EFFET DE L'IRRADIATION LASER À CO₂ SUR LA DENTINE DES DENTS HUMAINES**G.G.Y. MARCON et B. VIDAL***Laboratoire de Thermodynamique et Physico-Chimie Métallurgiques, E.N.S.E.E.G.,
Domaine Universitaire, BP. 75, F-38402 Saint-Martin-d'Hères cedex, France*

Abstract. The objective of this study was to determine the influence of single and multiple impacts of CO₂ laser on dentine in recently extracted human teeth.

It has been shown that laser irradiation of dentine may produce deep craters, the dimensions of which are determined by the power and duration of the laser beam. The formation of the craters is accompanied by the development of microfissures in the dentine and heat-affected zones in which compositional and phase changes are observed. Other structural changes in the dentine, such as enhancement of hardness and blocking of the tubules in the irradiated zone, have been detected.

1.- Introduction

La plupart des études antérieures destinées aux applications dentaires des lasers ont principalement concerné l'effet stérilisant de ceux-ci (1,2) et la réparation dentino-pulpaire (3,4,5). Les effets thermiques en résultant seront différents s'il s'agit de l'émail (tissu dur) (6,7) ou de la dentine (tissu semi-dur hydraté) (3,8,9,10,11,12). Tous les auteurs sont d'accord pour noter la formation de cratères d'où partent de nombreuses fissures. Il a été ainsi mis en évidence la formation, autour des cratères, de zones très distinctes: une zone fondue et une zone affectée thermiquement (3,8,9).

Dans cet article, l'effet thermique d'un faisceau laser à CO₂ sur la dentine des dents humaines est décrit. Nous avons étudié les cas d'impacts isolés et multiples. Nous avons ainsi montré qu'il y a création de cratères dont la profondeur et le volume augmentent avec la puissance et le temps d'exposition. Il y a apparition autour des cratères ainsi formés de trois zones très différentes avec développement de microfissures se prolongeant dans la dentine non irradiée. L'épaisseur de ces zones ainsi que le nombre et l'intensité des fissures dépendent étroitement des paramètres du laser.

L'objectif de l'étude est de déterminer avec précision les transformations physico-chimiques de la dentine de dents humaines en caractérisant les phases résultant de la transformation de l'hydroxyapatite dentinaire (zones affectées, zones cristallines, composition) puis d'étudier le phénomène d'obturation des tubulis proches de l'impact. Dans ce but, une étude in vitro pour différentes puissances et temps d'impact est réalisée.

2.-. Matériaux et méthodes

L'étude a concerné la dentine de dents humaines (le plus souvent de type molaire) récemment extraites par deux praticiens grenoblois (Drs J.P. BRUN et P.B. TARDIEU) puis conservées dans un liquide physiologique. Une fois extraites les dents sont tronçonnées suivant un plan perpendiculaire à leur axe de manière à enlever la partie supérieure. Dans une deuxième étape, la dentine ainsi mise à nue subit un ou plusieurs impacts laser. Le laser utilisé est un laser à CO₂ commercialisé par LASER INDUSTRY de type SHARPLAN 10-20, la puissance peut varier de 0 à 20 W, la distance focale est de 125 mm. Les méthodes d'investigation utilisées sont : la microscopie optique, la microscopie électronique à balayage, la diffraction par rayons X, l'analyse par microsonde de Castaing et la mesure de dureté (Knoop).

3.-. Résultats**3 - 1 Impacts uniques.**

L'effet constaté de la radiation laser sur la dentine est la création d'un cratère conique dont le diamètre et la profondeur dépendent étroitement de la puissance et du temps d'impact. On peut observer la création de trois zones distinctes dont la couleur et la structure sont très différentes (Figure 1). On note :

a - zone blanche en surface du cratère (zone fondue ZF).

b - zone noire (zone carbonée ZC) en sub-surface.

c - zone affectée thermiquement (zone dénaturée ZD) qui apparaît nettement plus blanche que la dentine non affectée.

Fig. 1 : Microscopie optique
p=15w, t=0,05s G=86

Fig. 2 Microscopie scanning
P=15w, t=0,05s, G=50

Fig.3 Schématisation des zones
observées sur la Fig. 2

L'aspect général d'un cratère vu en coupe suivant un plan passant par l'axe du faisceau est présenté sur la figure 2, le schéma de la figure 3 reproduit les différentes zones observées.

3-2. Les différentes zones

La zone fondue (ZF) :

En surface du cratère existe une zone résultant de la solification après fusion de l'hydroxyapatite, vaporisation de l'eau et volatilisation des composés organiques de la dentine. Cette zone fondue présente un aspect lisse en haut du cratère alors qu'elle est plus rare et plus tourmentée au fond. L'hydroxyapatite fondant sous l'impact laser a été refoulé vers le haut par les gaz résultants de la décomposition des composés organiques et de la vapeur d'eau, par contre à partir du milieu du cratère cette dernière a coulé le long de la paroi pour se solidifier au fond (Fig. 4A et 4B).

Fig.4 Microscopie électronique à balayage : bord d'un cratère. A : P=10w, t=0,05s, G=300; B : P=5w, t=0,05s, G=2000

Cette zone, profondément modifiée par rapport à la structure dentinaire est partiellement fondue au cours de l'impact. Comme on peut le constater sur la figure 5, elle repose sur la zone carbonée ZC sans aucune transition et n'est pas solidaire de la trame structurale de la dentine. On peut aussi noter que les tubulis en sont absents alors qu'ils sont toujours présents dans les autres zones.

Fig.5 : Microscopie optique. Les différentes zones
P=15w, t=0,05s, G=450

On peut observer, en surface de la ZF, de nombreux micropores débouchants, ainsi que, surtout dans le cas des faibles puissances, des cristaux de 30 à 40 μm de long qui témoignent d'un caractère partiellement cristallisé de la ZF. Il semble en fait que de tels cristaux cohabitent localement avec une matrice amorphe. On ne peut pas déterminer de règles générales de solification. Nous pouvons dire par contre que les zones de surface de la ZF apparaissant recristallisées sont situées dans le cas des plus fortes puissances dans la partie supérieure de la zone fondue. Dans tous les cas, nous observons au fond du cratère des formes en gouttes solidifiées d'aspect amorphe. En coupe la ZF apparaît constituée d'un ensemble de fines porosités orientées, permettant au gaz provenant de la zone affectée thermiquement de s'échapper. Ceci explique la microporosité de surface. Il semble par ailleurs que ces conduits se créent entre des sortes de bâtonnets plus ou moins parallèles entre eux et perpen-

diculaires à la surface du cratère. Ces batonnets de diamètre $1\mu\text{m}$ et de longueur égale à l'épaisseur de la ZF semblent être de même nature que ceux observés en surface du cratère dans le cas des faibles puissances. Ce phénomène semble déjà avoir été observé par Melcer (3) qui a évoqué un tel alignement pour des puissances élevées. Cette croissance cristalline se fait perpendiculairement aux différentes isothermes découlant de la propagation thermique dans la dentine par un mécanisme analogue, semble-t-il, à la croissance colonnaire.

La zone affectée thermiquement (ZC + ZD) :

La distinction entre les deux zones n'apparaît pas nettement au M.E.B., mais on peut dire qu'elles sont constituées de dentine affectée thermiquement. En effet, contrairement à la zone précédente qui apparaissait complètement remaniée, celles-ci conservent la structure de la dentine. La transition entre la zone fondue et la zone carbonée est d'ailleurs très brusque. Comme on peut le constater sur la Fig. 5, la ZC est dans la plupart des cas parcourue par des porosités orientées qui ont probablement servi à évacuer les gaz et les vapeurs résultants des effets thermiques ($\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$). Par contre, la transition entre la ZC et la ZD est très progressive. Au moyen d'un microscope stéréoscopique, on observe souvent une zone brune entre les deux qui semble constituer une zone de transition.

Fig. 6 : Tubulis de la dentine non affectée thermiquement. 5w-0.05s.

Fig. 7 : Même dent, tubulis correspondants dans la ZAT. 5w-0.05s.

Quant aux tubulis dentinaires, ils semblent être bouchés sur toute la longueur de la zone affectée, c'est à dire approximativement sur 70 micron après la zone fondue. Ce phénomène a été observé dans près de 70% des cas. La différence avec la dentine normale est le plus souvent remarquablement nette sur un même échantillon, cette réaction ne peut avoir été provoquée que par les effets thermiques du laser. Ceci a été mis en évidence quelque soit l'orientation des tubulis par rapport à la surface étudiée, mais le phénomène est particulièrement net lorsque les tubulis débouchent perpendiculairement à la section d'observation (voir figures 6 et 7).

Dans 30 % des cas où nous n'avons pu conclure que les tubulis étaient bouchés ont été constitués par des échantillons où les tubulis étaient de taille très faible, difficilement discernables, ou bien leur ouverture était si faible qu'ils semblaient bouchés même dans la dentine normale. Après polissage, ils apparaissent toujours en relief par rapport à la surface de la dentine. Nous constatons que c'est la zone dénaturée qui est creusée lors du polissage, entre les tubulis, et c'est pour cela qu'ils sont en relief. Ceci apparaissant dans tous les cas, nous pouvons conclure que la dentine intertubulaire est affaiblie par rapport à la dentine normale dans une grande partie de la ZD. Ceci n'apparaît pas dans la ZC et encore moins dans la ZF.

Il est à noter que des tubulis sont souvent ouverts dans la partie de la zone carbonée juste sous-jacente à la ZF. Ceci apparaît lorsqu'ils débouchent à la surface de la dentine traitée et donc permettent d'évacuer les gaz résultants des effets thermiques. De plus, nous avons observé que la zone fondue est dans tous les cas parcourue par quelques microfissures perpendiculaires à la surface et qui se prolongent dans la zone carbonée sous-jacente (Fig. 2). Entre la ZC et la ZD ainsi que dans la ZD, ces microfissures peuvent se propager de façon circulaire autour du cratère. Celles-ci toujours présentes (Fig.5), provoquent une fragilité et une décohésion entre la zone carbonée ZC et la ZD. Nous observons par ailleurs dans tous les cas des microfissures importantes en fond de cratère qui se prolongent à l'intérieur de la dent dans l'axe du faisceau (Fig. 2).

3-3 Plusieurs impacts

Fig. 8 : Plusieurs impacts, P=5w, t=0.05s

Pour ce type de traitement, nous observons une zone affectée thermiquement très importante, surtout entre deux cratères (Fig. 8). Ceci est probablement dû au recouvrement des deux domaines de propagation thermique. De plus, on observe un grand nombre de microfissures allant d'un cratère à l'autre même avec des puissances relativement faibles (5w pendant 0.05s pour la Fig.8). Plusieurs passages amplifient ce phénomène.

3-4 Influence de la puissance

Plus la puissance est importante, plus le volume de dentine volatilisé (cratère) l'est. De plus, si nous nous plaçons à une hauteur relative identique dans le cratère quelque soit le traitement laser, on constate que l'épaisseur de la ZF augmente avec la puissance. Par contre, les ZC et ZD ont approximativement la même valeur (voir tableau 1)

Tableau 1 : Epaisseurs moyennes des différentes zones et volume des cratères pour différentes puissances du laser.

P puissance en watts t=0,05 s	d diamètre en µm	h hauteur en µm	v volume en cm ³	ZC mesurée en µm	ZD mesurée en µm
20	580 +20 -30	750 +45 -30	6,6.10 ⁻⁵ +0,9.10 ⁻⁵ -0,9.10 ⁻⁵	43,6 +2,9 -8,6	34,1 +6,4 -5,1
15	453 +37 -33	700 +15 -30	3,8.10 ⁻⁵ +0,7.10 ⁻⁵ -0,7.10 ⁻⁵	37,9 +8,6 -2,9	43,6 +2,9 -8,6
10	489 +41 -34	480 +25 -20	3.10 ⁻⁵ +0,7.10 ⁻⁵ -0,5.10 ⁻⁵	40,7 +5,8 -5,7	35
5	398 +22 -18	300 +20 -10	1,2.10 ⁻⁵ +0,3.10 ⁻⁵ -0,1.10 ⁻⁵	44,5 +2 -4	33 +2 -4

Nous avons observé par ailleurs que la puissance a une influence sur les fissures en fond de cratère, qui ont tendance à disparaître pour 5w. Par contre les microfissures circulaires sont toujours présentes, ainsi que celles de la zone fondue. Si on diminue la puissance, on diminue en fait l'ampleur des dommages dans la dentine non affectée.

3-5 Analyses par diffraction aux rayons-X.

Nous avons analysé la dentine non traitée, l'émail non traité et nous avons prélevé par grattage sur une trentaine de dents traitées une quantité suffisante de ZF+ZC afin de l'analyser par rayons X. Nous avons étudié ici la partie de la dent que les cliniciens enlèvent lors du décapage. En effet, il n'a pas été possible d'isoler une quantité suffisante de ZF. Nous avons donc été contraints d'analyser ensemble la zone fondue ZF et la zone carbonée ZC. Les résultats mettent en évidence, après identification par les fiches ASTM, une structure cristallographique hexagonale de type hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$) pour ces zones. Nous avons ainsi vérifié que cette structure cristalline est rigoureusement de même nature que celle de l'émail ou de la dentine.

3-6 Analyses à la microsonde de Castaing.

Cette analyse nous permet d'identifier localement les éléments présents. Par contre, l'état de surface des l'échantillons (bien que poli et parfaitement plan recèle de nombreuses microfissures et irrégularités dues aux tubulis), ainsi que la présence d'eau et de composés organiques, ne permet pas une analyse quantitative précise.

Fig. 9 : ligne d'étude entre deux cratères (5w-0.05s)

La Fig. 9 indique la ligne d'analyse entre deux cratères. La ligne qui apparaît sur cette micrographie est due au faisceau d'électrons qui contamine thermiquement la surface de l'échantillon. Nous pouvons par ailleurs remarquer que les zones affectées sont très peu contaminées ceci indique une plus grande résistance à la chaleur. La zone la plus résistante est la zone fondue ZF, et la moins résistante est la zone dénaturée ZD. Ceci est normal puisque ce sont des zones qui ont déjà subi une action thermique. Si nous suivons la ligne allant de la dentine vers le cratère de gauche, nous constatons qu'il y a une augmentation progressive de la teneur en Ca et P quand on passe de la dentine non traitée à la zone affectée thermiquement. Cette augmentation est plus brutale entre la zone carbonée ZC et la zone fondue. On aura une augmentation moyenne totale de Ca de + 7%, entre la ZF et la dentine normale (cette augmentation peut atteindre 15 à 20%

pour certains échantillons). Quant au magnésium, sa teneur diminue dans la ZD puis augmente ensuite à son niveau normal dans la ZC. Elle est ensuite supérieure dans la ZF. L'oxygène, quant à lui, suit le comportement du calcium et du phosphore. Ce comportement est constaté pour chaque échantillon, il est à rapprocher d'un résultat de Kantola (13) qui a mis en évidence une augmentation moyenne par rapport à la dentine non traitée de : + 15 % en Ca et 20 % en P dans la ZF+7 % en Ca et 6 % en P dans ce qu'il définissait comme une ZAT.

Ces valeurs sont plus importantes que les nôtres, mais il a utilisé des densités d'énergie supérieures, ce qui a probablement amplifié le phénomène. En effet, il semble qu'il y ait une influence de la puissance sur les variations de composition : l'augmentation en Ca, en P mais aussi en O atteint son maximum entre la ZF et la dentine non traitée pour des puissances de 20w. L'augmentation décroît ensuite pour atteindre son minimum avec des puissances de 5w.

De façon analogue à l'étude par microsonde, nous avons mesuré la dureté le long de lignes perpendiculaires à la paroi des cratères. Un exemple d'évolution de la dureté est donné figure 10. Pour cet exemple, les mesures sont faites perpendiculairement à l'axe du cratère, on peut noter les différentes zones.

Fig. 10 : Evolution de la dureté (poids 10g) dans une section perpendiculaire à l'axe du cratère, 20 W, 0.05s.

4.-Conclusion

Les effets du laser à CO₂ sur la dentine sont donc les suivants :

- création d'un cratère dont le volume croît avec la puissance pour t fixé. Il apparaît des microfissures au fond de celui-ci qui tendent à disparaître pour P ≤ 5w.
- apparition d'une zone fondue de couleur blanche en surface de ce cratère. Elle est atubulaire, a l'aspect d'un matériau fondu puis recristallisé partiellement (existence de bâtonnets d'hydroxyapatite parallèles entre eux surtout pour les puissances élevées), ou amorphe. Elle est plus riche en Ca, P et O que la dentine normale, dépourvue d'eau et de composés organiques, et est semblable à l'émail ou l'apatite de synthèse (dureté, minéralisation, composition, structure). Cette ressemblance est accentuée avec la puissance du faisceau. Par contre, cette zone est parcourue, quelque soit la puissance, par des microfissures, qui pour la majeure partie des traitements appliqués se prolongent dans la dentine perpendiculairement au cratère.
- apparition d'une zone carbonée (noire, épaisseur 40 µm ne dépendant pas de la puissance) juste en dessous, d'un moindre degré de minéralisation, et moins riche qu'elle en Ca et P par rapport à la dentine normale. La jonction est brusque avec la ZF, sa morphologie est celle de la dentine, bien que sa dureté soit supérieure.
- création d'une zone dénaturée opaque d'épaisseur 35 µm, indépendante de la puissance. La transition avec la zone précédente est très progressive. Les tubulis apparaissent bouchés dans ces deux zones qui constituent la zone affectée thermiquement. Par ailleurs, on observe de nombreuses microfissures circulaires à leur jonction, surtout dans la ZD qui semble affaiblie localement par rapport à la dentine normale. Celles-ci sont rares pour les faibles puissances.

On constate tout d'abord que la ZF a une dureté proche de celle de l'émail (l'émail a une dureté de 200 à 320 alors que la ZF a une dureté de 250 à 300). Celle-ci diminue rapidement dans la ZC tout en restant nettement supérieure à la normale (dureté de la dentine: 50 à 100 H.V.). Il est à noter que la dureté de la dentine varie considérablement d'une dent à l'autre. Ceci est probablement dû à la localisation variable de l'impact, à la plus ou moins bonne hydratation de la dent, mais aussi à son âge et sa nature. En général, le début de la ZD (qui correspondant souvent à la zone de transition avec la ZC) est renforcée, mais ensuite il semblerait que sur beaucoup de dents existe une zone fragilisée. Cette partie de la ZD correspond à la zone de propagation des fissures circulaires ainsi qu'à la zone de dentine intertubulaire affaiblie. On note aussi, ce qui rejoint les observations de Melcer (3), que la dureté de la zone fondue augmente avec la puissance. Par contre la dureté de la ZAT(ZC+ZD) reste inchangée.

- (1) MELCER J. et Coll. : Etude préliminaire des effets stérilisants du laser à CO₂ et des applications en chirurgie apicale sur les dents du chien Beagle, *Innov.Tech.Biol.Med.* 1986, Vol. 7, N° 2, PP. 237-243.
- (2) BONIN Ph. et Coll. : Appréciation de l'activité antibactérienne d'un laser à gaz carbonique sur un tissu dentinaire pathologique, *L.Q.O.S.*, 1986, II, N° 43, pp. 295-300.
- (3) MELCER J. : Utilisation du laser en odontologie, étude des effets thermiques du laser à CO₂ sur la dentine et sur la pulpe du chien Beagle et du singe Macaca mulata et Fascicularis, Thèse de doctorat d'état en odontologie, Paris V, 1985.
- (4) MELCER J. et Coll. : Treatment of dental decay by CO₂ laser beam, preliminary results, *Lasers in Surgery and Medicine* 4, 311-321, 1984.
- (5) STERN R., VAHL J., SOGNAES F., Lased Enamel : Ultrastructural Observations of pulsed Carbon Dioxide Laser Effects, *J.Dent.Res.*, mars-avril 1972, Vol. 51, N° 2, 445-460.
- (6) MERARD R. : Laser en odontologie-Evolution du champ thermique dans les tissus dentaires sous flux laser à CO₂, *Information Dentaire* N°22, 1982, pp: 2153-2157.
- (7) LOBENE R.R., FINE S. : Interaction of carbon Dioxide Laser Radiationb with Enamel and Dentin, *J.Dent.Res.*, mars-avril 1968, pp. 311-317.
- (8) LHUISSET F. : Effets d'impacts de laser CO₂ sur les dents, observations au microscope à balayage, *Ligament* 136, 2e trimestre 1980, pp. 103_105.
- (9) LHUISSET F. : Notes à propos d'impacts de laser à gaz carbonique sur la dentine, *Le chirurgien dentiste de France*, 13 sept. 1979, N° 31, pp. 37-38.
- (10) VAHL J. : Electron microscopical and x-ray crystallographic investigations of teeth exposed to laser rays, *Caries.Res.*, 2, 10-18, 1968.
- (11) KANTOLA S., SCHEININ A. : Laser induced effects on tooth structure; I Crater production with CO₂ laser; II Microradiography and polarized light microscopy of dental enamel and dentine, *Acta Odont.Scand.*, sept. 1968.
- (12) GLOVER-BONDEAU : Contribution à une étude in vitro sur la dissolution acide de la dentine exposée au rayonnement laser à CO₂, Thèse 2e cycle, Université R. Descartes, 1983.
- (13) KANTOLAS. : Laser induced effects on tooth structure. IV . A study of changes in the calcium and phosphorus contents in dentine by electron probe microanalysis. *Acta Odont.Scand.*, 30, juin 1972.