s'agit en quelque sorte de « stocker » une partie de l'énergie lumineuse, et de la relâcher au moment voulu.

La durée sur laquelle se produit la décharge est inversement proportionnelle à la quantité d'énergie emmagasinée. Il en résulte donc une émission d'une impulsion lumineuse de très forte énergie, d'une durée très courte. (59)

L'application principale de ces modes pulsés réside dans les procédures de photoablation. Le fait d'employer des impulsions dont la durée est inférieure au temps de relaxation thermique du tissu visé (de l'ordre de la milliseconde pour la peau humaine) permet d'éviter les dommages thermiques aux tissus immédiatement adjacents. (73)

c. Une Transmission Particulière du Faisceau

Durant de nombreuses années, la fibre optique n'a pas été accessible en tant que mode de transmission du laser CO₂ : les matériaux disponibles étaient inadaptés pour une longueur d'onde de 10.6µm, il en résultait une perte importante de puissance du faisceau par absorption du matériau et donc une détérioration rapide de celui-ci. Ce n'est qu'au milieu des années 1990 que des guides d'ondes creux ont été développés et ont pu prendre le relais des bras articulés à miroirs, encombrants et fragiles. Ils équipent de nos jours de nombreux modèles de laser CO₂ médicaux ou chirurgicaux, ce qui a contribué à l'essor de l'emploi de ce laser, y compris en médecine vétérinaire.

De nos jours on dispose de pièces à main ayant la forme d'un stylo, relié à la source laser par une tige flexible. La distance entre cette pièce à main et la cible tissulaire est de quelques millimètres, contrairement aux précédents systèmes éloignés de 3-4 centimètres, nécessitant de travailler « à main levée » et de recourir à un second laser, de visualisation. On dispose également de différents embouts interchangeables et autoclavables, qui permettent d'obtenir la focalisation et le diamètre de spot voulu pour chaque situation.



Figure 13 : Pièce à main de Laser CO₂

Un guide d'onde semi-flexible mène le faisceau laser jusqu'à la pièce à main où une ouverture variable permet de faire varier l'irradiance. A irradiance égale, la fluence sera déterminée par la distance avec la cible.

D'après (117)

Une fois décrits les mécanismes d'action et les effets du laser CO₂ sur les tissus, nous allons maintenant aborder les avantages et les inconvénients qu'apporte cet outil de section et de vaporisation par rapport aux méthodes « classiques » d'incision et d'ablation : scalpels et bistouris électriques.

2. De nombreux Avantages en tant que « Bistouri optique »

a. Excellente précision de coupe en mode focalisé

La taille du spot laser est modulable et en général réglée sur 0.2-0.4 mm en mode focalisé, avec une irradiance de 10W pour l'incision d'une épaisseur moyenne. La présence du laser de guidage de faible puissance couplé aux systèmes à bras articulés permet de visualiser la zone de tir.

La largeur de coupe est donc précisément contrôlée. La profondeur de coupe dépend de l'irradiance délivrée et du tissu visé : l'eau (et donc le tissu) est vaporisée sur une profondeur plus ou moins importante selon la teneur en eau du tissu, et selon la puissance et la durée appliquées. (116)

b. Coagulation instantanée des capillaires sanguins

Le sang étant composé principalement d'eau, les vaisseaux sanguins situés sur le trajet du laser absorbent une grande quantité de l'énergie délivrée, ce qui aboutit à une coagulation instantanée et à la cautérisation des vaisseaux, si toutefois leur diamètre est inférieur à 0.5 mm (capillaires cutanés ou muqueux par exemples). Cela permet donc de gagner du temps sur la réalisation de l'hémostase, surtout pour les incisions superficielles. Si cet effet n'affranchit pas le chirurgien de toutes les précautions pour éviter les hémorragies, il permet néanmoins d'avoir un champ opératoire dégagé, clair, et moins propice à la multiplication microbienne durant la période post-opératoire. Il présente également un avantage pour le traitement des individus ayant des troubles de la coagulation. (123)

c. Diminution de l'œdème post-opératoire

Selon le même principe que précédemment, le laser CO₂ scelle les vaisseaux lymphatiques du site opératoire, ce qui diminue l'intensité des œdèmes postopératoires, et donc l'inconfort des patients. (40)

d. Diminution de la sensation douloureuse

Bien que la raison en demeure encore difficilement expliquée, les incisions réalisées à l'aide du laser CO₂ semble générer moins de douleur que celles faites au scalpel ou au bistouri électrique, dans les jours suivants les interventions. Plusieurs hypothèses ont été avancées : l'obturation des vaisseaux lymphatiques ralentirait la mobilisation des facteurs de l'inflammation, les fibres nerveuses sectionnées par le laser seraient « scellées » à leur extrémité par un bouchon de myéline coagulé... (103,118)

e. Prévention des contaminations microbiennes

Si elle n'affranchit pas le chirurgien des règles d'asepsie habituelles, la chirurgie au Laser CO₂, puisque sans contact, limite les risques de contamination entre l'instrument et le tissu opéré.

f. Réduction des risques de dissémination tumorale

Bien que seulement une cellule tumorale sur un million puisse posséder des potentialités métastatiques, plusieurs milliers de cellules essaient chaque jour à partir d'une tumeur. Cette dissémination est favorisée par la palpation et la manipulation chirurgicale de la tumeur d'origine.

La chirurgie d'exérèse au laser CO₂ nécessite moins de manipulations (section sans contact direct), cela permet de diminuer les risques de dissémination de cellules tumorales durant l'opération. (67)

g. Diminution des fasciculations musculaires

L'absence de décharge électrique au point d'impact comme avec le bistouri électrique limite considérablement la contraction des fibres musculaires sectionnées. Ceci apporte un confort significatif, notamment lors de l'incision de muscles fins (muscles peauciers, orbiculaires...).

h. Utilisation possibles sur des Patients équipés de pace-makers

Les capacités de coagulation sont semblables à celles du bistouri électrique, mais le laser CO₂ n'entraînant pas de transfert électrique au sein du patient, il est donc utilisable sur des patients équipés d'implants électroniques. Cet avantage ne concerne néanmoins à l'heure actuelle que la médecine humaine.

3. Inconvénients par rapport aux outils de section traditionnels

a. Une cinétique de cicatrisation modifiée

Malgré une hémostase instantanée des vaisseaux de petit calibre, les incisions cutanées réalisées à l'aide du laser CO₂ ont un temps de cicatrisation légèrement augmenté dans les premières étapes de la reconstruction tissulaire (jusqu'à environ 2-3 semaines selon les études), dans des proportions semblables aux incisions réalisées par bistouri électrique ou encore après les brûlures. Les phases d'inflammation, de production de collagène et de ré-épithélialisations sont retardées. On explique ce délai par l'obligation d'un passage par une phase de détersion des tissus carbonisés ou coagulés, ainsi que par le fait qu'en scellant sur son passage les capillaires sanguins et lymphatiques, le laser retarde l'arrivée des facteurs initiaux de l'inflammation. On peut limiter ces phénomènes en enlevant systématiquement les zones brûlées, en refroidissant au fur et à mesure le site (à l'aide de solutions physiologiques), et en recourant à des modes d'émissions pulsés qui limitent l'échauffement des tissus adjacents. (39,46,100)

b. Des mesures de sécurité nécessaires

(47,82,94)

- Sécurité du patient

En chirurgie générale et a fortiori lors de chirurgie oculaire ou péri-oculaire, il faut protéger les structures qui ne sont pas censées recevoir le faisceau laser. La faible spécificité d'absorption du laser CO₂ fait que toute partie du corps éclairée peut être lésée.

Ainsi, en ophtalmologie humaine, pour des chirurgies palpébrales, on place sur l'œil des coques oculaires, sortes de lentilles de contact opaques et non-réfléchissantes. Les autres structures proches de la zone opératoire peuvent être protégées par des compresses imbibées de sérum physiologique.

- Sécurité du personnel

Il est recommandé que le personnel présent lors des opérations porte une tenue adaptée (manches longues et tissus ignifugé) et surtout des lunettes de protection absorbant spécifiquement la longueur d'onde émise par le laser utilisé.

Tout l'équipement chirurgical et anesthésique doit être « laser-proof », c'est-à-dire ignifugé et mat, de manière à éviter tout risque d'incendie ou de brûlure par exposition directe ou indirecte.

Au final, effectuer des opérations au laser nécessite un bloc opératoire entièrement adapté à cet effet, et dûment signalé.

- Prévention des contaminations

Il a été démontré au milieu des années 80 que le mélange fumée/vapeur d'eau que produit la vaporisation des tissus au laser CO₂ peut contenir non-seulement des cellules du patient, mais aussi des particules infectieuses viables, telles que bactéries ou virus,

représentant un danger évident pour l'équipe chirurgicale et le patient. Ces particules sont mises en suspension dans le nuage par l'éclatement des microbulles d'eau vaporisées.

De même, lors de la chirurgie d'une tumeur cutanée par exemple, on peut également trouver des cellules tumorales viables dans le nuage. On comprend les risques en cas d'inhalation par le patient. C'est pourquoi les lasers CO₂ chirurgicaux doivent être utilisés avec un extracteur filtrant, maintenu en permanence par un aide à la proximité immédiate du tissu visé. (25,90)

c. Un Coût Important

- Coût d'Achat et d'Entretien

Un laser CO₂ chirurgical neuf coûte entre 15000 et 40000 euros, selon la puissance et les accessoires dont il dispose ainsi que le mode de transmission du faisceau (les modèles à miroirs sont moins récents, donc moins cher, mais ils sont plus fragiles et d'entretien plus délicats). On peut néanmoins en acquérir d'occasion pour quelques milliers d'euros.

- Coût de Formation

Ces coûts sont à prendre en considération si l'on envisage d'acquérir ce type de laser, mais la polyvalence de l'appareil lui permettant d'être utilisé dans pratiquement toutes les chirurgies autres qu'oculaires, ces investissements peuvent être justifiés au sein d'une structure vétérinaire aux multiples spécialités. (68,98)

d. Une difficulté d'analyse des pièces d'exérèses

Une différence essentielle entre les incisions réalisées au laser CO₂ et celles faites au scalpel est la création d'une couche de tissus coagulés le long des parois de l'incision faite au laser: cette zone correspond à une couche de tissu où la température, s'il elle n'est pas suffisante pour vaporiser le tissu, provoque néanmoins un gradient de dommages thermiques irréversibles. Les paramètres (mode super-pulsé par exemple) sont déterminés de manière à limiter au maximum l'ampleur de ce phénomène, qui peut gêner la cicatrisation ainsi que la résistance à la tension du tissu cicatriciel.

De plus, la présence le long de l'incision d'une zone de tissus carbonisés peut entraver les éventuelles analyses histologiques nécessaires. Cette zone s'étendant sur environ 0.3mm le long des marges d'exérèse, il faut prendre soin de préserver une zone de 0.5mm supplémentaire au-delà des limites supposées de la tumeur. Dans le cas de masses de petite taille, ou bien lorsque ces marges ne sont pas réalisables, il faut effectuer une biopsie avant l'exérèse au laser. (112,124)

DEUXIEME PARTIE - LES APPLICATIONS DU LASER CO₂ EN OPHTALMOLOGIE HUMAINE.

Le choix est ici fait de répartir les différentes utilisations du laser au CO₂ en fonction du mode selon lequel il est utilisé (Focalisé: diamètre du faisceau inférieur à 1 mm ; Défocalisé : de l'ordre de quelques mm). Ce mode est choisi par l'opérateur, et peut être modifié en cours d'intervention selon les besoins, en variant la puissance délivrée, la distance de la pièce à main, ainsi que l'embout employé. Il arrive ainsi qu'au cours d'une même intervention, par exemple une blépharoplastie inférieure, on emploie le laser en mode focalisé pour les incisions cutanées et musculaires, ainsi qu'en mode défocalisé pour coaguler les petits vaisseaux sous-cutanés. On alterne donc plusieurs fois au cours de l'opération. Les paramètres étant simples et rapides à changer après une bonne prise en main de l'appareil, cet outil est très apprécié par de nombreux chirurgiens en général, de même que par les ophtalmologistes.

Néanmoins, pour les raisons évoquées précédemment sur la très forte absorption du faisceau laser par les molécules d'eau, on ne peut pas employer le laser au dioxyde de carbone dans les chirurgies intraoculaires. Le faisceau serait absorbé intégralement par le stroma cornéen, l'humeur aqueuse, ou vitrée, en les vaporisant bien avant d'atteindre le fond de l'œil. Des expérimentations de section de brides vitréennes ont toutefois été menées dans les années 1980, mais d'autres instruments se sont révélés plus adaptés depuis. (88)
Les différents exemples abordés ici ne concerneront donc que la surface de l'œil, les annexes oculaires ou la zone périoculaire.

Depuis plusieurs années, le Laser au CO₂ est largement utilisé pour de nombreuses opérations de chirurgie strictement esthétique : rajeunissement des paupières inférieures et

supérieures, resurfaçage cutané de la zone péri-oculaire... Au vu du marché que représente la chirurgie esthétique, de très nombreuses publications font état de ces applications ; mais la chirurgie esthétique *stricto sensu* ne concernant, en l'absence de toute pathologie sous-jacente ou associée (par exemple ectropion congénital provoquant une kératite chronique), que très anecdotiquement l'ophtalmologie vétérinaire, ces utilisations ne seront qu'évoquées, dans le cadre de l'ophtalmologie humaine.

On peut se demander si les opérations à visée esthétique, ou bien les interventions relatives à des tumeurs des paupières ou de la zone péri-oculaire directe sont du ressort exclusif des spécialistes en ophtalmologie, ou bien de celui des dermatologues, ou encore des chirurgiens-plastiques. Par souci de simplicité, nous envisagerons les différentes procédures réalisables au laser CO₂ concernant l'œil, ses annexes et ses abords, sans nous préoccuper de ces considérations.

A.Utilisation du laser CO₂ en mode focalisé : Outil de section

1. Les Blépharoplasties

Les blépharoplasties sont l'ensemble des opérations visant à corriger des défauts palpébraux. Elles constituent une part majeure des applications du laser CO₂ focalisé dans la chirurgie de l'œil et de ses annexes. (83)

Outil incisionnel	Outil de Resurfaçage
Blépharoplastie Supérieure	Photo-vieillessement cutané
Blépharoplastie Inférieur	Rides
Traitement du Ptosis	Amélioration de cicatrices (traumatique, chirurgicale, acnéiforme)
Traitement de l'Entropion	
Traitement de l'Ectropion	
Canthopexie latérale	

Figure 14 : Les applications du laser CO₂ en chirurgie oculo-plastique, d'après (GOLDBAUM A.M., 1997)58

a. Les blépharoplasties à visées purement esthétiques

- Généralités

Ces interventions se proposent d'améliorer le regard d'un point de vue esthétique en supprimant les excès de peau (dermatochalasis), et/ou de graisse des paupières. On peut agir sur les deux paupières supérieures ou inférieures, ou sur les quatre.

Le laser CO₂ est utilisé dans ce cas en mode focalisé, comme un bistouri. Il permet des incisions cutanées, graisseuses et musculaires pratiquement exsangues dans ces tissus pourtant très irrigués. Il est en plus utilisé de manière défocalisée en éloignant la pièce à main pour réaliser l'hémostase de capillaires superficiels. (91)

Une étude menée parmi les chirurgiens esthétiques et plastiques a montré que 70 à 90% d'entre eux employaient un laser comme unique instrument pour réaliser les incisions et l'hémostase lors de leurs blépharoplasties, et que le laser CO₂ était le plus répandu à cet usage. L'hémostase qu'il procure au fur et à mesure des incisions est appréciée lorsque la peau et le muscle orbiculaire de l'œil sont disséqués, et lorsque le tissu adipeux rétro-septal est enlevé. (13)

Dans son article de 1998, Roberts (101) explique qu'il favorise l'emploi du laser CO₂ pour les étapes incisionnelles de la blépharoplastie, car il permet une exécution plus rapide du geste, est moins susceptible d'endommager le muscle inférieur oblique, cause moins de stimulation douloureuse, et encore une fois provoque moins de saignements et donc d'ecchymoses post-opératoire, effets secondaire fréquent avec les techniques classiques.

Les incisions cutanées au laser CO₂ doivent être évitées chez les patients asiatiques et noirs en raison du risque de dépigmentation et d'hypertrophie cicatricielle. (93)

Il existe deux voies d'abord pour les blépharoplasties à visée esthétique, entre lesquelles opte le chirurgien selon le but recherché et les particularités du patient.

- Les blépharoplasties par voie transcutanée

Pour les paupières supérieures, les incisions sont situées à 8 mm du bord ciliaire ; l'incision cutanée s'étend plus ou moins en dehors de la fente palpébrale, au niveau de l'angle externe de l'œil, dans une ride de la patte d'oie.

Pour les paupières inférieures : les incisions sont placées 1 ou 2 mm sous les cils, et se prolongent un peu en dehors (37)

- Les blépharoplasties par voie transconjonctivale

En cas de poches graisseuses sous les yeux, isolées, chez un sujet jeune, sans excédent cutané, on peut réaliser une blépharoplastie trans-conjonctivale. Cette incision effectuée à travers la conjonctive de la paupière inférieure après éversion de celle-ci, ne laisse donc pas de cicatrice visible. King (76) propose pour cette intervention l'utilisation d'un laser focalisé, en mode continu, à une puissance de 4 W.

Cette voie d'abord permet de s'affranchir des étapes de lambeaux cutanés et musculaires, et donc diminue grandement le taux de complications, en particulier les ectropions cicatriciels et les expositions sclérales (3,111)

Depuis le milieu des années 1990, il est fréquent de combiner les blépharoplasties esthétiques avec un resurfaçage cutané de la zone périoculaire (voire du reste du visage), en employant le laser CO₂ en mode superpulsé de manière très superficielle. Le but de l'opération est de vaporiser une très fine couche de peau (quelques dixième de µm par passage) et de stimuler la collagénogenèse dans le derme sous-jacent. (101)

La blépharoplastie par voie trans-conjonctivale, couplée à un relissage cutané de la zone périoculaire est de nos jours la méthode la plus commune pour les chirurgies de rajeunissement, de dermatochalasis et de poches de gras sous-oculaires. Les deux temps de cette opération à visée esthétique peuvent être réalisés avec le même laser CO₂. (61)

b. Traitement de malpositions palpébrales

- Rappels anatomiques

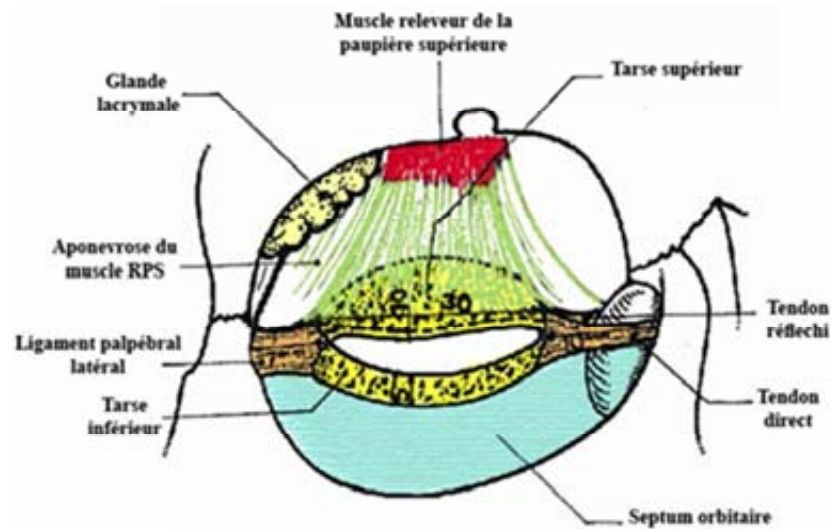


Figure 15 : Schéma des différents plans anatomique des paupières.

La paupière supérieure est divisée en deux régions, préseptale et pré tarsale, par le pli palpébral supérieur, qui correspond à l'insertion de l'aponévrose du muscle releveur de la paupière.

La zone préseptale, au-dessus du sillon palpébral, est relativement lâche. C'est le site des excès de graisse et de peau (dermatochalasis). Elle est la cible des blépharoplasties en chirurgie esthétique, ou bien le siège de greffe et/ou lambeaux en chirurgie réparatrice.

La zone pré tarsale, au-dessous du sillon palpébral, est tendue à la surface du globe qu'elle protège. C'est le siège des anomalies de position, de tumeurs ou d'affections ciliaires. Le tarse est une bandelette fibro-élastique située à la face postérieure des paupières, assurant une certaine rigidité à celles-ci.

La paupière inférieure est également divisée en deux, par le pli palpébral inférieur, correspondant à l'insertion des muscles rétracteurs.

La zone préseptale est le site des cernes, des poches graisseuses. Ces poches peuvent être réséquées par voie cutanée ou par voie conjonctivale.

La zone pré tarsale couvre le globe oculaire et guide le cheminement des larmes. C'est le site principal des entropions ou des ectropions.

Les paupières sont également séparées en 2 lamelles. La lamelle antérieure est constituée de la peau palpébrale et du muscle orbiculaire. La lamelle postérieure est constituée du tarse et de la conjonctive. La zone de clivage naturelle entre ces deux lamelles à la face antérieure du tarse constitue le socle de toute chirurgie plastique ou reconstructrice des paupières.

Les défauts de positionnement des paupières sont souvent dus à une inégalité de longueur entre les deux lamelles, qui, étant solidaires l'une de l'autre, provoquent un enroulement du bord libre vers l'intérieur (entropion) ou l'extérieur (ectropion).

Les paupières sont actionnées par le muscle releveur de la paupière supérieure, le muscle de Müller (muscle lisse à innervation sympathique, sous le releveur), le muscle orbiculaire de l'œil et le rétracteur de la paupière inférieure.

- Le Ptosis

Origines/Définitions

Le ptosis correspond à une chute du niveau de la paupière supérieure secondaire à une impotence du muscle releveur. Qu'il soit d'origine congénitale ou acquise, il peut être la conséquence d'une atteinte du muscle releveur lui-même (atteinte myogène), de son aponévrose (atteinte aponévrotique), de ses connexions nerveuses (atteinte neurogène), ou encore d'une atteinte d'origine polyfactorielle (ptosis mixte). (57)

Il peut être plus ou moins sévère : en effet si la paupière ptosée vient obstruer la pupille, le ptosis retentit sur la fonction visuelle. Il peut être congénital ou acquis. (108)

Cette définition permet d'exclure les « faux » ainsi que les « pseudos » ptosis, qui sont caractérisés par le fait que le muscle releveur sous-jacent est normal.

Les faux ptosis sont le plus souvent en relation avec une insuffisance de support de la paupière supérieure (anophtalmie, microophtalmie, phtisie du globe oculaire,...), ou encore à une hypotropie.

Les pseudo-ptosis ou ptosis mécaniques sont souvent secondaires à un excès de volume ou de poids de la paupière supérieure (dermatochalasis, neurofibrome, hémangiome,...), ou à des tractions par des brides conjonctivales.

Traitements

Lorsque le ptosis résulte d'une lésion irréversible, un traitement chirurgical peut être proposé. Il existe plusieurs techniques, au cours de chacune desquelles le laser CO₂ peut être employé pour les étapes d'incisions et de dissection. On peut citer :

Chirurgies par voie antérieure :	Chirurgies par voie postérieure :
Sutures ajustables (solution non-définitive). Résection du releveur de la paupière supérieure. Chirurgie de l'aponévrose.	Résection du releveur. Chirurgie du muscle de Müller. Résection conjonctivo-müllérienne.

Figure 16 : Différentes techniques chirurgicales de traitements du ptosis. D'après (84)

Le laser CO₂ dans le traitement du ptosis

Baker *et al* ont décrit en 1985 une technique chirurgicale utilisant le laser CO₂ au cours de chirurgies de l'aponévrose, combinée à blépharoplastie. (6) Sur 82 patients opérés, 84% ont obtenu une asymétrie de la fente palpébrale inférieure à 1mm. 8 sur les 13 restant ont été réopérés. On n'eut pas à déplorer de complications de type kératite d'exposition (complication fréquente des chirurgies du ptosis), et la technique s'est avérée susceptible de procurer une meilleure hémostase, un gain de temps opératoire, ainsi qu'un meilleur résultat esthétique en post-opératoire immédiat que la chirurgie à la lame froide.

- L'Entropion

Origines/Définitions

Un entropion est un enroulement vers l'intérieur du bord libre de la paupière. Il est à l'origine d'une irritation et d'une inflammation de la cornée et de la conjonctive ainsi que d'un écoulement séreux, pouvant se surinfecter. Avec le temps, le frottement de la paupière sur la cornée peut être à l'origine d'un ulcère cornéen.

Classification des entropions :

Chez l'Homme, l'entropion peut avoir quatre causes possibles : congénitale, spasmodique, sénile ou cicatriciel.

L'entropion congénital

De découverte précoce, il est le plus souvent dû à une dysgénésie des structures internes de la paupière. La plupart des auteurs suggèrent d'adopter une attitude attentiste, en l'absence de risque d'amblyopie, pendant les premières années de vie du patient. En effet, beaucoup de ces entropions se corrigent spontanément avec la croissance.

L'entropion spasmodique

Toute irritation de la surface oculaire entraîne une contraction réflexe de l'orbiculaire, qui peut prendre une forme spasmodique dans certaines circonstances, en particulier lorsque l'équilibre des forces statiques est perturbé chez le sujet âgé. Il n'existe pratiquement qu'à la paupière inférieure. En l'absence de traitement, les jeux de tensions internes conduisent à un cercle vicieux aboutissant à un entropion irréversible.

L'entropion sénile

L'entropion sénile n'existe qu'à la paupière inférieure. En paupière supérieure, le relâchement des forces verticales entraîne le ptôsis sénile par désinsertion de l'aponévrose du releveur.

Les mécanismes de l'entropion sénile sont variés et imbriqués :

- un relâchement horizontal et/ou vertical, lié à une laxité de la peau, de l'orbiculaire, du tarse et des ligaments latéraux.
- des anomalies liées à la position de la graisse orbitaire.
- une diminution des forces verticales par atrophie ou relâchement des rétracteurs et du septum qui entraîne la rotation interne du bord libre ;
- un glissement de l'orbiculaire préseptal vers le haut en position pré-tarsale.

Chez les personnes âgées, l'entropion peut avoir une composante mixte (sénile puis spasmodique). (72)

L'entropion cicatriciel

Il est secondaire à une rétraction de la lamelle postérieure (tarse et conjonctive).

La contraction cicatricielle de la lamelle postérieure entraîne une concavité postérieure de la paupière qui retourne les cils.

Dans ce cas, l'étirement latéral ne peut ramener la paupière en position normale.

Les étiologies possibles sont multiples : brûlures chimiques, thermiques, tumeurs conjonctivales opérées avec rétraction cicatricielle, inflammation chronique (trachome, blépharites chroniques), sur correction chirurgicale d'un ectropion...

Ce type d'entropion concerne aussi bien la paupière supérieure que la paupière inférieure.

Traitements

Dans la plupart des cas, une intervention chirurgicale simple suffit, bien que les problèmes de cicatrisation conjonctivale soient difficiles à traiter. La composante spastique de l'ectropion peut être traitée à l'aide de toxine botulique. Il existe de nombreux traitements chirurgicaux de l'entropion, qui varient selon la cause de celui-ci ainsi que l'âge du patient. Ceux-ci visent à raccourcir la lamelle antérieure de la paupière incriminée, afin de limiter son enroulement vers l'intérieur. Toutes les étapes incisionnelles et hémostatiques de ces techniques sont réalisables au laser CO₂. (11)

- L'Ectropion

Origines/définition

L'ectropion est une éversion du bord libre de la paupière. Les étiologies comprennent :

L'ectropion involutif sénile, la paralysie faciale, la cicatrisation cutanée (entropion cicatriciel), les tumeurs palpébrales volumineuses.

Tout comme l'entropion, des modifications de tonicité et de laxité liées à l'âge peuvent provoquer à elles-seules un ectropion. Les paralysies faciales responsables d'une lagophtalmie peuvent entraîner l'apparition d'un ectropion de même que n'importe quel

processus cicatriciel cutané au niveau du visage et les volumineuses tumeurs du bord palpébral.(121)

Conséquences oculaires

L'ectropion concerne le plus souvent la paupière inférieure. La principale conséquence est le larmolement, puisque le drainage normal des larmes à travers le méat lacrymal est déficient. La conjonctive du bord palpébral peut devenir inflammatoire et se kératiniser. Une kératite d'exposition peut résulter d'un ectropion sévère, pouvant aller jusqu'à des ulcérations cornéennes.

Traitement

Les ectropions cicatriciels bénéficieront d'une chirurgie oculo-plastique 6 mois après le traumatisme initial, la brûlure ou la chirurgie de la paupière. On retiendra trois principes thérapeutiques :

- Les tissus cicatriciels superficiels et profonds seront réséqués.
- La lamelle antérieure sera allongée par plastie en Z, lambeau ou greffe cutanée.

Une des limites du laser CO₂ dans ce type de chirurgie est qu'il diminue les chances de "prise" des greffons cutanés parfois nécessaires, lorsqu'il est utilisé pour les prélever ou bien pour en préparer le lit. (110)

- La laxité palpébrale sera traitée par remise en tension palpébrale horizontale.

Les ectropions paralytiques ne seront traités chirurgicalement qu'en cas d'irréversibilité de la paralysie. Dans les cas contraires, un traitement conservatoire à base d'hydratants cornéens sera instauré en attendant la récupération motrice.

En 1988, Korn et Glotzbach (79) décrivent pour la première fois l'utilisation du laser au dioxyde de carbone sur 5 patients dans la chirurgie d'ectropions d'étiologies variées, en réalisant une côte de melon dans la lamelle postérieure de la paupière inférieure, par voie transconjonctivale. Les résultats cosmétiques satisfaisants, les avantages classiquement décrits (hémostase et œdème post-opératoire diminué), ainsi que la faisabilité de cette intervention

sous anesthésie locale en ambulatoire, font de ce laser un outil de choix dans le traitement de l'ectropion.

2. Autres interventions réalisables au laser CO2 focalisé

a. Exérèses de masses palpébrales

- Tumeurs

Les paupières peuvent être le siège de plusieurs types de tumeurs. Le caractère souvent infiltrant de celle-ci conduit à n'employer que rarement le laser CO2 en mode strictement focalisé. Les traitements décrits sont souvent mixtes de ce point de vue, et seront détaillés plus loin.(80,92)

- Masses non-tumorales

Les paupières peuvent également être touchées par des chalazions, des orgelets, des kystes... Lorsqu'elles sont réfractaires aux traitements topiques, ces affections peuvent se traiter par simple excision au laser CO₂, avec un résultat cosmétique très satisfaisant. (81)

L'utilisation du laser au CO2 en mode focalisé dans les chirurgies d'exérèse est donc limitée au retrait de structures anormales bien délimitées et anatomiquement enclavées.

b. Chirurgie des voies lacrymales

La levée de l'occlusion ou de la sténose du point lacrymal inférieur est réalisée par une punctoplastie. Cette occlusion est suspectée si le patient se plaint d'épiphora et si, après dilatation du point lacrymal et lavage des voies lacrymales, un flot de liquide s'écoule librement dans le nez. Parfois, le point lacrymal n'est plus au contact du globe, en raison d'un ectropion qu'il faudra corriger. Le but de l'opération est de ré-ouvrir le point lacrymal en excisant un petit triangle à sa face postérieure en regard du globe.

Dans une étude de 2005, Chong (29) se propose de comparer la punctoplastie au laser CO₂ à la technique chirurgicale classique par trois incisions à la lame froide, dans le traitement de la sténose du point lacrymal. Sans évoquer d'avantages autres que les incisions exsangues dues au laser, il montre que cet outil offre une alternative efficace à la chirurgie classique, tant pour la résolution du problème de larmoiement que pour les considérations algiques.

c. Autres chirurgies

Parmi les nombreuses interventions réalisables en théorie au laser CO₂ focalisé, peu font l'objet de publications. Elles sont simplement évoquées comme étant faisables, mais rarement décrites en détail, les avantages que le laser procure en tant qu'outil incisionnel ne justifiant pas de le choisir comme instrument exclusif. C'est au chirurgien d'opter ou non pour cet instrument en fonction de ses expériences personnelles, de son savoir-faire et bien sûr de l'équipement dont il dispose. Parmi les interventions possibles, citons certaines chirurgies du strabisme, les énucléations et exentérations... (87)

B. Utilisation du laser CO₂ en mode défocalisé : Outil de vaporisation

1. Le laser CO₂ en mode défocalisé, ultrapulsé, scanné : le relissage cutané au laser.

Le relissage laser repose sur une contraction contrôlée du derme pour obtenir un collagène régénéré non-cicatriciel. Il nécessite donc plusieurs passages. Le premier passage élimine l'épiderme, les autres passages détruisent l'élastose sous-épidermique et contractent le derme sous-jacent. S'agissant d'interventions esthétiques et non-chirurgicales au sens strict (aucune incision), elles ne seront pas développées (1,16)

2. Chirurgie de tumeurs d'origine vasculaires

a. Les Lymphangiomes Oculaires

Il s'agit de tumeurs d'évolution lente, consistant en de larges vaisseaux lymphatiques. Elle peut atteindre la conjonctive, l'orbite, les paupières et les sinus para nasaux. Cette lésion peut être secondairement infiltrée de sang, ce qui la rend difficile à distinguer histologiquement d'un hémangiome. Même si leur comportement est histologiquement bénin, leur développement peut entraîner avec le temps une gêne importante. Le traitement du lymphangiome réside principalement dans la chirurgie, mais l'exérèse totale est rarement possible. Une tendance à la récurrence existe.

La classification des lymphangiomes ainsi que leur physiopathologie sont encore aujourd'hui sujettes à caution. On distingue :

-Le lymphangiome palpébral:

C'est une tumeur bénigne du jeune enfant (50% sont visibles dès la naissance, 90% auront été diagnostiquées avant la 3^e année de vie.)

La gestion d'un lymphangiome palpébral, à l'instar du lymphangiome de l'orbite encore plus fréquent, passe par une surveillance régulière, éventuellement par une résection des lésions bien circonscrites.

-Le lymphangiome conjonctival:

Les lymphangiomes n'impliquent que rarement la conjonctive de manière bien isolée. Ils concernent souvent également des structures adjacentes, comme la sclère ou la cornée. Comme tous les lymphangiomes, leur dissection fine et donc leur ablation sélectives sont délicates, et de nombreux chirurgiens sont réticents à l'idée de pratiquer leur exérèse. Spector et al décrivent l'utilisation du laser CO₂ associé au bistouri électrique dans la chirurgie des 2 lymphangiomes conjonctivaux. Le laser CO₂ est employé en mode défocalisé, pulsé à 0,1 seconde, puissance 12W, afin de vaporiser le lit de la tumeur déjà partiellement enlevée au bistouri. Les résultats ont été satisfaisants, concernant l'amélioration de la gêne visuelle et les complications post-opératoires, même si des récurrences ont été constatées. Plusieurs interventions peuvent s'avérer nécessaires.(114, 106)

-Le lymphangiome orbitaire:

Les tumeurs d'origine vasculaire représentent 10 à 15% des tumeurs de l'orbite.

La tumeur se développe à partir de vaisseaux lymphatiques situant derrière l'œil, aboutissant classiquement à une exophtalmie progressive lorsqu'elle atteint une taille importante.

L'exérèse chirurgicale complète est souvent difficile voire impossible, en raison de la faible spécificité d'aspect des tissus impliqués, et de la nature très vascularisées de la tumeur.

Si la vision n'est pas menacée dans la prime jeunesse du patient, une période d'observation suffira. Si la lésion cause des hémorragies, une pseudoptose palpébrale ou bien une compression du nerf optique (tumeur très volumineuse), on recourra à la chirurgie. Une ponction préalable à l'aiguille fine permet de limiter les écoulements pendant l'opération, qui reste délicate en région orbitaire.

La destruction en vaporisant couche par couche par laser CO₂ ainsi que l'hémostase instantanée qu'il offre en font un outil de choix dans cette intervention, seul ou bien couplé à d'autres instruments de dissection.

Il n'existe pas de consensus à l'heure actuelle sur un traitement standardisé de ces lésions, car leurs formes et leurs localisations précises au sein de zones si hétérogènes, sur le plan structural, que l'orbite de l'œil, rend indispensables une approche thérapeutique au cas par cas. Peu de publications envisagent l'emploi du laser au dioxyde de carbone dans les chirurgies d'exérèses, très délicates et parfois délabrantes, de ces tumeurs, mais en 1986, Kennerdell suggère son utilisation dans une étude portant sur 6 cas, pour lesquelles seules des séquelles de type anesthésie cornéenne et mydriase transitoires ont été constatées. (48,63,74)

b. Les Hémangiomes

Parmi eux, on distingue les hémangiomes capillaires et caverneux. Les hémangiomes capillaires sont des tumeurs superficielles apparaissant à la naissance ou dans les premières semaines de vie. Après une phase de croissance rapide, une phase de régression lente peut prendre quelques années et aboutir à une atrophie des téguments sus-jacents. Ainsi plus de ¾ des lésions ont disparu à l'âge de 7 ans. La chirurgie n'est réservée qu'en cas de tumeur réfractaire ou pour traiter les conséquences visuelles ou fonctionnelles. L'hémangiome

caverneux est moins fréquent et se présente chez l'adulte. Son évolution est lente et son traitement chirurgical.

Le laser au CO₂ est très pratique pour la chirurgie des hémangiomes, car il limite les hémorragies de ces tumeurs évidemment très vascularisées. Toutefois, l'incidence des cicatrices post-opératoires est plus importante avec ce laser, comparé à d'autres systèmes laser tels le laser argon par exemple. De ce fait, le laser au CO₂ est de nos jours cantonné à l'exérèse des hémangiomes intra-oraux. (42,56)

3. Chirurgies de tumeurs d'origine cutanées

a. Kératose séborrhéique

La kératose séborrhéique (également appelée à tort "verruve séborrhéique) est une tumeur cutanée bénigne qui touche essentiellement le sujet âgé de plus de 50 ans. Elle est très fréquente à partir cet âge. La localisation au niveau de la face et des paupières est assez fréquente. C'est la tumeur palpébrale la plus souvent rencontrée, aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Il s'agit au départ de lésions papuleuses à peine saillantes, de couleurs variées. Elles deviennent ensuite épaisses kératosiques, pigmentées parfois noirâtres, avec un aspect franchement verruqueux. Leur taille varie de quelques millimètres à plus de 2,5 cm.

La plupart des lésions de kératose séborrhéique peuvent être enlevée par curettage, en raison de leur très faible épaisseur. On peut néanmoins employer une méthode d'exérèse tangentielle au scalpel ou bien au bistouri électrique, mais ces méthodes génèrent souvent des cicatrices inesthétiques. La photo-destruction au CO₂ superpulsé représente la meilleure alternative concernant l'esthétique et la durabilité du résultat. (49,62,75,96,104)

b. Carcinome basocellulaire des paupières

C'est de loin chez l'Homme la tumeur maligne des paupières la plus fréquente. Les localisations préférentielles sont par ordre de fréquence : la paupière inférieure, le canthus interne, la paupière supérieure, puis le canthus externe.

Le traitement est chirurgical avec exérèse large souvent très mutilante notamment dans les localisations canthales. Le carcinome basocellulaire ne métastase pas mais possède un pouvoir évolutif localisé malin qui peut devenir avec le temps important.

Le laser au CO₂ peut être utilisé dans la chirurgie d'exérèse, en mode focalisé pour la dissection des tissus et/ou en mode défocalisé pour une vaporisation couche par couche lorsque les incisions sont délicates. Son utilisation n'a pas fait l'objet de nombreuses publications, et des études de suivis sont encore à réaliser, mais, combiné à un curettage manuel, il est considéré comme très utile dans le traitement de carcinomes basocellulaires superficiels étendus ou multiples. (9,49,85,115,122)

c. Carcinome épidermoïde des paupières

Cette tumeur peut faire suite à une kératose actinique, due à l'exposition prolongée au soleil. On considère que la kératose actinique est la dermatose précancéreuse la plus fréquente. Le risque d'évolution vers un carcinome épidermoïde est évalué environ 0.5% par an et par lésion. L'aspect est celui d'une lésion plane érythémato squameuse.

La localisation principale est la paupière inférieure, mais l'atteinte de la paupière supérieure est évocatrice du carcinome épidermoïde. A l'inverse du basocellulaire, le carcinome épidermoïde présente un réel pouvoir métastatique dont la propension est proportionnelle à l'épaisseur tumorale et au degré d'invasion du derme et inversement proportionnelle au degré de différenciation. (49)

Le traitement en est la chirurgie d'exérèse totale après biopsie cutanée à visée diagnostic. L'exérèse totale sera dirigée par l'examen extemporané des berges. La radiothérapie externe peut être une alternative en cas de contre-indication chirurgicale, d'extension orbitaire ou de métastase. La chimiothérapie, topique ou systémique, est un traitement adjuvant pour les lésions très évoluées. Le pronostic est corrélé à l'épaisseur tumorale : les tumeurs de moins de deux millimètres ne métastasent pratiquement jamais ; entre 2 et 6 mm le risque est d'environ 4.5% ; et au-delà de 6 mm le risque atteint 15% (surtout en cas d'infiltration musculaire ou périostée).

Le laser au dioxyde de carbone a été pressenti dans le traitement de cette lésion, mais il s'avère qu'on ne peut éliminer toutes les cellules anormales issues de cette tumeur à haut

potentiel métastatique par la méthode habituelle de vaporisation couche par couche, même avec plusieurs passages. (64)

4. Exérèse d'autres lésions

a. Xanthelasma palpebrum

Le xanthelasma correspond à un ensemble de petites taches de couleur jaunâtre, légèrement en relief, se situant souvent en partie médiale des paupières inférieures et/ou supérieures. Il s'agit d'une variété particulière de xanthomes, correspondant à des petites tumeurs bénignes constituées de macrophages associés à un dépôt lipidique.

Le xanthélasma peut faire suite à une hypercholestérolémie, (1/3 à 50% des patients atteints présentent des troubles du métabolisme lipidique) mais parfois il n'existe aucune cause précise. D'évolution bénigne et très lente, le xanthélasma nécessite parfois, pour des raisons esthétiques, une ablation chirurgicale. En raison de sa localisation et de sa forme plane, celle-ci est délicate, et les récurrences sont fréquentes. Le traitement classique du XP est l'exérèse chirurgicale. La cautérisation à l'acide trichloro-acétique, ou à l'azote liquide, constituent des alternatives. Ces méthodes comportent plusieurs inconvénients : des cicatrices inesthétiques allant jusqu'à l'ectropion, la nécessité de reprise avec greffe, ainsi que l'impossibilité de ré-effectuer l'opération pour la chirurgie, des résultats aléatoires et des difficultés pour contrôler la pénétration des chimiques et donc le risque de causer des lésions à la conjonctive et à la sclère avec les chimiques.

On peut réaliser cette ablation à l'aide d'un laser CO₂ superpulsé en mode défocalisé, ce qui permet de réduire les saignements per-opératoires, ainsi que le risque de survenue d'un ectropion cicatriciel (les couches profondes étant en principe épargnées grâce à la vaporisation couche par couche). La cicatrisation se fait par ré-épithélialisation progressive en 3 à 5 mois, avec peu ou pas de cicatrice visible ou de rétraction cutanée.

Les taux de récurrences sont moindres qu'avec la chirurgie classique. On rapporte quelques cas d'hypopigmentation transitoire de la zone traitée. Un ou plusieurs traitements au laser CO₂ restent néanmoins le traitement de choix de cette affection.

Dans leur étude de 1999, Raulin et Schoenermark proposent comme paramètres d'utilisation des tirs de 250-500 mJ et 600-900 µsec, à l'aide du laser CO₂ Ultrapulsé. (97,105,113)

b. Lésions d'origines virales

- Molluscum contagiosum :

Ce sont des lésions provoquées par un poxvirus qui se transmettent par contamination interhumaine ou auto inoculation (grattage). Elles sont fréquentes chez l'enfant notamment atopique, et peuvent être particulièrement nombreuses et volumineuses immunodéprimées. Ils se présentent sous la forme de petites élévations cutanées globuleuses et pédiculées. Ces papules se situent fréquemment à proximité des muqueuses, les paupières et la conjonctives sont donc souvent atteintes. Leur traitement est simple par ablation à la curette mais les récurrences fréquentes. La vaporisation au laser CO₂ permet de considérablement les limiter. Les lésions étant souvent de petite taille, les défauts résultants de la vaporisation ne nécessitent le plus souvent pas de sutures. (49)

- Verrues/papillomes squameux

Ces affections sont parfois associées à l'infection de la peau par un virus du papillome humain. La lésion résultante est papillomateuse, acanthotique et hyperkératosique. Elle peut avoir un comportement évolutif et inflammatoire ou bien être spontanément résolutive. La conjonctive est fréquemment impliquée, par une éventuelle remontée depuis les conduits naso-lacrymaux. Les techniques d'ablation à la lame froide ou par cryodestruction sont souvent suivies de récurrences. L'étude de Sachs en 1986 propose comme traitement alternatif la vaporisation au laser CO₂. Les 7 patients traités pour une papillomatose squameuse de la

conjonctive ayant déjà récidivé une ou plusieurs fois avec les techniques traditionnelles ont tous été guéris définitivement. (109)

5. Chirurgies de la tunique fibreuse de l'œil

a. Chirurgie filtrante pour le traitement du glaucome

Plusieurs essais dans le traitement du glaucome ont été menés dans les années 80, dans lesquels le laser CO₂ expérimental a été utilisé pour réaliser une trabeculotomie ou bien un amincissement scléral assisté et calibré. (12)

S'étant depuis avéré moins performant que les nombreux autres traitements du glaucome disponibles, cet instrument a été abandonné. On assiste néanmoins depuis peu à un regain d'intérêt pour cet instrument dans ce domaine depuis l'amélioration des paramètres de contrôle du faisceau (mode ultrapulsé sous contrôle microscopique). (4,78)

b. Chirurgie cornéenne

Les premiers essais du laser au CO₂ dans la chirurgie cornéenne montraient qu'il était possible de l'employer pour des kératectomies superficielles, grâce à un contrôle précis de la profondeur de vaporisation cornéenne en mode défocalisé. Le laser CO₂ a néanmoins été remplacé en ophtalmologie humaine depuis par d'autres lasers bien plus adaptés à ces interventions (le laser excimère par exemple). (32)

Le laser CO₂ possède donc de nombreuses applications en ophtalmologie humaine, même si celles-ci sont principalement cantonnées à la chirurgie palpébrale et conjonctivale, car d'autres méthodes et instruments (dont beaucoup d'autres lasers) sont disponibles et mieux adaptés au traitement d'affections cornéennes et intra-oculaires.

TROISIEME PARTIE : UTILISATIONS DU LASER CO₂ EN OPHTALMOLOGIE VETERINAIRE

A partir des exemples d'utilisations du laser CO₂ en ophtalmologie humaine, nous pouvons établir une liste des opérations praticables en ophtalmologie vétérinaire. Le but de ce travail n'est pas de justifier l'acquisition d'un équipement onéreux pour l'exercice de cette seule spécialité, mais d'envisager l'ensemble des procédures réalisables ainsi que les avantages que peut présenter ce laser, s'il équipe une structure vétérinaire polyvalente (nombreuses chirurgies en général, et gestions de cas référés en ophtalmologie par exemple).

Comme en ophtalmologie humaine, les propriétés du laser CO₂ vis-à-vis des milieux aqueux empêchent à l'heure actuelle toute utilisation intra-oculaire. L'étude se limitera donc aux traitements d'affections concernant la surface de l'œil, ainsi que ses annexes. Nous nous concentrerons sur les espèces canine, féline et équine, qui restent les seules concernées en pratique (exception faite des NAC pour lesquels on ne peut qu'extrapoler, la littérature s'y rapportant étant quasiment inexistante).

Peu nombreuses sont les publications qui font état de l'utilisation exclusive du laser CO₂ pour telle ou telle chirurgie de l'œil ou de ses annexes, dans la littérature actuelle. Néanmoins, il existe de nombreuses descriptions ponctuelles de ses applications, ou encore des évocations générales de ses champs d'applications en ophtalmologie vétérinaire. (14,55)

La description des utilisations du laser CO₂ selon le mode d'émission (focalisé ou défocalisé) ne serait pas pertinente en ophtalmologie vétérinaire, car les praticiens qui utilisent ce laser alternent fréquemment au cours des chirurgies entre des étapes de section franche/dissection, et des étapes d'hémostase superficielle, de vaporisation des berges, ou encore de contraction du collagène dermique en mode défocalisé de plus faible puissance. Nous progresserons donc dans cette partie structure anatomique par structure anatomique, depuis les paupières jusqu'à la cornée.

A. Chirurgie des paupières réalisables au laser CO₂

1. Tumeurs palpébrales

a. Généralités

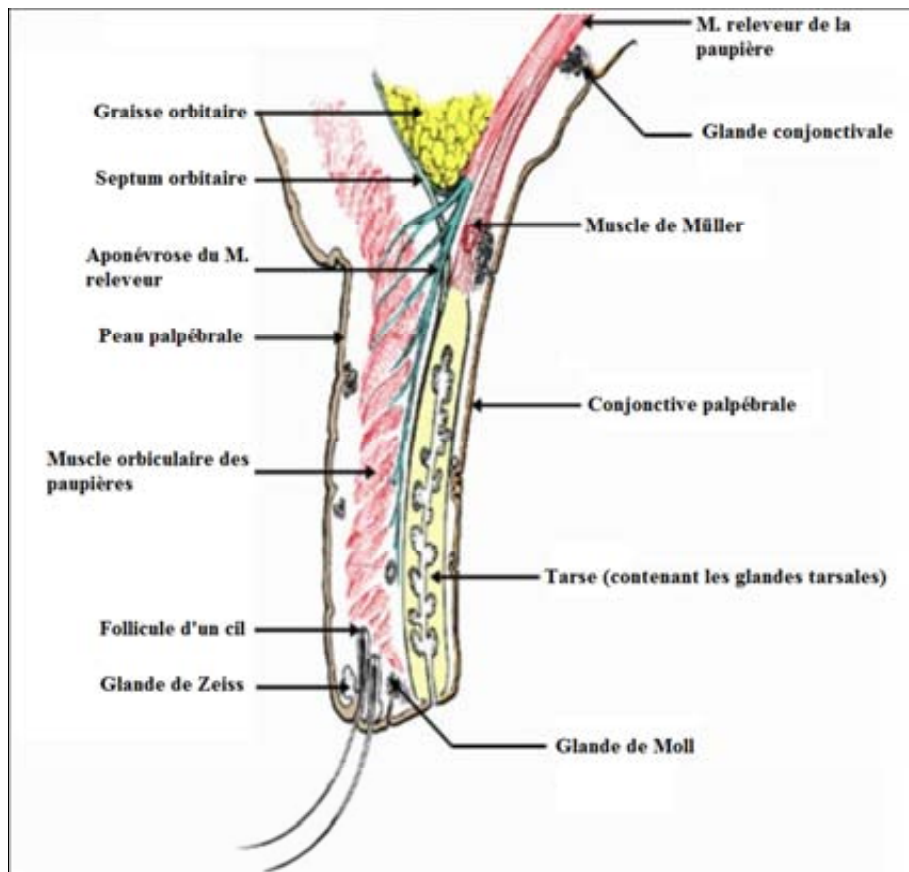


Figure 17 : Schéma d'une coupe transversale de la paupière supérieure chez le chien.

- Les tumeurs palpébrales chez le chien

La paupière est souvent le siège de tumeurs chez le chien âgé. Les problèmes posés par les tumeurs palpébrales sont souvent d'ordre purement esthétique au commencement, mais l'éventualité d'une irritation, d'une lagophtalmie, d'hémorragies ou bien encore le potentiel métastatique amène à envisager un traitement rapide. Par chance, la plupart des tumeurs palpébrales sont bénignes chez le chien, et l'irritation secondaire est une exception plutôt que la règle. Les tumeurs malignes ne sont le plus souvent que localement invasives, et ne métastasent que rarement.

Nature de la tumeur	Fréquence relative
Adénome sébacé	28.7-60 %
Papillome squameux	10.6-17.3 %
Adénocarcinome sébacé	2.0-15.3 %
Mélanome bénin	12.9-17.6 %
Mélanome malin	2.8-7.9 %
Histiocytome	1.6-3.5 %
Mastocytome	1-2.5 %

Figure 18 : Classification histologique et fréquences relatives des tumeurs palpébrales chez le chien. D'après (52)

- Les tumeurs palpébrales chez le chat

Les tumeurs de la paupière sont peu fréquentes chez le chat. Elles sont habituellement malignes et localement invasives. La prévalence des tumeurs des paupières augmentent avec l'âge. Le carcinome épidermoïde est l'entité rencontrée le plus souvent ; il se présente sous la forme d'une petite lésion ulcéreuse, dépressive (forme térébrante) ou au contraire légèrement surélevée (forme exophytique), sur ou bien à côté du bord libre de la paupière. Les chats blancs sont plus souvent atteints. Les métastases n'apparaissent que tardivement dans l'évolution de la maladie, mais cette tumeur peut être localement très envahissante. Les nœuds lymphatiques locorégionaux peuvent également être atteints.

Type de tumeur	Données Médicales Vétérinaires
Epithéliomas spinocellulaires	65 %
Fibrosarcomes	5 %
Lymphosarcomes	-
Non-déterminés	5 %
Adénocarcinomes	3.5 %
Adénomes/Adénomes sébacés/Cystadénomes	3.5 %
Mastocytomes	3.5 %
Carcinomes à cellules basales	2.3 %
Carcinomes non-spécifiés	2.3 %
Fibrome	2.3 %
Hémangiosarcomes	2.3 %
Mélanomes	2.3 %
Hémangiomes	1 %
Neurofibrome	1 %
Trichoépithéliomes	1 %
Papillome squameux	-
Histiocytomes	-
Total	100

Figure 19 : Classification histologique et fréquences relatives des tumeurs palpébrales chez le chat. D'après (52)

La nature de la tumeur palpébrale n'influence que peu la technique chirurgicale, si la chirurgie est décidée. Nous allons développer le cas des adénomes des glandes de Meibomius chez le chien, cas représentatif car le plus rencontré en pratique.

b. Les adénomes des glandes de Meibomius

(2,14,24)

Les adénomes des glandes de Meibomius (ou glandes tarsales) sont les tumeurs de la paupière les plus fréquentes chez le chien. Ce sont des tumeurs du chien âgé, qui peuvent entraîner à terme, en plus de leur aspect inesthétique, une gêne de la fonction palpébrale voire une irritation cornéenne avec épiphora. Ces tumeurs revêtent souvent un aspect de masse exophytique émergeant du bord libre de la paupière, mais elles peuvent également se développer dans l'épaisseur de la paupière, n'entraînant ainsi qu'une faible déformation. Elles sont constituées de tissus glandulaires bien différenciés. Leur taille varie de 1 millimètre à plus d'un centimètre, le frottement permanent et l'inflammation ainsi créée pouvant participer à leur grossissement. Malgré un comportement typiquement bénin, un traitement précoce permet d'anticiper les complications d'irritation oculaire, et de simplifier la chirurgie d'exérèse et éventuellement de reconstruction. (24)

Les techniques chirurgicales classiques sont nombreuses (exérèse de pleine épaisseur, plastie en H, technique du lambeau de rotation, etc...).

Cette affection fréquente et de diagnostic facile est un bon exemple de chirurgie réalisable au laser CO₂.

La glande de Meibomius incriminée est identifiée depuis la face conjonctivale de la paupière, et peut être isolée à l'aide d'une pince à chalazion. En fonction de la taille de la tumeur, la technique varie d'une simple vaporisation de la glande en utilisant un spot de 0.3 mm à 4W, à une exérèse de pleine épaisseur de la tranche de paupière concernée. (14,24)

En 2005, Bussièrès et al. ont décrit la technique et le suivi post-opératoire de 12 ablations d'adénomes Meibomiens au laser CO₂. Un embout de 0.8 mm a été utilisé, avec pour paramètres d'émission 7W en mode continu superpulsé (soit une irradiancance de 1393W/cm²), paramètres choisis pour obtenir une vaporisation des tissus visés avec une cicatrice la plus discrète possible. On a procédé à un nettoyage manuel des tissus nécrosés, puis on a irradié les lit de la tumeur en défocalisant progressivement le faisceau, de manière à vaporiser les éventuelles cellules tumorales persistantes, et à induire une contraction du site chirurgical, ce dernier n'étant pas suturé. Les résultats de ces chirurgies ont été évalués en termes de confort pour l'animal, de signes locaux d'inflammation et d'aspect esthétique pour les propriétaires, au cours du post-opératoire immédiat, puis à 3 semaines et 6 mois. (24)

L'absence de complications et de récurrences à 6 mois, l'aspect esthétique satisfaisant de cette option thérapeutique, ainsi que l'absence de fils de sutures à retirer et sa faisabilité sous une simple anesthésie locale chez des patients coopératifs, ont conduit les auteurs à conclure que le laser CO₂ est un outil de choix dans le traitement de cette affection, et par extrapolation à de nombreuses tumeurs palpébrales chez les carnivores domestiques et le cheval.



Adénome d'une glande de Meibomius enlevé au laser CO₂ au service d'Ophtalmologie de l'ENVT

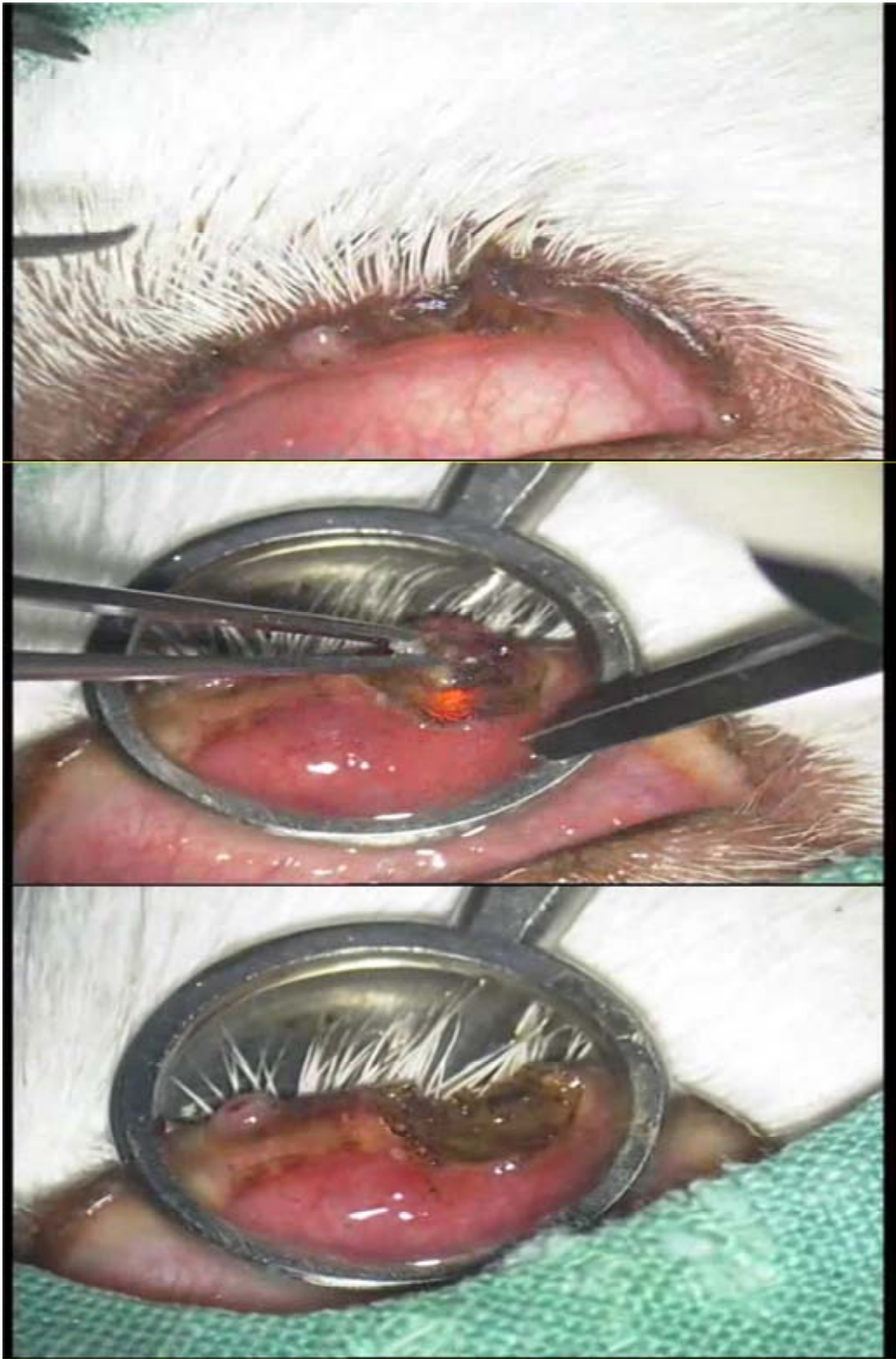
A : aspect préopératoire

B : incision au laser près du canthus interne

C : aspect après ablation de la masse

D : aspect après suture (réveil de l'animal)
(Images : Service d'Ophtalmologie ENVT)

Page suivante : carcinome épidermoïde touchant le bord libre de la paupière supérieure, enlevé au laser CO2 au service d'ophtalmologie de l'ENVT. La faible dimension du defect ainsi que l'absence de saignement rendent inutiles la reconstruction de même que la suture du site. (Images : Service d'Ophtalmologie ENVT)



2. Correction des malpositions palpébrales

a. L'entropion

Comme chez l'Homme, l'entropion correspond chez l'animal à un enroulement du bord libre de la paupière vers l'intérieur, qui peut avoir 3 causes distinctes :

-L'entropion congénital touche par exemple les Caniches nains, les Chow-chow, et le Saint-Bernard.

-L'entropion cicatriciel peut résulter d'un traumatisme, d'un processus inflammatoire chronique ou bien faire suite à une intervention chirurgicale.

-L'entropion spasmodique est la conséquence d'une affection douloureuse du globe, générant un blépharospasme. La contracture permanente du muscle orbiculaire de l'œil finit par créer un contact permanent entre la face extérieure de la paupière inférieure voire supérieure.

Les entropions peuvent toucher toutes les paupières, mais les paupières inférieures sont largement les plus concernées.

Les entropions sont beaucoup plus rares chez le chat que chez le chien où de nombreuses races sont prédisposées.

La conséquence d'un entropion quel que soit son origine est l'irritation de la cornée par les cils de la paupière inversée, qui sont alors orientés vers la cornée (trichiasis), puis par les poils de la peau palpébrale lorsque l'enroulement est plus important.

Cette irritation permanente entraîne un larmoiement, une rougeur et une douleur oculaire, qui sont souvent les motifs de consultation. L'irritation contribuant à maintenir le blépharospasme, on entre alors dans un cercle vicieux. En l'absence de traitement, la kératite peut évoluer en un ulcère cornéen relativement étendu.

L'entropion peut être traité de deux façons avec le laser CO₂ :

- Contraction du collagène dermique des paupières au laser CO₂ (14)

Dans les cas d'un entropion peu marqué, l'énergie laser peut être employée pour réaliser une contraction importante du collagène intradermique, par brûlure superficielle de la peau, sans pratiquer d'incisions véritables. La technique consiste à faire plusieurs passages verticaux et parallèles du faisceau sur les paupières préalablement tondues. La pièce à main est placée perpendiculairement à la peau palpébrale, et délivre un rayon focalisé de 0.8 mm de diamètre, à 8-10 W, en plusieurs traits radiants depuis le bord libre jusqu'au pli palpébral si nécessaire, et de préférence de la partie latérale à la partie médiale. Chaque passage est espacé des autres d'environ 2mm.

Cette intervention a pour effet de raccourcir visiblement et au fur et à mesure la longueur de la lamelle antérieure de la paupière traitée. L'intervention est terminée lorsque la paupière traitée est revenue dans une position satisfaisante.

Si, après avoir traité la totalité de la surface palpébrale, le raccourcissement est encore insuffisant, il est recommandé de ne pas repasser avec le laser sur les marques ainsi visibles. On préférera prévoir une seconde intervention une fois la cicatrisation terminée. La cicatrisation et la repousse des poils sont terminées 4 semaines après l'intervention.

Dans leur ouvrage, Berger et Eeg (14) recommandent comme seul traitement post-opératoire l'application de compresses froides sur les paupières plusieurs fois par jours pendant 3 jours, afin d'atténuer la gêne de l'animal et d'enlever les éventuels débris restés après la chirurgie.

Les avantages de cette technique sur la correction chirurgicale classique de l'entropion au bistouri sont évidents : une absence totale d'incisions et donc de saignements, aucuns fils de sutures...de plus, on profite dans ce cas d'une des particularités du laser CO₂, résumée en anglais par la maxime «what you see is what you get » (« WYSIWYG ») : l'effet de contraction du collagène est observé au fur et à mesure du passage du laser, et le résultat après cicatrisation est très proche de celui observé dès le réveil de l'animal.

- Techniques classiques de corrections de l'entropion réalisables au laser CO₂ (14,55)

Il existe de nombreuses techniques de corrections chirurgicales de l'entropion. Le chirurgien fait son choix en fonction du type et de la sévérité de l'entropion, et de la race du chien. Elles comportent naturellement toutes des étapes d'incisions cutanées et conjonctivales, qui sont praticables avec le laser CO₂ selon des paramètres moyens de 0.4 mm à 2-4 W, ou bien 0.8 mm de diamètre de spot à 10-12 W, en mode continu super-pulsé. Le choix dépend de l'épaisseur des plans à sectionner, ainsi que du modèle de laser employé. Naturellement, la dextérité et l'expérience du chirurgien avec ce matériel influencent également ces paramètres.

La technique de Hotz-Celsus est la plus simple et la plus souvent utilisée pour la correction de l'entropion. Elle consiste à réséquer un lambeau de peau en croissant, avec une partie du muscle orbiculaire, dont l'axe est parallèle au bord libre de la paupière. Pour déterminer la largeur du lambeau, il faut apprécier, sur l'animal vigile, l'intensité de l'entropion avant et après anesthésie de la surface oculaire. Après exérèse du lambeau, on place des sutures à points séparés (mono filament 5-0). Il est conseillé de couper le plus court possible les chefs orientés vers l'œil. En règle générale la chirurgie des paupières nécessite la mise en place d'un carcan.

Il existe de nombreuses autres méthodes (technique de canthoplastie externe, la technique de Stades, la plastie Y – V...) (51)



Incision palpébrale au cours d'une chirurgie de correction de l'entropion sur un shar-pei de 10 ans à l'ENVT. Le point rouge du laser de visée permet de visualiser précisément la zone qui va être traitée. Notez l'absence de saignement.

b. L'ectropion

L'ectropion est une éversion de la paupière causée par un déséquilibre physique ou mécanique entre les lamelles palpébrales antérieures et postérieures.

Moins dangereux pour la cornée que l'entropion, l'ectropion est néanmoins une cause de kérato-conjonctivites chroniques par exposition, d'instabilité du film lacrymal et de larmolement, sans compter l'aspect des paupières rouges et tombantes inesthétique aux yeux de certains propriétaires. L'ectropion primaire observé sur les jeunes chiens n'intéresse que la paupière inférieure (Saint-Bernard, Dogue, Bull mastiff...). L'ectropion ne justifie une correction chirurgicale que s'il est cause d'inflammation conjonctivale ou cornéenne.

La littérature vétérinaire est très limitée concernant l'emploi du laser CO₂ dans la correction des ectropions. Son utilisation par Korn et Glotzbach (79) chez l'Homme laisse supposer que les étapes incisionnelles des techniques classiques seraient tout à fait réalisables chez le chien à l'aide de cet instrument. La généralisation de son emploi au sein des cliniques vétérinaires bien équipées dans les années à venir devrait s'accompagner de publications en faisant état.

3. Correction des anomalies ciliaires ou pileuses

On y regroupe 4 entités distinctes (107):

-Le distichiasis, qui se définit comme la présence de cils aberrants émergeant des orifices des glandes tarsales. Il est le plus souvent congénital. De nombreuses races y sont prédisposées, parmi lesquelles on retiendra le Cocker, le Caniche nain, le Boxer et le Pékinois.

-Le trichiasis, qui est une affection caractérisée par la présence de cils correctement implantés mais anormalement recourbés et orientés, de telle sorte qu'elles viennent au contact de la cornée. Le défaut d'orientation de ces cils initialement implantés correctement peut être la conséquence d'un entropion.

-Le cil ectopique au sens strict ou " distichiasis atypique ", qui désigne un cil implanté dans la glande tarsale et émergeant au travers de la conjonctive de la paupière supérieure.

-Le pseudo-trichiasis, où des poils de la face viennent frotter sur la cornée à cause d'une hypertrophie des plis nasaux (fréquent chez les races brachycéphales, canines et félines).

Ces affections ont toutes pour conséquence une irritation permanente de la cornée, pouvant conduire jusqu'à l'ulcère cornéen. Le traitement définitif consiste à enlever chirurgicalement les bulbes pileux incriminés (une simple épilation conduira inévitablement à une récurrence). Diverses techniques chirurgicales existent, en plus de la destruction par le froid à l'azote liquide. Si un trichiasis résulte d'un entropion, il convient naturellement de traiter celui-ci en priorité.

Dans le traitement de ces affections palpébrales (exception faite du pseudo-trichiasis, traité par résection des plis nasaux et donc hors de propos ici), le laser CO₂ présente les mêmes avantages que la cryo-épilation à l'azote liquide, car il permet d'éviter les incisions conjonctivales, délicates et sanglantes. Berger et Eeg suggèrent la méthode suivante : utilisation d'un embout de 0.3 mm de diamètre, et application de 3 à 5 tirs de 200 msec à 5W par follicule. En mode focalisé, il faut prendre soin à viser précisément l'orifice de sortie du follicule pileux. Le bulbe pileux et éventuellement la glande sébacée associée sont vaporisés quand un liquide grisâtre s'écoule de l'orifice, accompagné de fumée. La petite perte de substance non suturée sera comblée par du collagène en 3 à 5 jours. (14)

4. Autres lésions

Les paupières peuvent être le siège de lésions papillomateuses, d'origine virale, surtout chez les jeunes chiens. La localisation palpébrale est dans cette espèce certes beaucoup plus rare que chez l'Homme, mais le cas échéant le laser CO₂ permet une exérèse rapide et exsangue de ces lésions. (38)

B. Chirurgie de la conjonctive, de la membrane nictitante et du système lacrymal réalisables au laser CO₂

1. Les masses conjonctivales

Les tumeurs conjonctivales sont rares chez le chien et le chat, et comportent : les mélanomes, les carcinomes épidermoïde, les angioendothéliomatose, les mastocytomes, hémangiomes, hémangiosarcom.es, angiokératomes, papillomes, lymphosarcomes et histiocytomes. Les mélanomes de la conjonctive sont généralement malins, et les récurrences ainsi que les métastases sont fréquentes. Associer la cryothérapie et l'exérèse semble être le traitement le plus efficace. (52)

Parmi les masses non-tumorales associées à la conjonctive, on distingue les nodules inflammatoires, des déplacements de graisse orbitaire, ou bien des kystes.

Le laser au CO₂ permet l'exérèse de ces masses, la vaporisation du lit de la tumeur complétant en générale une section de la partie en relief en mode focalisé.

2. Affections de la membrane nictitante

a. Chirurgie d'enfouissement de la glande

La luxation de la glande lacrymale associée à la membrane nictitante est une anomalie très fréquemment rencontrée sur les jeunes chiens, avec une prédisposition marquée dans certaines races (Beagles, Bulldogs, Cockers, races brachycéphales et grandes races comme les Dogues allemands). Théoriquement possible chez le chat, elle reste très rare. Le lapin semble lui être plus susceptible d'y être confronté Le plus souvent suite à un traumatisme, la glande rompt son attache inférieure et vient se prolaber au coin de l'œil, entre le bord de la troisième

paupière et l'œil du côté nasal. Cette anomalie ne doit pas être confondue avec l'éversion du cartilage dont le traitement chirurgical est différent. L'exérèse de la glande, compte tenu de l'importance de son rôle dans la sécrétion lacrymale, est à proscrire.

Berger et Eeg proposent une adaptation de la chirurgie d'enfouissement en y associant le laser CO₂. L'intérêt principal de cet outil dans cette procédure est comme souvent l'hémostase qu'il procure, notamment lorsque l'on sectionne, au cours de la création de la poche, le vaisseau conjonctival responsable de l'irrigation de la glande nictitante. Berger et Eeg proposent de vaporiser ce vaisseau avec un faisceau de 0.3 mm de diamètre, à 4 W en mode continu pour s'affranchir de l'important saignement habituellement rencontré à ce stade. Le reste des incisions de la chirurgie étant réalisées avec le laser CO₂ superpulsé pour minimiser la formation de tissus carbonisés. Le reste de la procédure (enfouissement proprement-dit et sutures) étant réalisés selon la méthode traditionnelle. (14)

b. Eversion/inversion du cartilage

Il est prudent d'avertir les propriétaires du patient (surtout pour les grandes races) que procidence de la glande et anomalies du cartilage –ou inversement- peuvent se succéder. La technique de correction est simple. On pratique une courte incision conjonctivale au laser sur la face postérieure de la MN en regard de la partie incurvée de la branche verticale du cartilage. Après l'avoir isolée, on glisse les branches d'une paire de ciseaux mousses sous le cartilage qu'on libère de ses attaches. On retire la partie lésée. Habituellement, la MN reprend d'elle-même une position physiologique. Si nécessaire on peut en plus recourir à une tarsorrhaphie.

c. Exérèse partielle /totale de la MN

Les tumeurs de la 3^e paupière sont rares chez le chien et le chat. Elles se développent chez l'animal âgé depuis la muqueuse conjonctivale ou les cellules glandulaires. Les adénocarcinomes sont les tumeurs les plus fréquentes chez le chien, et sont décrites chez le chat.

En cas de tumeur de la membrane nictitante, la conduite thérapeutique sera guidée par les résultats de la biopsie. Deux types de tumeur sont néanmoins des indications absolues pour une exérèse totale : l'adénocarcinome et le lymphosarcome.

Ces chirurgies délicates peuvent être faites au laser CO₂ couplé à un microscope opératoire.

On peut envisager (avec des résultats inconstants) de combler le defect par une greffe de muqueuse buccale.

3. Traitement de la sténose du point lacrymal

La faisabilité de cette intervention a été suggérée par Gilmour en 2002 (52) pour l'ophtalmologie vétérinaire et décrite par Chong (29) en 2005 pour l'ophtalmologie humaine.

C.Chirurgie de la sclère et du limbe et de la cornée réalisables au laser CO₂

Le laser CO₂ possède en théorie un vaste éventail d'utilisations sur la cornée.

Du fait de la nature excessivement délicate de la cornée et des marges d'erreur extrêmement réduites, la puissance, les caractéristiques d'impulsion, et le contrôle de l'énergie délivrée sont des points cruciaux de l'utilisation du laser à CO₂. La sélection de la puissance ne devra pas excéder 2 à 3W. Le mode superpulsé permet l'émission d'impulsions de très haute puissance de crête et d'une durée de l'ordre de la microseconde. Ceci permet une ablation tissulaire efficace avec un minimum de transfert thermique aux tissus adjacents, et améliorant le contrôle du chirurgien.

On utilisera dans les opérations cornéennes un spot de diamètre 0.8 ou 1.4 mm présentant moins de risques dans leur utilisation que des spots de diamètre 0.25 mm ou 0.4 mm. (54)

L'ablation tissulaire au laser peut être appropriée pour les néoplasmes cornéens, les ulcères indolents canins, les petits séquestres cornéens, et les kératopathies bulleuses secondaires à une dysfonction épithéliale.

La kératectomie n'est pas indiquée pour le traitement des ulcères non-indolent (ulcères cornéens traumatiques par exemple).

1. Les ulcères cornéens épithéliaux atones du chien

Les ulcères épithéliaux atones de la cornée sont le plus souvent rencontrés chez les chiens de 6 ans et plus. La cause précise de cette pathologie cornéenne reste incertaine l'heure actuelle. Les Boxers sont les plus touchés.

Cliniquement, l'ulcère épithélial chronique se manifeste comme un ulcère superficiel de la cornée qui ne répond pas au traitement médical approprié. Ces ulcères ont un contour épithélial non adhérent et le chien présente souvent des larmoiements et un blépharospasme. Une vascularisation de la cornée peut se développer et devenir chronique. Le diagnostic d'un ulcère indolent est confirmé par un test positif à la fluorescéine, la coloration s'étendant sous les bords lâches et non adhérents de l'ulcère.

Les traitements classiques de l'ulcère indolent sont la scarification en lignes et la kératectomie au bistouri ou à l'aide d'un punch à biopsie de faible diamètre. Le but de ces traitements est de passer à travers (comme lors une scarification en lignes) ou retirer (comme lors d'une kératectomie) la membrane basale et le stroma superficiel cornéen de structure anormale. Ceci permet la ré-épithélialisation avec des attaches épithéliales permanentes dans la zone de l'ulcère.

Le laser CO₂ peut être utilisé pour scarifier en ligne ou pratiquer l'ablation de la partie épithéliale de la membrane basale et du stroma superficiel. L'avantage que présente cette technique est la réduction considérable de l'inconfort du patient en période postopératoire, ceci probablement lié au fait de la coagulation des terminaisons nerveuses des nerfs cornéens. Cependant, cela peut également entraîner un délai dans la cicatrisation qui n'existe pas avec le scalpel. (54)

L'emploi du laser CO₂ lors de chirurgie de la cornée peut néanmoins présenter quelques inconvénients :

- un risque de cicatrices cornéennes suite à cette opération,

-une contraction des fibres de collagène du stroma entraînant des déformations de la cornée,

-des dommages aux cellules endothéliales.

Le temps de cicatrisation parfois allongé avec le laser CO₂ serait en relation avec la coagulation des terminaisons nerveuses ; celles-ci ne seraient plus capables de relarguer les facteurs neurotrophiques essentiels à la cicatrisation tels que la substance P, le peptide du gène calcitonine, la noradrénaline (54)

2. Les séquestres cornéens superficiels du chat

La kératectomie superficielle est le traitement actuel de choix du séquestre cornéen félin. L'emploi du laser à CO₂ représente une technique valable pour le traitement de cette affection, cependant les mêmes remarques que précédemment (temps de cicatrisation prolongé augmentant le risque de re-séquestration et de cicatrices, la contraction des fibres de collagènes du stroma, les dommages à l'endothélium) empêchent la recommandation de l'utilisation du laser par rapport à la kératectomie à la lame froide couramment réalisée.

3. L'œdème cornéen par décompensation endothéliale

Un dysfonctionnement endothélial peut être à l'origine d'un œdème cornéen diffus et sévère conduisant souvent à la formation de bulles épithéliales et sous-épithéliales persistantes ou récurrentes qui en se rompant peuvent causer des ulcères douloureux.

La thermokératectomie, c'est à dire une cautérisation à basse température, a été utilisée chez le chien pour scarifier en lignes le stroma afin d'en réduire l'œdème (54)

L'effet thermique du laser à CO₂ est très efficace pour entraîner une contraction du collagène. Ce dernier peut ainsi être utilisé dans le traitement d'œdèmes sévères du stroma liés à un dysfonctionnement de l'endothélium chez le chien (54)

4. Kératites microbiennes

La capacité du laser à CO₂ à vaporiser les microbes au sein même du champ opératoire est un avantage mis en œuvre dans de nombreuses opérations des tissus mous. L'application de ce laser serait donc bénéfique pour la stérilisation d'ulcères cornéens infectés lors de kératites microbiennes. (120)

Pour les chirurgies de la cornée, le laser excimère est bien plus adapté que le laser CO₂. Il n'est malheureusement pas accessible, pour des raisons de rentabilité, aux vétérinaires.

5. Vaporisation de tumeurs

On traitera essentiellement ici le mélanome épibulbaire, tumeur cornéo-sclérale la plus fréquente dans l'espèce canine. Chez le chat, les tumeurs de la cornée et de la sclère sont rares, et les applications du laser CO₂ en ophtalmologie équine sont abordées plus loin.

Les mélanomes du limbe (ou épibulbaires) font partie des tumeurs oculaires primitives les plus courantes chez le chien. Ils sont initialement localisés à la surface du globe oculaire, mais une infiltration des couches profondes, puis un envahissement intraoculaire peuvent se produire. Ils peuvent également envahir secondairement la cornée. (19,52)

Un avantage potentiel du laser est d'étendre la zone de destruction cellulaire au-delà de la zone d'ablation théorique, ce qui permettrait de réduire le taux de récurrence des tumeurs. Toutefois, il n'existe pas d'étude clinique sur ce sujet confirmant la diminution de récurrence des néoplasmes cornéens et épiscléraux comparant le laser et le scalpel. Il ne semble pas y avoir d'avantage définitif du laser sur le scalpel. En effet, certains chirurgiens rapportent un temps de cicatrisation plus long et plus de cicatrices cornéennes avec la technique laser. Cependant, concernant les tumeurs épisclérales, l'hémostase instantanée procurée par le laser CO₂ peut constituer un avantage déterminant pour l'emploi de celui-ci.

D.Énucléation

Cette intervention chirurgicale est réalisée fréquemment en ophtalmologie vétérinaire, suite à des lésions importantes et irréversibles du globe, ou en raison de la douleur que peut générer un œil qui n'est plus visuel (glaucome par exemple). Les considérations esthétiques et sociales étant moins importantes chez nos patients animaux que chez l'Homme, l'énucléation est donc souvent un traitement définitif.

Le laser CO₂ peut être avantageusement utilisé pour cette opération et permet une hémostase efficace et un travail précis. On reprend alors les étapes classiques de l'énucléation, avec une rapidité d'exécution améliorée par les incisions exsangues réalisées par le laser. La canthotomie latérale et la dissection de la conjonctive bulbaire sont réalisées selon les paramètres suivants : 0.4mm, 4W, mode continu superpulsé. Les muscles oculomoteurs sont réséqués, la graisse rétrobulbaire est disséquée jusqu'à exposer le faisceau vasculo-nerveux. Après clampage et ligature du pédicule vasculaire, celui-ci est sectionné par un faisceau de 0.8 mm de diamètre à 8 W CWSP, délivré par un embout de 50 mm incurvé à 90° pour plus de commodité dans cette zone étroite d'accès. La suite de l'intervention consiste à tirer délicatement le globe ainsi libéré en irradiant à 8 W les attaches restantes afin de les détruire progressivement tout en assurant l'hémostase. On pratique ensuite l'exérèse de la membrane nictitante dans sa totalité en employant les mêmes paramètres. Le bord libre des paupières est sectionné au moyen d'un rayon de 0.3-0.4 mm, à 3-7W selon l'épaisseur de celles-ci, puis enfin on suture les deux bords palpébraux après un rinçage au sérum physiologique de l'orbite. (14, 98)

Le confort post-opératoire de l'animal est considérablement amélioré par l'emploi du laser CO₂, car il limite fortement l'apparition d'hématome et d'œdème.

On peut de plus rappeler que la vitesse d'exécution de la chirurgie apportée par le laser, en plus du confort pour le chirurgien, représente un avantage sur la durée d'anesthésie au cours de cette opération délabrante, parfois réalisée en urgence sur un animal traumatisé.

E. Utilisations du laser CO₂ en ophtalmologie équine

1. La chirurgie des formes oculaires du carcinome épidermoïde chez le cheval

a. Définition

(52,53,70,86,95)

Il s'agit d'une indication majeure de l'emploi de cet instrument en ophtalmologie équine.

Le carcinome épidermoïde est une tumeur maligne de l'épithélium malpighien. Susceptible de métastaser aux nœuds lymphatiques locorégionaux (en l'occurrence parotidiens et mandibulaires), aux glandes salivaires et au thorax, c'est la tumeur concernant l'œil et ses annexes la plus fréquente chez le cheval.

Elle affecte fréquemment la paupière inférieure (23% des carcinomes épidermoïdes oculaires), la membrane nictitante ou le canthus médial (28%), la conjonctive et le limbe (28%) , mais aussi la cornée et l'orbite. Il existe des races prédisposées (Appaloosas, chevaux de trait) avec un âge de diagnostic moyen de 11+/-3.9 ans.

Son apparition est favorisée par l'exposition répétée aux rayons U.V. solaires, une pigmentation claire du pourtour de l'œil, ainsi qu'une sensibilité individuelle accrue vis-à-vis des cancérigènes. Les U.V. agiraient en altérant le gène p53, suppresseur de tumeur, que l'on sait modifié dans les cellules de carcinome. La prévalence des carcinomes épidermoïdes augmente avec l'altitude et diminue lorsqu'augmente la latitude du milieu de vie (elle est donc liée au taux d'exposition aux UV). Cela tend à confirmer le rôle des U.V. dans la carcinogenèse.

Cette tumeur peut s'observer sous deux formes, exophytique ou térébrante. Les deux évolutions peuvent coexister au sein d'une même lésion. Sa surface présente un aspect rugueux, ulcéré, voire nécrosé dans 40% des cas. L'atteinte unilatérale est la plus fréquente.

b. Options thérapeutiques

Les différents traitements possibles sont : l'exérèse chirurgicale au scalpel, la cryothérapie, l'hyperthermie par radiofréquence, la radiothérapie au strontium, la chimiothérapie intralésionnelle au cisplatine ou au 5-fluoro-uracil, l'utilisation du bacille de Calmette Guérin (BCG), ainsi que la vaporisation au laser CO₂. Le taux de récurrence diminue en combinant plusieurs de ces techniques, surtout si le diagnostic est précoce. (52,66)

c. Une utilisation du laser CO₂ en fonction de la localisation du carcinome

Le laser CO₂ est surtout utilisé dans ce cas pour son pouvoir de photo ablation en mode défocalisé. Il permet ainsi de détruire couche par couche la tumeur en la vaporisant, depuis la peau palpébrale jusqu'à la cornée où l'on restera superficiel, le cas échéant. On cesse le tir lorsque la totalité de la surface de la tumeur est carbonisée. Par précaution on applique dans la mesure du possible le même traitement dans une zone de 5 mm en périphérie de la lésion. Les paramètres d'utilisations préconisés sont de 3 à 8 W, selon la profondeur de la tumeur. En raison des effets du laser CO₂ sur l'eau, il convient de bien protéger (à l'aide d'un matériau mat ou de compresses humides), les zones à épargner.

La vaporisation au laser CO₂ fait idéalement suite à une chirurgie de réduction tumorale conventionnelle ou au laser également. (66,86,43,94)

Les modalités du traitement au laser dépendent de la localisation ainsi que de l'épaisseur de la tumeur. On cherche en général à retirer les parties charnues, puis à vaporiser les berges de la zone d'exérèse.

Tumeur de la conjonctive palpébrale :

La vaporisation du siège de la tumeur au laser CO₂ servira en complément d'une exérèse chirurgicale, classique ou laser.

Tumeur de la conjonctive bulbaire :

Comme les masses limbiques ou cornéennes, ces tumeurs doivent faire l'objet de plusieurs traitements complémentaires.

Tumeur conjunctivo-limbique :

L'ablation tumorale au laser CO₂ en première intention peut être appropriée pour les carcinomes épidermoïdes à localisation limbiques. (86,5)

Tumeur cornéenne :

Le laser CO₂ est particulièrement adapté à la vaporisation des tumeurs cornéennes superficielles.

Lors d'application cornéenne, l'appareil est utilisé en mode continu, et réglé à une puissance de 3 à 8 W.

Après une éventuelle kératectomie superficielle n'excédant pas une profondeur d'un quart de l'épaisseur cornéenne, le laser CO₂ est utilisé pour l'ablation du stroma superficiel et de l'épithélium cornéen et conjonctival d'aspect normal aux alentours. L'énergie du laser doit être appliquée à la surface entière du site de kératectomie.

Au final, le laser CO₂ est pour certaines localisations l'instrument le plus adapté au traitement du carcinome épidermoïde du cheval, et pour d'autres un des éléments de choix dans les thérapies adjuvantes.

Page suivante : Carcinome épidermoïde chez un cheval, localisé à la conjonctive palpébrale,

opéré au laser CO₂ à l'ENVT

Haut : aspect préopératoire

Milieu : Aspect post-opératoire immédiat

Bas : Aspect 2 mois post-opératoire, guérison totale.





2. Utilisation dans le traitement d'abcès cornéens

Récemment, la kératectomie au laser CO₂ a été comparé à la kératectomie lamellaire et à la kératoplastie perforante dans le traitement d'abcès cornéens profonds chez le cheval (120). Portant sur 35 animaux, dont 15 ont subi une kératectomie au laser CO₂, l'étude montre des résultats comparables entre les animaux traités selon les méthodes conventionnelles et ceux opérés au laser, en terme de guérison clinique de l'affection et de satisfaction esthétique des propriétaires. Un laser CO₂ avec un embout de 0.8mm de diamètre, 4 watts, par pulses de 0.5ms a été utilisé pour vaporiser les tissus nécrosés du stroma jusqu'aux tissus sains sous-jacents. Des lavages au sérum physiologique ont été réalisés fréquemment au cours de la procédure. Comme après une kératectomie lamellaire dépassant la moitié de l'épaisseur cornéenne, l'intervention a été complétée par une greffe conjonctivale pédiculée.

Les avantages observés lors de cette étude sont :

-un inconfort post-opératoire moindre observé sur les chevaux opérés au laser.

-une cicatrisation optimale, probablement liée au fait que les éléments infectieux présents sur l'œil préalablement à la chirurgie sont également vaporisés, et ne gênent donc pas la cicatrisation.

-la possibilité pour le chirurgien d'être très précis dans le contrôle de la profondeur atteinte (14 à 17 μm de matière vaporisés à chaque passage)

Les inconvénients décrits dans les précédentes études portant sur l'utilisation du laser CO_2 dans les chirurgies de la cornée (dommages thermiques entraînant une cicatrice cornéenne importante, une déformation voire une perforation cornéenne, ainsi que des délais de cicatrisation augmentés), ont été observés le plus souvent après application du laser CO_2 en mode continu. Comme on l'a vu, ce mode d'émission génère plus de dommages thermiques, et dans un périmètre plus important, aux structures adjacentes. (750 μm contre 70 à 100 μm en mode pulsé). Il n'y a pas eu de problèmes liés à l'utilisation du laser dans cette série.

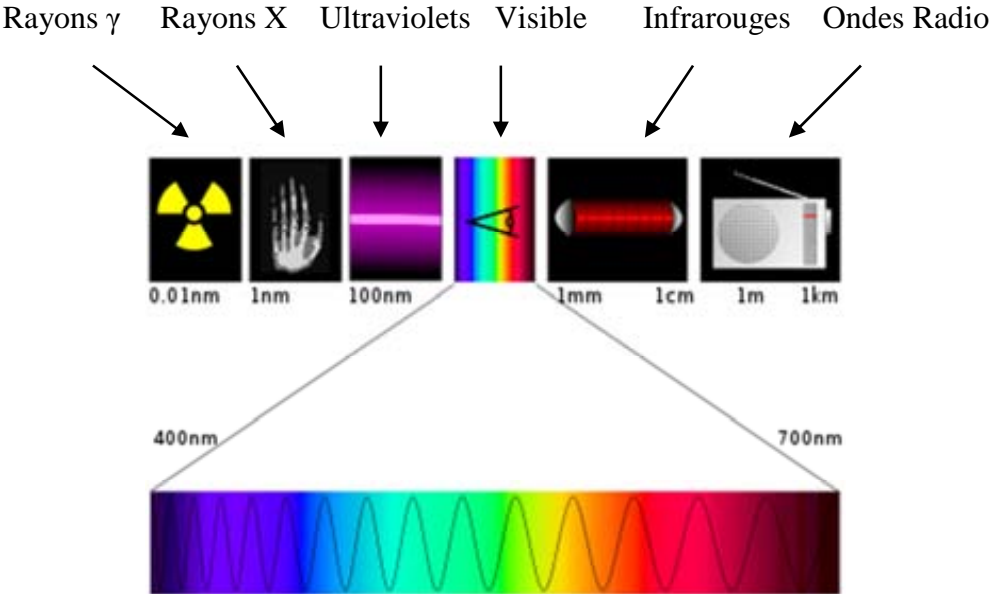
Cette étude montre l'efficacité du laser CO_2 dans le traitement d'abcès cornéens profonds chez le cheval, et laisse envisager sa faisabilité sur les carnivores domestiques. Même si des études sont encore à effectuer dans ce domaine, la maîtrise ainsi que la généralisation progressive de lasers CO_2 pulsés dans les structures vétérinaires à l'avenir pourrait amener à reconsidérer ces appareils dans les chirurgies de la cornée.

CONCLUSION

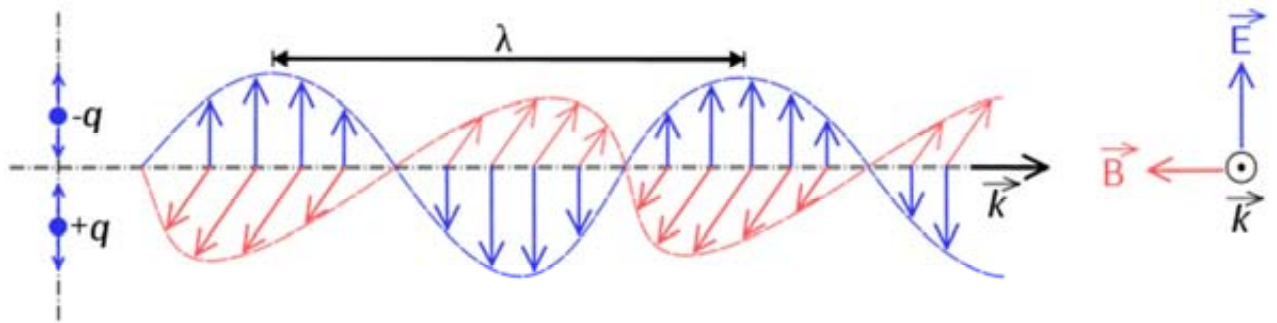
Le laser au dioxyde de carbone permet donc un vaste éventail d'interventions chirurgicales sur l'œil et les annexes des animaux. Que ce soit chez le chien, le chat ou encore les équidés domestiques, il offre de nombreux avantages en termes de souplesse d'utilisation, de rapidité d'exécution et de vitesse de récupération de l'animal opéré.

Des incisions exsangues, des œdèmes et des hématomes post-opératoires réduits, ainsi que la capacité à vaporiser des lésions infiltrantes couche par couche avec un contrôle précis de la profondeur d'action du faisceau, constituent ses points forts vis-à-vis de nombreuses chirurgies des paupières, de la conjonctive, de la membrane nictitante, et de la tunique fibreuse de l'œil. Son prix d'achat limite cependant son utilisation chez l'animal, et actuellement son champ d'action en ophtalmologie vétérinaire reste limité principalement aux annexes oculaires.

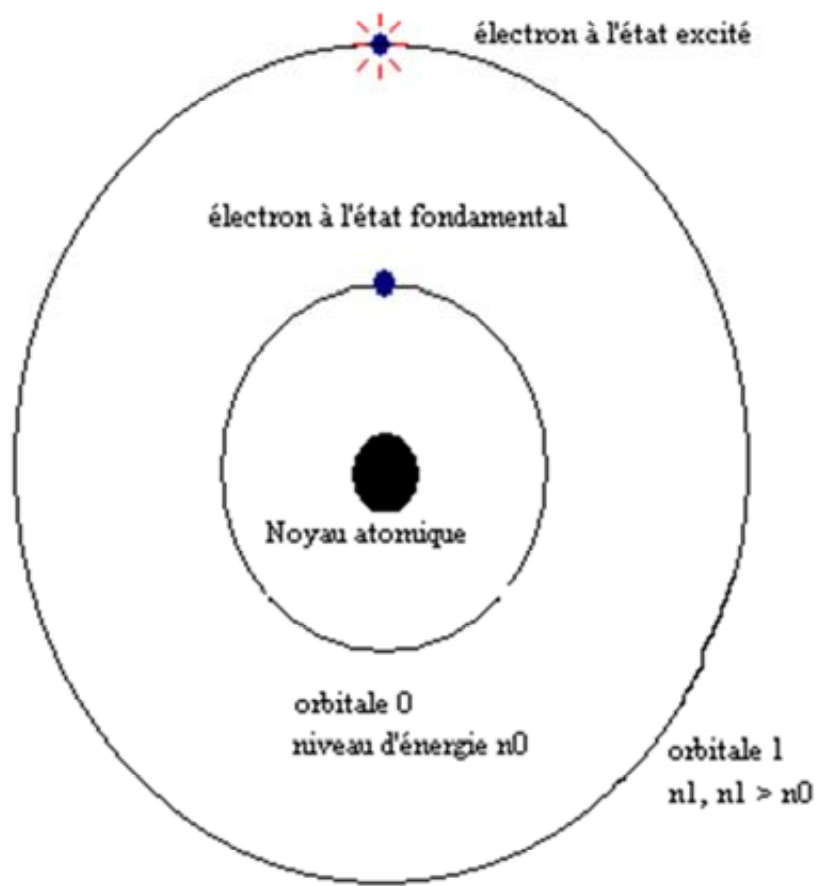
ANNEXES



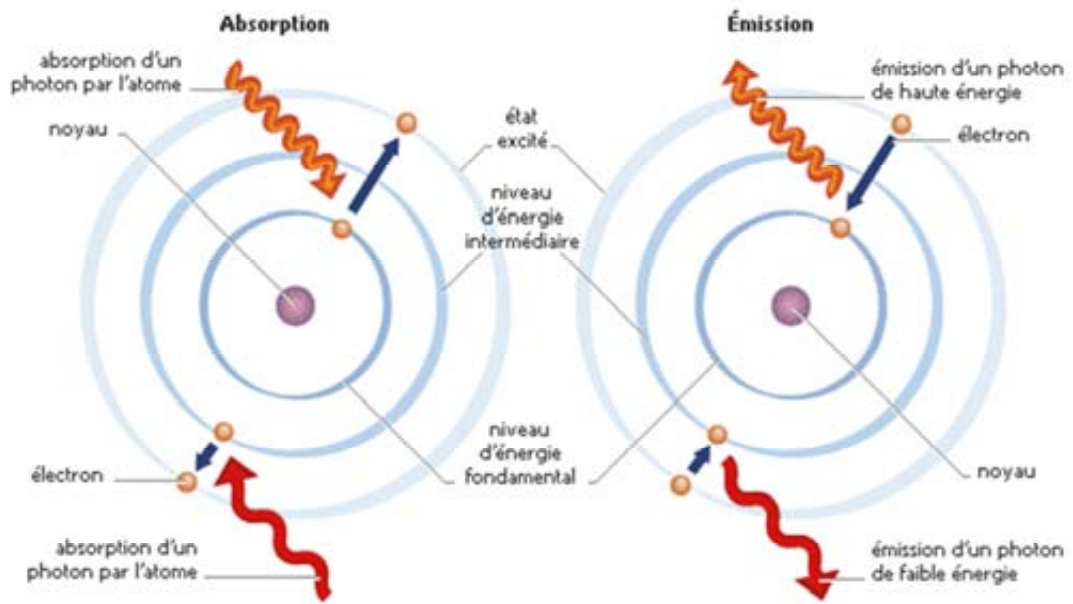
Annexe 1 :
Spectre des ondes électromagnétiques



Annexe 2 :
Onde électromagnétique : oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique, modèle du dipôle vibrant. Le vecteur \vec{k} indique la direction globale de propagation de l'onde, de longueur λ .



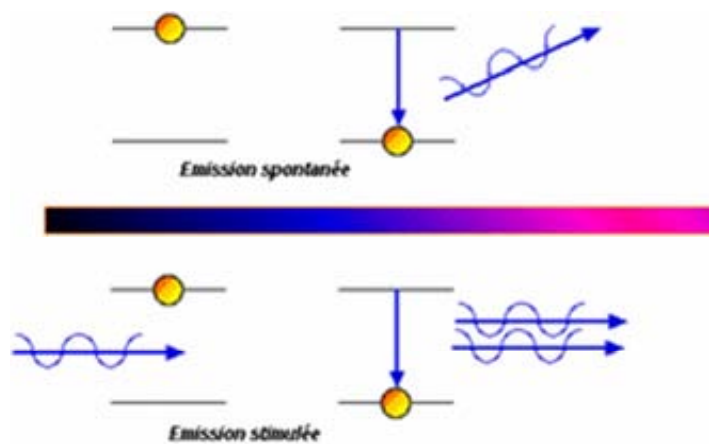
Annexe 3 :
Modèle des orbitales électroniques
(Atome a 1 électron)



Annexe 4 :

Deux interactions photon-atome possibles

(Source : <http://images.encarta.msn.com/xrefmedia/fencmed/targets/illus/ilt/T028540A.gif>)



Annexe 5 :

Deux modes d'émission de photon lors d'une transition électronique de n_1 à n_0

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Modèle des orbitales électroniques (Atome a 1 électron)

Figure 2 : Les trois possibilités d'interaction lumière/matière

Figure 3 : Comparaison des trains d'ondes selon le mode d'émission

Figure 4 : Schéma d'un oscillateur laser

Figure 5 : Relation entre angle d'incidence et de réflexion d'un rayon lumineux sur une surface plane

Figure 6 : Transmission d'un faisceau laser par bras articulé

Figure 7 : Transmission d'un faisceau laser par fibre optique

Figure 8 : Ensemble des phénomènes observés lorsqu'un laser rencontre la peau.

Figure 9 : Résultats de l'action thermique d'un laser sur un tissu vivant.

Figure 10 : Spectre d'absorption des 3 principaux chromophores des tissus : eau, hémoglobine et mélanine.

Figure 11 : Illustration des effets d'un laser CO₂ selon le degré de focalisation du rayon au point d'impact.

Figure 12 : Différences entre les régimes d'émission continu/pulsé

Figure 13 : Pièce à main de Laser CO₂

Figure 14 : Les applications du laser CO₂ en chirurgie oculo-plastique

Figure 15 : Schéma des différents plans anatomique des paupières.

Figure 16 : Différentes techniques chirurgicales de traitements du ptosis

Figure 17 : Schéma d'une coupe transversale de la paupière supérieure chez le chien.

Figure 18 : Classification histologique et fréquences relatives des tumeurs palpébrales chez le chien.

Figure 19 : Classification histologique et fréquences relatives des tumeurs palpébrales chez le chat.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) **AMELINE-AUDELAN V.** Laser CO2 et Chirurgie Oculo-Plastique. *J. Fr. Ophtalmol.*, 1998;21;234-240.
- 2) **AQUINO, S.** Management of eyelid neoplasms in the dog and cat. *Clin Tech Small Anim Pract.* 2007;22;46-54.
- 3) **ARNAUD D.** La blépharoplastie inférieure par voie transconjonctivale au laser CO2. *Revue de Stomatologie et de Chirurgie Maxillo-Faciale*, 2003;4;31.
- 4) **ASSIA E.** Experimental studies on nonpenetrating filtration surgery using the CO2 laser. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2007;245;847-854.
- 5) **AUER JA, STICK JA.** *Equine surgery*, Saunders Elsevier, St. Louis, 2006.
- 6) **BAKER, S.** Carbon dioxide laser ptosis surgery combined with blepharoplasty. *Dermatologic Surgery*, 1995;21;1065-1070
- 7) **BALDASSARE L.** Thermal effects of Nd:YAG and CO2 lasers on biological tissues. *Boll Soc Ital Biol Sper*, 1982;58;320-326.
- 8) **BALOUKA, R.** Le laser en ophtalmologie perspectives thérapeutiques chez le chien et le chat. Th. Med. Vet. 1988 (011), 133p. Nantes.
- 9) **BANDIERAMONTE G.** Laser microsurgery for superficial T1-T2 basal cell carcinomas of the eyelid margins. *Ophthalmology* 1997;104:1179-84.
- 10) **BARTELS, K.** Lasers in medicine and surgery. *Vet Clin N Am*, 2002;32;special issue.
- 11) **BATTERBURY M.** *Ophtalmologie*. Elsevier Masson, Paris, 2005.
- 12) **BECKMANN H.** Carbon dioxide laser scleral dissection and filtering procedure for glaucoma. *Am J Ophthalmol.* 1979;88;73-77.
- 13) **BEN SIMON G.J.** Cosmetic Eyelid and Facial Surgery. *Surv Ophthalmol* 2008;53;426-442.
- 14) **BERGER N., EEG P.** *Veterinary Laser Surgery : A practical guide.*: Blackwell Publishing, Ames 2006
- 15) **BERGH A.** Effect of defocused CO2 laser on Equine tissue perfusion. *Acta Vet Scand*, 2006;47;33-42.

- 16) **BIESMAN, B.** Cutaneous facial resurfacing with the carbon dioxide laser. *Ophthalmic Surg Lasers*, 1996;27;685-698.
- 17) **BOHR, N.** On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 1913;26;1-25.
- 18) **BOJRAB, M.** *Laser Surgery*. Williams and Wilkins, Baltimore, 1998
- 19) **BOUHANNA L., FOUCHIER N.** Un cas de mélanome épibulbaire chez un chien. *Le Point Vétérinaire*, 2009;40;61-64.
- 20) **BOULNOIS J.** Photophysical processes in recent medical laser developments: A review. *Lasers in Medical Sciences*, 1986;1;601-619.
- 21) **BOULNOIS, J.** Physique du Laser. In: Collectif, *Le Laser : Principe et Techniques d'Applications*. Maillet H. Edition. Paris 1984
- 22) **BRUNETAUD J.M** Les applications thérapeutiques des Lasers. In: J. P. C. FABRE, *Les Lasers et leurs Applications Scientifiques et Médicales*, EDP Sciences 1996
- 23) **BRUNETAUD J.M.** Les Applications Thérapeutiques des Lasers. *Photoniques*, 2002;8;36-41.
- 24) **BUSSIERES M., KROHNE S. et al.** The Use of Carbon Dioxide Laser for the Ablation of Meibomian Gland Adenomas in Dogs. *J Am Anim Hosp Assoc*, 2005;41;227-234.
- 25) **BYRNE P.O.** Carbon dioxide laser irradiation of bacterial targets in vitro. *Journal of Hospital Infection*, 1987;9;265-273.
- 26) **CHAROSAY-BECART, D.** Les Urgences Ophtalmologiques chez le chien et le chat. Th. Med. Vet. 2003 (158), Toulouse.
- 27) **CHERUBINI, T.** Entropion and ectropion of the eyelid. *Clin Plast Surg*, 1978;5;583-91.
- 28) **CHIRON, J.** (2005). Utilisation du laser en ophtalmologie vétérinaire : étude bibliographique. Th. Med. Vet 2005 (047) Lyon.
- 29) **CHONG K.** Prospective randomized comparison between CO2 laser and surgical punctoplasties. *20th APAO Congress*, 2005;139;4.
- 30) **CIOBAN, M.** *La Sécurité Laser*. Rapport de Stage, Université de Bourgogne Faculté de sciences Mirande, Laboratoire de Physique, 2003

- 31) **CLERC, B.** *Ophthalmologie Vétérinaire 2e édition*. Editions du Point Vétérinaire, Maison-Alfort, 1997
- 32) **CODERE F.** Carbon dioxide laser treatment of the conjunctiva and the cornea. *Ophthalmology*,1988; 95;37-45.
- 33) **COLAHAN P.T.** *Equine Medicine and Surgery Vth Edition.*: Mosby Inc. Saint Louis 1999
- 34) **COSSMAN P.H.** Plastic hollow waveguides: properties and possibilities as a flexible radiation delivery system for CO2-laser radiation. *Lasers Surg Med.*,1995;16;66-75.
- 35) **DECOMPS, B.** Les applications médicales du laser. *Les Cahiers du MURS*, 22. Paris-Sorbonne, 1990
- 36) **DEVAUX, D.** Résultats de la photocoagulation au laser diode dans le traitement du glaucome chez le Chien. Th. Med. Vet 2005 (100).
- 37) **DOWNES, R.** Cosmetic Surgery 78-79 In: G. R. Richard Collin, *Plastic and Orbital Surgery*, BMJ Books, 2001
- 38) **DUCLOS, D.** Lasers in Veterinary Dermatology. *Vet Clin Small Anim*, 2006;36;15-37.
- 39) **DURANTE E.J.** Clinical and histological comparison of tissue damage and healing following incisions with the CO2-laser and stainless steel surgical blade in dogs. *J S Afr Vet Assoc*, 1993;64;116-120.
- 40) **EHRENBERGER K.** The effect of carbon dioxide laser on skin lymphatics. *Wien Klin Wochenschr*, 1978;90;307-309.
- 41) **EINSTEIN, A.** (1917). Quantentheorie der Strahlung. Dans *Mitteilungen der Physikalischen Gesellschaft* 1917;18,121
- 42) **ELFLEIN, H.** Laser and other treatment options in the therapy of infantile capillary. *Medical Laser Application*, 2010;215;242-249.
- 43) **ENGLISH R.**, Carbon dioxide laser ablation for treatment of limbal squamous cell carcinoma in horses. *J Am Vet Med Assoc*, 1990;196;439-442.
- 44) **FABRE C.** *Les Lasers et leurs applications scientifiques et médicales*. EDP Sciences, Paris, 2002
- 45) **FABRE, C.** Les Lasers : Principes Fondamentaux. In: *Les lasers et leurs Applications Scientifiques et Médicales* (pp. 1-39). EDP Sciences Paris 1996

- 46) **FINSTERBUSH A.** Healing and tensile strength of CO2 laser incisions and scalpel wounds in rabbits. *Plast Reconstr Surg*, 1982;70;360-2.
- 47) **FITZPATRICK R.E.** Guidelines of Care for laser surgery. *J Am Acad Dermatol*, 1999;41;484-495.
- 48) **FORBES, G.** Vascular lesions in the orbit. *Neuroimaging Clin N Am*, 1996;61;113-122.
- 49) **FORZANO, P. R.** Pathologies des Paupières. *Cours de Médecine DCEM 3* . Faculté de Médecine de Marseille, 2005
- 50) **FRY, T. B.** Laser Surgery. In: HARARI J., *Small Animals Surgery Secrets* Anley And Belfus Medical Publishers, Baltimore, 2004
- 51) **GELATT K.N.** *Small animal ophthalmic surgery: practical techniques for the veterinarian*. Elsevier Health Sciences, Edimburg 2001
- 52) **GELATT K.N.** *Veterinary ophthalmology*. 2ed., Blackwell, Ames 2007.
- 53) **GILGER, B.** *Equine Ophthalmology*. Saunders Elsevier, St Louis, 2005
- 54) **GILMOUR, M.** Laser applications for corneal disease. *Clin Tech Small Anim Pract.*, 2003;18;199-202.
- 55) **GILMOUR, M.** Lasers in ophthalmology. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 2002;32;649-672.
- 56) **GLASSBERG E.** Capillary hemangiomas: case study of a novel laser treatment and a review of therapeutic options. *J Dermatol Surg Oncol*, 1989;15;1214-23.
- 57) **GOLA, R.** *Chirurgie esthétique et fonctionnelle de la face*. Springer, Paris 2004
- 58) **GOLDBAUM A.M.** The CO2 Laser in Oculoplastic Surgery. *Surv Ophthalmol*, 1997;42;255-267.
- 59) **GOLDMAN M.P.** *Cutaneous laser surgery* (éd. 2e). Mosby Ed, London 1998
- 60) **GOLDMAN M. P.** *Cutaneous and Cosmetic Laser Surgery*. Mosby Ed, London, 2006
- 61) **GRIFFIN R.Y.** Treatment of the lower eyelid with the CO2 laser: transconjunctival or transcutaneous approach? *Orbit*, 2007;26;23-8.
- 62) **GUTHOFF R.** *Oculoplastics and Orbit*. Springer Éd. London, 2007
- 63) **HALHAL M.** Lymphangiome orbitaire : à props d'un cas. *J. Fr. Ophthalmol.*, 2001;24;175-179.

- 64) **HAWROT A.M.** Squamous Cell Carcinoma. *Curr Probl Dermatol*, 2003;15;91-133.
- 65) **HEILBRON, J.** *Planck, la révolution quantique.* (Vol. 27). Les Génies de la Science 2006
- 66) **HENDRIX, D.** Equine Ocular Squamous Cell Carcinoma. *Clin Tech Eq Pract*, 2005;4;87-94.
- 67) **HENRY M.** *Chirurgie clinique : Technique et Pratique.* Boeck Supérieur, Bruxelles, 2004
- 68) **IRWIN, J.** The economics of surgical laser technology in veterinary practice. *Vet Clin Small Anim* , 2002;32;549-567.
- 69) **JACOBSON A.S.** Emerging technology : Flexible Laser CO2 WaveGuide. *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2006;135;469-470.
- 70) **K.N.GELATT.** *Essentials of Veterinary Ophthalmology IIIrd Edition*, Williams and Wilkins Baltimore, 1999
- 71) **KANSKI, J.** *Précis d'Ophtalmologie Clinique.* Elsevier Masson, Paris, 2005
- 72) **KARIM A.** Chirurgie de l'entropion sénile : résultats d'une technique, à propos de 30 cas. *Journal Francais d'Ophtalmologie.*, 2009;32;1186.
- 73) **KAUVAR A.** Histopathological Comparison of "Char-Free" Carbon Dioxide Lasers. *Dermatologic Surgery*, 1996;22;343-348.
- 74) **KENNERDELL J.S.** Surgical management of orbital lymphangioma with the carbon dioxide laser. *Am J Ophthalmol*, 1986;102;308-314.
- 75) **KHARRAT W.** Kératose séborrhéique palpébrale: à propos d'une observation. *J. Fr. Ophtalmol.*, 2004;27;1146-1149.
- 76) **KING T.C.** Therapeutic management of ocular squamous cell carcinoma in horse : 43 cases (1979-1989). *Eq Vet J*, 1991;23;449-452.
- 77) **KING, W.** Laser Assisted Transconjunctival Lower Eyelid Blepharoplasty. *The Hong Kong Medical Diary*, 2010;15;15-16.
- 78) **KLINK T.** CO2, excimer and erbium:YAG laser in deep sclerectomy. *Ophthalmologica*, 2008;222;74-80.
- 79) **KORN E.L.** Carbon Dioxide Laser Repair of Medial Ectropion. *Ophthalm Surg*, 1988;9;653-7.

- 80) **KORN E.L.** Use of the carbon dioxide laser to remove an eyelid angioma. *Ophthalmic Surg.*, 1989;20;887-888.
- 81) **KORN E.** Laser chalazion removal. *Ophthalmic Surg.*, 1988;19;428-431.
- 82) **KRONBERGER C.** The veterinary technician's role in laser surgery. *Vet Clin Small Anim*, 2002;32;723-735.
- 83) **LESSNER A.M.** Laser Blepharoplasty. *Seminars in Ophthalmology*, 1998;13;90-102.
- 84) **LONGUEVILLE E.** Le ptosis dans tous ses états. *Réflexions Ophtalmologiques*, 2009;14;489-495.
- 85) **MARGO C.E.** Basal Cell Carcinoma of the Eyelid and Periocular Skin. *Surv Ophthalmol*, 1993;38;169-192.
- 86) **MEDAN S.** Formes Oculaires du Carcinome Epidermoïde Chez le Cheval. Th. Med. Vet, 2005, Toulouse.
- 87) **MEYER-RUSENBERG H-W.** CO₂-Laser in der Augenheilkunde. *Ophthalmologe*, 2000;97;194-196.
- 88) **MEYERS S.M.** Phototransection of vitreal membranes with the carbon dioxide laser in rabbits. *Ophthalmology*, 1983;90;563-568.
- 89) **MOLLIER, J.** *Le laser: principe et fonctionnement*. ENSAE, Éd. 2005, Toulouse.
- 90) **MULLARKY, M. N.** The efficacy of the CO₂ Laser in the sterilization of skin seeded with bacteria : survival at the skin surface and in the plume emissions. *Laryngoscope*, 1985;95;186-187.
- 91) **MUNKER, R.** Laser blepharoplasty and periorbital laser skin. *Facial Plast Surg*, 2001;17;209-17.
- 92) **NERAD J.A.** CO₂ Treatment of eyelid syringomas. *Ophthalmic. Plast. Reconstruct. Surg.*, 1988;4;91-94.
- 93) **OESTREICHER J.** Les complications de la Blépharoplastie. *Comptes rendus des conférences scientifiques du département d'ophtalmologie et des sciences de la vision, Université de médecine de Toronto*, 2005;3
- 94) **PALMER, S.** Instrumentation and techniques for carbon dioxide lasers in equine general surgery. *Vet Clin North Am Equine Pract*, 1996;2;397-414.
- 95) **PLUMMER, C.** Equine eyelid disease. *Current Technics of Equine Practice*, 2005;4;95-105.

- 96) **RAO B.K.** The relationship between basal épithélioma and seborrheic keratosis: a study of 60 cases. *J Dermatol Surg Oncol*, 1994;20;761-4.
- 97) **RAULIN C.** Xanthelasma palpebrarum: treatment with the ultrapulsed CO2 laser. *Lasers Surg Med*, 1999;24;122-7.
- 98) **REYNIER, F.** Intérêt d'un laser chirurgical en clientèle canine. Th. Med. Vet, 2010 (96). Maisons-Alfort.
- 99) **RINALDI F.** Laser: a reiew. *Clinics in Dermatology* , 2008;26;590-601.
- 100) **RIZZO L.B.** Histologic comparison of skin biopsy specimens collected by use of carbon dioxide or 810-nm diode lasers from dogs. *J Am Vet Med Assoc*, 2004;225;1562-6.
- 101) **ROBERTS, T.** Laser blepharoplasty and laser resurfacing of the periorbital area. *Clin Plast Surg*, 1998;25;95-108.
- 102) **ROBERTS, T.** Laser blepharoplasty and laser resurfacing of the periorbital area. *Clin Plast Surg*, 1998;25;95-108.
- 103) **ROCHA E.A.** Quantitative Evaluation of Intact Peripheral Nerve Structures after Utilization of CO2 Laser, Electrocautery, and Scalpel. *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery*, 2004;19.
- 104) **RODRIGUEZ R.A.** Multiple fibroepithelial basal cell carcinoma of pinkus associated with seborrheic keratosis in a naevoid distribution. *J Dermatol Surg Oncol*, 2000;27;341-5.
- 105) **ROHRICH R.J.** Xanthelasma palpebrarum: a review and current management principles. *Plast Reconstr Surg*, 2002;100;1310-4.
- 106) **ROOTMAN J,** Orbital-adnexal lymphangiomas: a spectrum of hemodynamically isolated hamartomas. *Ophthalmology*, 1986;93;1558.
- 107) **ROUSSEAU, T.** Contribution à l'étude du distichiasis chez le chien. Th. Med. Vet, 2005 (94). Toulouse.
- 108) **RUBAN J.M.** Le ptosis dans tous ses états - Examen clinique d'un ptosis. *Réflexions Ophthalmologiques*, 2009;14;479-485.
- 109) **SACHS M.E.** Treatment of recurrent squamous papillomattas of the conjunctiva by carbon dioxide laser vaporization. *Ophthalmology* 1986;93;1078-1082.

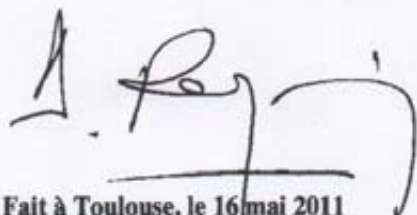
- 110) **SCHMIDT, B.** Comparison of full thickness skin graft "take" after excision with the carbon dioxide laser and scalpel. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 1997;83;206-214.
- 111) **SECKEL B.R.** Laser blepharoplasty with transconjunctival orbicularis muscle/septum tightening and periocular skin resurfacing: a safe and advantageous technique. *Plast Reconstr Surg*, 2000;106;1127-41.
- 112) **SILVERMAN E.B,** Histologic comparison of canine skin biopsies collected using monopolar electrosurgery, CO2 laser, radiowave radiosurgery, skin biopsy punch, and scalpel. *Vet Surg*, 2007;36;50-6.
- 113) **SPALTON D.J.** *Atlas d'ophtalmologie clinique*. Masson Éd. Paris 2005
- 114) **SPECTOR J.A.** Carbon Dioxide Laser Ablation for Treatment of lymphangioma of the conjunctiva. *Plastic and reconstructive surgery*, 2006;117;609-612.
- 115) **STERRY, W.** Guidelines: The management of basal cell carcinoma. *Eur J Dermatol* 2006;16;467-75.
- 116) **STUCKER F.J.** Cutaneous Laser Surgery in Cutaneous Otolaryngology-head and neck surgery. In : I. F. (IFOS) (Éd.), *International Congress Series*, 2003, 963-966).
- 117) **SULLINS, K.** Lasers and Wound Healing: Practical Uses. *Clin Tech Equine Pract*, 2004;3;182-187.
- 118) **THUAKSUBAN N** A comparative study of postoperative pain using carbon dioxide laser and scalpel in oral soft tissue surgery. *Thai J Oral Maxillofac Surg*, 2003;17;67-91.
- 119) **TREPS N.** *Le laser : 50 ans de découvertes*. EDP Sciences Les Ulis 2010
- 120) **VAN ZYL N.** Carbon Dioxide Laser Keratectomy as a Treatment Option for Equine Corneal Stromal Abscessation: A Comparison to Lamellar Keratectomy and Penetrating Keratoplasty. *J. Eq Vet. Sci.* , 2010;30;657-665.
- 121) **WESLEY, R.** Ectropion Repair. *Oculoplastic Surgery*, 1995;249-256.
- 122) **WHEELAND R.G.** Carbon dioxide laser vaporization and curettage in the treatment of large or multiple superficial basal cell carcinomas. *J Dermatol Surg Oncol*, 1987;13;119-125.

- 123) **WHEELAND, R.** History of Lasers in Dermatology . *Clinics in Dermatology* , 1995;13;3-20.
- 124) **WILDER-SMITH P.** Incision properties and thermal effects of three CO₂ lasers in soft tissues. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*, 1995;79;685-91.

AGREMENT SCIENTIFIQUE

En vue de l'obtention du permis d'imprimer de la thèse de doctorat vétérinaire

Je soussigné, *Alain REGNIER*, Enseignant-chercheur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse, directeur de thèse, certifie avoir examiné la thèse de *MASSET Mikaël* intitulé « **Le laser au CO² en ophtalmologie : perspectives d'utilisation chez l'animal** » et que cette dernière peut être imprimée en vue de sa soutenance.



Fait à Toulouse, le 16 mai 2011
Professeur **Alain REGNIER**
Enseignant chercheur
de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse



Vu :
Le Directeur de l'Ecole Nationale
Vétérinaire de Toulouse
Professeur **Alain MILON**



Vu :
Le Président du jury :
Professeur *Jean-Louis ARNE*

Vu et autorisation de l'impression :
Le Président de l'Université **MAI 2011**
Paul Sabatier
Professeur **Gilles FOURTANIER**



Conformément à l'Arrêté du 20 avril 2007, article 6, la soutenance de la thèse ne peut être autorisée qu'après validation de l'année d'approfondissement.

Toulouse, 2011

NOM : MASSET

Prénom : Mikaël

TITRE : Le laser CO₂ en ophtalmologie : Perspectives d'utilisation chez l'animal.

RESUME : Créé par Patel en 1964, le laser au dioxyde de carbone émet un rayonnement d'une longueur d'onde de 10,6 µm, qui est très fortement absorbée par l'eau des tissus vivants. Cette propriété en fait un outil chirurgical de choix comme instrument de section et de vaporisation. Il a été et reste employé chez l'Homme dans de nombreuses interventions concernant l'œil et ses annexes. Après avoir rappelé le principe de fonctionnement des lasers et leurs effets sur les tissus, les différentes applications existantes en ophtalmologie humaine sont exposées. On peut dégager de ces applications et de la littérature vétérinaire actuelle un ensemble des interventions réalisables avec le laser CO₂ sur l'œil et les annexes oculaires des animaux, organisé selon les structures anatomiques concernées.

MOTS-CLES : laser CO₂, chirurgie, œil, paupières, photo-section, photo-ablation.

ENGLISH TITLE: CO₂ laser in ophthalmology: Prospective uses in animals.

SUMMARY: Carbon dioxide laser was first created by Patel in 1964. This laser emits a 10.6µm wave-length beam, which is particularly absorbed by the water contained in each living tissues. This property has led to its wide use as a choice surgical instrument for section and vaporization. It has been and is still used in human beings in various procedures concerning the eye and ocular adnexa. After having reminded the operating principles of lasers and their effects on biological tissues, the different uses in human ophthalmology are exposed. Then a set of CO₂ laser feasible procedures in animals' eye and adnexa is brought out from human applications and current veterinary literature.

KEYWORDS: CO₂ laser, surgery, eye, eyelid, photo-section, photo-ablation