



Revue partenaire de la Société Française d'Endodontie et de l'Association Belge d'Endodontie et de Traumatologie

Activation sonore et ultrasonore
F. Bronnec 165

Cone beam en traumatologie dentaire
M. Tsukiboshi 173

L'endodontie préventive
L. van der Sluis et coll. 196

QUINTESSENCE

ENDO 3/17

REVUE FRANCOPHONE D'ENDODONTIE

 QUINTESSENCE PUBLISHING

VOLUME 1 / NUMÉRO 3 / JUILLET 2017

Quintessence International décline toute responsabilité quant à la qualité du présent document s'il est imprimé par un tiers.



ACTIVATION SONIQUE ET ULTRASONORE DES SOLUTIONS D'IRRIGATION LORS DU NETTOYAGE ET DE LA DÉSINFECTION CANALAIRE



irrigation finale
activation
ultrasons
instrument sonique
courants acoustiques
cavitation
débris



François Bronnec
Dominique Martin

Exercice libéral, Paris, France.



FRANÇOIS BRONNEC

Ancien Interne en Odontologie ;
Ancien Assistant
Hospitalo-Universitaire ;
Master es Sciences.

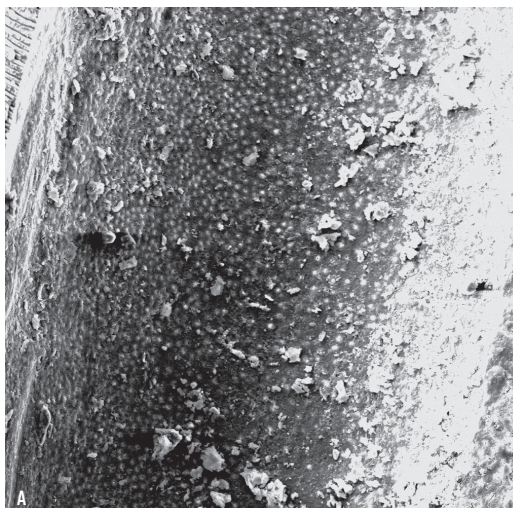
21, rue fabre d'Églantine
75012 Paris

@ bronnec.endo@gmail.com

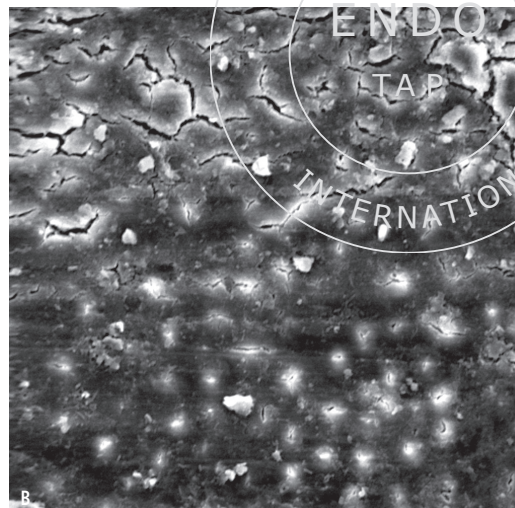
Si les moyens thérapeutiques actuels permettent d'atteindre des résultats cliniques très élevés en termes de taux de succès¹ et de survie², force est de constater qu'ils sont imparfaits lorsqu'il s'agit d'évaluer la qualité du nettoyage ou de la désinfection, et qu'un certain nombre d'échecs peuvent trouver leur explication dans cette insuffisance³. La complexité du système canalaire est un fait bien établi depuis les travaux de Hess : nos difficultés à la gérer s'illustrent par l'ensemble des études récentes qui montrent la persistance de débris dans la zone apicale⁴ (**1A ET B**), voire leur accumulation dans les irrégularités du réseau après instrumentation mécanique du canal principal mis en forme⁵. L'essentiel de la recherche concernant la préparation canalaire porte actuellement sur la possibilité d'améliorer l'efficacité des solutions d'irrigation par des moyens d'activation physique, qu'ils soient soniques, ultrasonores ou faisant appel au laser. Cet article traitera exclusivement des deux premiers, étant les plus répandus et faisant l'objet d'une littérature exhaustive.

HISTORIQUE

L'utilisation de limes canalaire soniques et ultrasoniques remonte aux années 1980, avec les premières tentatives de mise en forme canalaire assistée (et non plus seulement manuelle). Il s'agissait à l'époque d'instruments actifs montés sur des pièces à main (MM3000 Endo Air Sonic et Shapers, pour les dispositifs soniques ; CaviEndo et limes K ou diamantées, pour les dispositifs ultrasoniques). En parallèle du développement d'instruments soniques destinés strictement à la mise en forme est apparu le concept endosonore d'irrigation,



1A Accumulation de débris épars à la surface du canal après instrumentation (reproduit avec la permission du Dr Grégory Caron).



1B Aspect en microscopie électronique à balayage de la couche de boue dentinaire recouvrant le tiers apical d'un canal à la fin de la mise en forme (reproduit avec la permission du Dr Grégory Caron).

qui combine l'effet chimique de l'hypochlorite et sa potentialisation par les ondes ultrasonores, à l'effet d'abrasion dentinaire des limes utilisées en appui sur les parois⁶. Le principal inconvénient de ces systèmes était l'absence de conformation de l'élargissement obtenu à l'anatomie canalaire originelle, avec comme corolaire la création d'altérations de la trajectoire du canal préparé, sous forme de butées, en particulier dans la zone apicale.

L'hypothèse même d'une cavitation au sein de la solution d'irrigation était alors réfutée par les travaux d'Ahmad⁷, qui montraient que, pour que cela se produise, il aurait été nécessaire que la lime puisse osciller librement dans un canal suffisamment élargi⁸. Ce constat marque la fin de ces dispositifs de préparation ultrasonores, mais le début des recherches sur l'activation ultrasonore des solutions d'irrigation⁹.

LES DISPOSITIFS D'ACTIVATION ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

L'oscillation d'un insert sonique ou ultrasonore est définie par sa fréquence et son amplitude et est responsable du déplacement d'une onde acoustique au sein du fluide contenu dans le canal. On distingue les dispositifs générateurs en fonction de la fréquence de vibration transmise à l'insert (sonique, de 20 Hz à 20 kHz ; ultrasonique, > 20 kHz) et du type d'oscillation de l'insert : lors de leur activation, les inserts ultrasonores (tel que l'IrriSafe, Acteon-Satelec) présentent une série de nœuds et d'antinœuds,

entraînant une déformation ondulatoire de la lime dans un seul plan de l'espace **(2)**, alors que l'insert sonique (tel que l'EndoActivator, Dentsply) présente un nœud au niveau du système d'attache et un antinœud unique à son extrémité libre, donnant un mouvement elliptique à l'insert **(3)**.

Dans l'application considérée (activation sonique ou ultrasonore), ce sont les caractéristiques du déplacement de l'insert (fréquence et amplitude, cette dernière étant reliée à la puissance du générateur¹⁰ et à la géométrie de l'insert) au sein du fluide (ici une solution d'irrigation, liquide impur, plus ou moins dégazée et de viscosité variable) dans un environnement confiné (canal plus ou moins large, plus ou moins rectiligne) qui vont déterminer le type de phénomènes observés : la cavitation et les courants acoustiques.

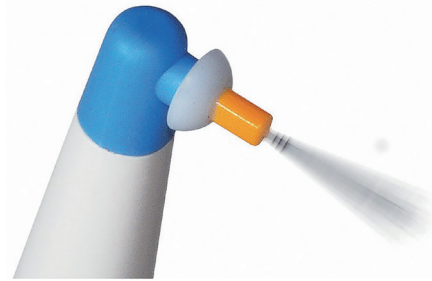
PHÉNOMÈNES DE CAVITATION ET COURANTS ACOUSTIQUES

L'hypothèse de l'agitation du liquide sous la forme d'un courant acoustique (écoulement dirigé) est avancée lors de l'utilisation des inserts soniques et ultrasonores : son origine est la dissipation de l'énergie de l'onde acoustique du fait de la viscosité du liquide.

Si la célérité de l'onde acoustique est constante dans un milieu de propagation donnée, son amplitude va diminuer par amortissement avec le temps et la distance. L'intensité de ces courants est proportionnelle à la fréquence



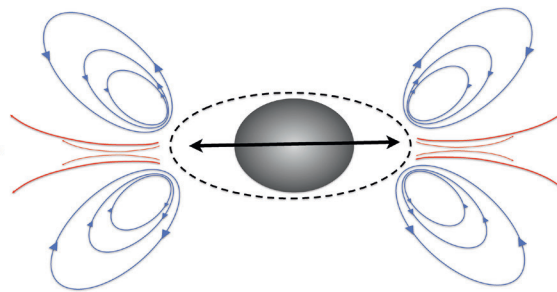
2 Insert ultrasonore IrriSafe (Acteon-Satelec).



3 Dispositif d'activation sonore EndoActivator (Dentsply-Sirona).

écoulement oscillatoire

écoulement stable



4 Représentation schématique des courants acoustiques générés par l'oscillation transversale d'une lime ultrasonore (en rouge, le jet ; en bleu, les vortex).

et à l'amplitude de déplacement de l'insert, et inversement proportionnelle à la section de l'insert et à la distance.

Du fait des caractéristiques des dispositifs soniques (notamment l'amplitude supérieure à la section canalaire), il est théoriquement impossible de créer un courant acoustique dans l'environnement confiné d'un canal radiculaire. Les mouvements liquidiens observés correspondraient donc à un simple brassage de la solution du fait de la trajectoire elliptique de l'insert.

À contrario, les caractéristiques des dispositifs ultrasonores permettent théoriquement (et cela se vérifie expérimentalement) de générer des courants acoustiques, y compris dans un environnement confiné. Les oscillations de l'insert au sein du fluide génèrent un déplacement du fluide selon deux modalités : un écoulement stable de la solution dans la direction de l'oscillation (jet) et la formation d'un écoulement de convection circulaire (vortex) latéralement¹¹ (4).

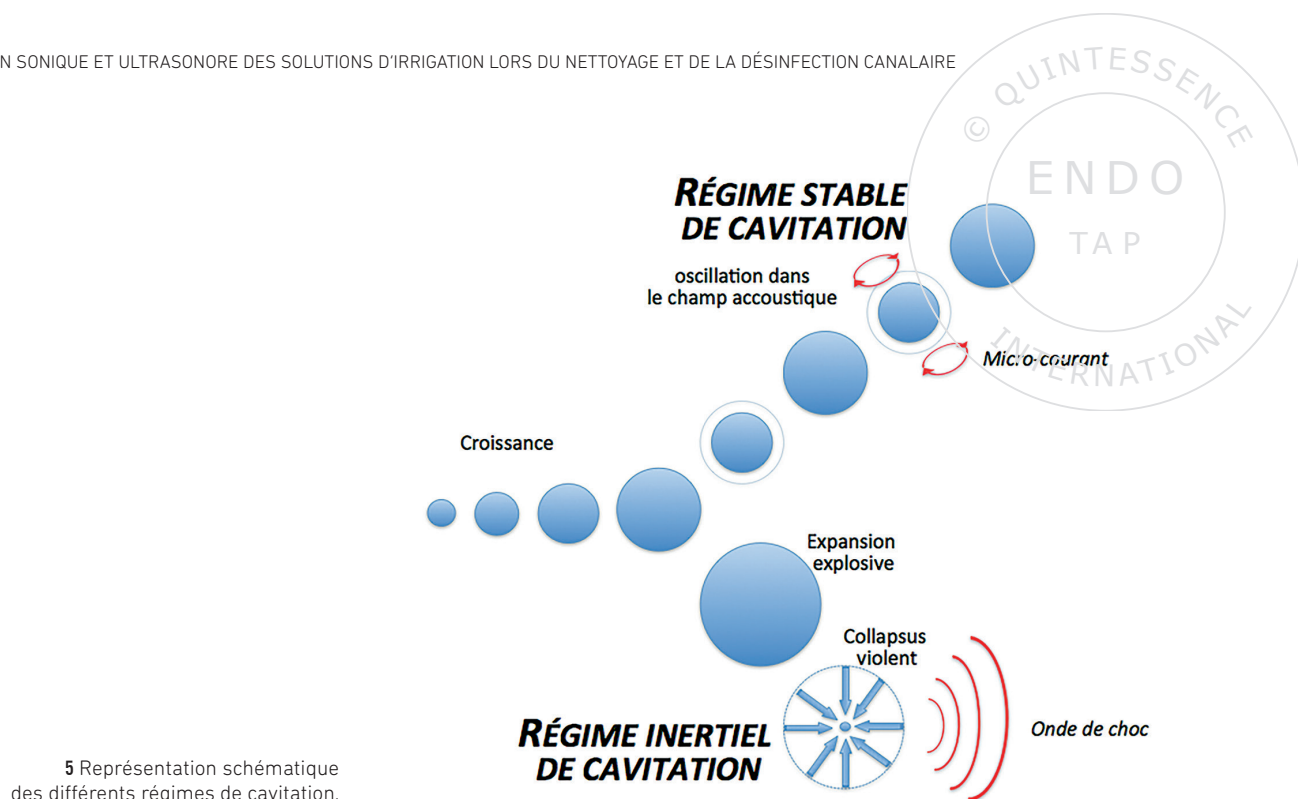
On appelle « cavitation » la formation et l'oscillation d'une bulle de gaz dans un liquide soumis à une dépression. Si cette dépression est suffisamment élevée, la pression dans le liquide peut devenir inférieure à la pression de vapeur saturante, et une bulle de vapeur est susceptible de se former.

Le phénomène de cavitation hydrodynamique peut être observé lorsque la vitesse de déplacement d'un corps solide dans un liquide est suffisamment élevée pour créer une zone de

dépression en arrière du solide avec apparition de bulles. Dans un liquide pur (dégazé, comme l'eau), il faudrait atteindre des vitesses de déplacement de l'ordre de 14 m/s pour observer le phénomène¹².

La vitesse des dispositifs d'activation sonore disponibles étant dix fois inférieure au seuil nécessaire, il est extrêmement peu probable (même dans une solution d'hypochlorite de sodium) que la cavitation hydrodynamique puisse être observable avec l'EndoActivator¹³, contrairement à ce qu'avance son concepteur¹⁴.

Une onde acoustique est une onde mécanique progressive : elle induit une perturbation mécanique du milieu (de type compression-étirement) par la succession périodique de surpression et de dépression. Pour que la cavitation acoustique ait lieu, un seuil de puissance doit être atteint. Ce seuil est variable en fonction des caractéristiques physiques du fluide. Dans le cas d'un liquide pur, avec peu de gaz dissous, comme l'eau, il est possible, à des fréquences ultrasonores, dès 20 kHz, pour une intensité (puissance) de l'ordre de 10 Watt/cm², d'atteindre des valeurs élevées de pressions négatives et d'étirer le fluide jusqu'à observer la formation de bulles de cavitation. L'amplitude de la dépression à fournir pour permettre d'atteindre ce seuil de cavitation dépend également de la viscosité du milieu (donc de la cohésion interne du fluide) : plus elle est élevée, plus la cavitation est difficile à obtenir du fait que les particules sont plus



5 Représentation schématique des différents régimes de cavitation.

difficilement séparables. Il est ainsi plus facile d'obtenir la nucléation de bulles de cavitation dans une solution d'hypochlorite qui contient des impuretés et du gaz dissous que dans un liquide dégazé comme l'eau¹.

Le phénomène de cavitation acoustique est donc théoriquement possible avec les dispositifs ultrasonores (contrairement aux dispositifs soniques). Il a été expérimentalement démontré, y compris dans une application endodontique impliquant des contacts intermittents entre l'insert et les parois canalaire. Ce contact, difficile à éviter cliniquement, est d'ailleurs responsable de l'émission de son dans une gamme audible (#5 Hz), alors que la lime continue d'osciller librement entre deux contacts¹⁵.

Les bulles qui sont contraintes d'osciller dans le champ acoustique ultrasonore peuvent présenter deux types de régimes de cavitation : l'un est dit « stable » et correspond à l'oscillation linéaire de la bulle sans collapsus ; l'autre, dit « inertiel » (observé uniquement pour des fréquences élevées), se caractérise par un collapsus violent de la bulle précédant la phase d'expansion explosive (5).

L'oscillation des bulles de cavitation au sein du champ acoustique est responsable de mouvements liquidiens (microcourants acoustiques).

1 Les générateurs piézoélectriques utilisés pour l'activation ultrasonore ont une fréquence de vibration de l'ordre de 30 kHz et une puissance variable et ajustable de 200 mW/cm² à 10 W/cm²

Au moment de l'implosion de la bulle de gaz, il y a libération d'énergie sous la forme d'une onde de choc qui se propage dans le liquide et peut être responsable d'une cavitation secondaire. Si durant leur évolution les bulles de cavitation rencontrent une surface solide, elles implosent sur cette surface en formant des microjets de liquide très violents (100 m/s) qui découpent le solide ou peuvent même être responsables de son altération (*pitting*).

Si la fréquence ultrasonore et l'intensité du générateur ont une influence théorique sur l'initiation et la dynamique des bulles de cavitation, l'expérience montre d'importantes variations dans la formation et le développement des nuages de bulles, révélant la sensibilité du phénomène de cavitation aux variations des paramètres locaux, et donc son caractère aléatoire¹⁶. Dans l'application endodontique considérée, et en prenant pour exemple l'insert IrriSafe, activé par un générateur Suprasson PMax à la puissance 4 du mode Endo, la cavitation inertielle ne s'observe qu'à l'extrémité de l'insert dans les premières millisecondes de l'activation, alors que le régime stable de cavitation s'observe à proximité des antinœuds et au niveau de bulles de cavitation secondaire pendant les premières 50 ms de l'activation¹⁷.

En résumé

Les dispositifs soniques ne génèrent ni courants acoustiques ni cavitation mais brassent effectivement la solution, ce qui permet une mise en suspension des débris.



Si le phénomène de cavitation (avec comme corolaire la génération de microcourants et d'ondes de choc) est théoriquement possible mais expérimentalement peu prédictible, il semble dès lors difficilement reproductible cliniquement lors de l'activation ultrasonore, notamment au niveau des canaux courbes, du fait des difficultés à positionner l'instrument à proximité de l'apex.

Il est donc probable que ce soient davantage les forces de cisaillement induites par les seuls courants acoustiques qui soient responsables des effets des dispositifs ultrasonores en endodontie¹⁸.

ACTIVATION CHIMIQUE DES SOLUTIONS D'IRRIGATION

Si les deux types de dispositifs (sonique et ultrasonore) permettent d'accélérer les réactions chimiques (et par conséquent d'augmenter le pouvoir bactéricide) par la simple agitation mécanique de la solution^{19,20}, seuls les ultrasons sont capables d'entraîner une augmentation de la température de celle-ci²¹. Cette élévation de la température s'explique par la dissipation d'une partie importante de l'énergie de l'onde acoustique du fait de l'agitation moléculaire plus intense. Une élévation de la température de la solution de 37 °C à 45 °C est observée dans le canal lors de l'activation d'une lime ultrasonore en présence d'hypochlorite et serait responsable de l'augmentation du pouvoir solvant de cette dernière sur les matières organiques.

La cavitation acoustique inertielle, lorsqu'elle se produit, conduit à des conditions extrêmes au sein des bulles lors de leur implosion. L'élévation localisée de la température et de la pression (pouvant atteindre des valeurs instantanées de 5 000°K et 10³ ATM) conduit à la décomposition des molécules contenues dans le gaz avec libération de radicaux libres hautement réactifs²². Cette propriété est à la base du procédé de sonochimie : dans le cas d'une solution d'hypochlorite de sodium, on observerait une décomposition de l'acide hypochloreux avec libération dans la solution de radicaux libres HO° hautement oxydants²³ et fortement bactéricides. Il faut noter que ce phénomène, bien que réel²⁵, n'est susceptible de se produire que lors des premières fractions de seconde de l'activation de l'insert, avant que le régime d'oscillation de la lime ne se stabilise ; il est donc peu probable que sa contribution à la désinfection soit majeure.

EFFICACITÉ CLINIQUE ET MISE EN ŒUVRE

L'ensemble des études disponibles s'accordent à démontrer que l'activation des solutions d'irrigation est bénéfique en ce qui concerne le nettoyage canalaire par rapport à l'irrigation à la seringue seule^(25, 26, 27, 5). Si les ultrasons sont systématiquement plus efficaces que les dispositifs soniques dans l'élimination des débris macroscopiques accumulés dans les isthmes *in vitro*, leur supériorité pour l'élimination de la *smear layer* dans le tiers apical reste à démontrer²⁸.

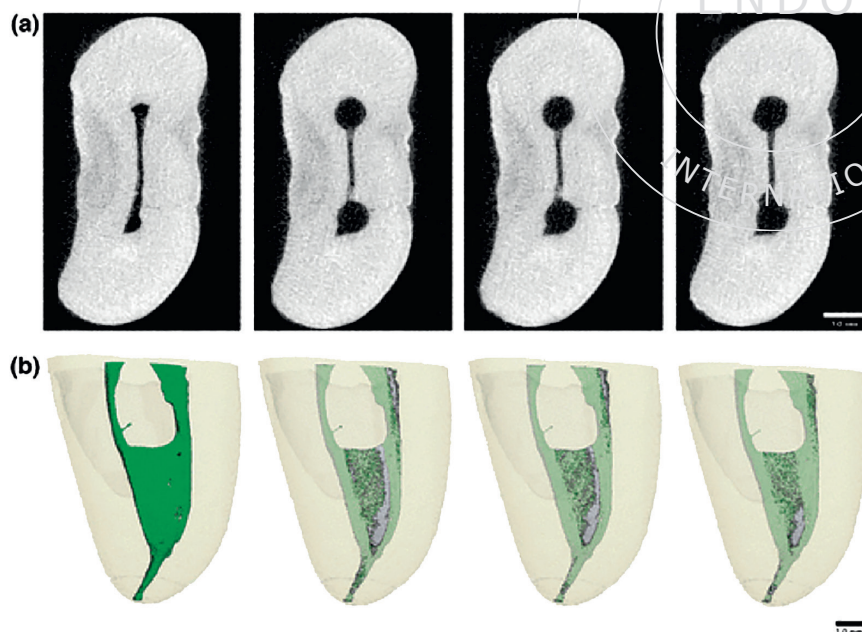
Canaux courbes

Il faut noter que, dans la plupart des modèles expérimentaux, les canaux étaient rectilignes et suffisamment larges pour positionner l'insert ultrasonore à l'arrêt sans toucher les parois. Paradoxalement, il est démontré expérimentalement que le contact intermittent de l'insert ultrasonore avec les parois, s'il affecte les caractéristiques de ses oscillations, n'entraîne pas de diminution de l'intensité des courants acoustiques générés, bien au contraire, et faciliterait même l'observation du phénomène de cavitation¹⁵ ! Le problème étant de pouvoir placer l'insert dans le tiers apical en évitant les contacts multiples, simultanés et permanents par gainage.

Il a donc été proposé de précurber les inserts avant de les utiliser dans les canaux courbes pour limiter leur contact avec les parois. Cette proposition est intéressante (surtout pour limiter l'effet abrasif de la lime sur les parois), mais n'a pas été validé expérimentalement. La proposition d'utiliser des inserts en NiTi connectés à la pièce à main ultrasonore par un adaptateur *chuck* a montré des résultats décevants, leur forme conique modifiant complètement le comportement vibratoire (par rapport à un insert de conicité nulle), avec une absence d'ondulations transversales de la lime lors de ses vibrations²⁹. À ce jour, seule la technologie Newtron (Acteon-Satelec), couplée aux inserts IrriSafe, permet de garantir une amplitude d'oscillation constante de l'insert, y compris lorsqu'on lui impose une charge (contact unique intermittent avec une paroi).

L'agitation de la solution d'irrigation sous l'effet de courants acoustiques est démontrée sur quelques millimètres en avant de la position de l'extrémité d'un insert ultrasonore, y compris dans les canaux courbes, avec une efficacité de débridement supérieure à l'irrigation à la seringue : cela signifie qu'en pratique il n'est pas

6 De gauche à droite : avant et après instrumentation ; après irrigation à l'EDTA ; et après activation d'une solution d'hypochlorite lors du rinçage final. L'instrumentation du canal avec une irrigation à l'hypochlorite laisse 7 % du volume canalaire rempli de débris. L'utilisation d'EDTA lors du protocole d'irrigation finale réduit la proportion de débris à 5 %. L'activation de l'hypochlorite lors du dernier rinçage abaisse encore ce volume résiduel à 3,5 % du volume canalaire, soit une réduction de 50 % de la quantité totale de débris (reproduit avec la permission des auteurs⁵).



nécessaire de positionner l'insert au-delà de la courbe, même si l'efficacité diminue avec la distance³⁰, expliquant sans doute la supériorité des dispositifs soniques dans les canaux courbes.

Isthmes

Dans des conditions d'expérimentation *in vitro*, les dispositifs ultrasonores semblent de loin plus efficaces que les dispositifs soniques pour éliminer les débris dentinaires compactés dans des rainures canalaires.

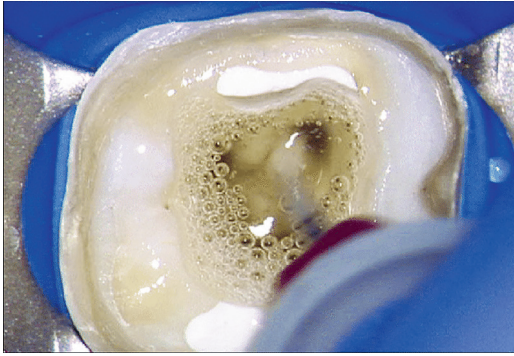
Le positionnement de l'insert ultrasonore (notamment son orientation) joue cependant un rôle crucial dans l'efficacité du débridement : l'écoulement stable de la solution sous forme de jet se faisant dans la direction de l'oscillation de la lime. Dans la pratique, cela impose d'orienter la pièce à main ultrasonore de telle sorte qu'elle soit parallèle à la direction dans laquelle on recherche le maximum d'efficacité. Les isthmes reliant deux canaux, l'un, vestibulaire, et l'autre, lingual, la pièce à main devrait donc être tenue perpendiculairement à la face vestibulaire de la dent pour permettre l'oscillation de l'insert dans le plan de l'isthme³¹, ce qui n'est pas aisé dans tous les secteurs.

L'élimination des débris dentinaires (issus de la mise en forme) et des résidus d'hydroxyde de calcium (après temporisation) des anfractuosités du système canalaire justifie alors pleinement le recours à l'activation physique des solutions d'irrigation, notamment au moyen d'un insert ultrasonore dédié (**6**).

Canaux latéraux

L'écoulement des solutions d'irrigations dans ces microcanaux obéit théoriquement aux mêmes lois rhéologiques que dans les canaux principaux, c'est-à-dire celles de la convection et de la diffusion. Les limites sont l'orientation de ces ramifications, plus ou moins perpendiculairement à la direction de l'écoulement principal, et le contenu organique qui limitent la pénétration du liquide, et l'absence probable de renouvellement autre que par phénomène de diffusion³². Il semble donc intéressant de mettre à profit l'activation acoustique pour favoriser la pénétration et l'échange de solutions dans ces zones inaccessibles à l'instrumentation.

Les courants acoustiques générés par les dispositifs ultrasonores ne permettent pas de faire pénétrer la solution plus loin que deux fois le diamètre d'un canal latéral³³. Des bulles de cavitation stable peuvent être observées, oscillant dans un canal latéral, à condition que son diamètre soit de l'ordre de 100 μm (ce qui est supérieur aux dimensions de la plupart des canaux latéraux)³³. Enfin, s'il est expérimentalement possible de générer des ondes de choc dans des microcanaux (y compris de la dimension des tubuli dentinaires) en faisant exploser des bulles de cavitation inertielles contre la paroi canalaire au moyen d'ondes ultrasonores focalisées de haute intensité, ce type de dispositif est très éloigné de ceux utilisés en clinique. En bref, il est peu probable que l'activation ultrasonore puisse contribuer de façon majeure au nettoyage des canaux latéraux.



7 Vue clinique d'une cavité d'accès remplie de solution d'hypochlorite lors de l'activation avec un dispositif sonore : l'amplitude importante de l'insert entraîne l'incorporation de bulles d'air, qui sont visibles à la surface.

Il est de même difficile de conclure à la supériorité d'un système d'activation sur un autre pour le nettoyage de canaux latéraux³⁴⁻³⁶, l'ensemble des études disponibles étant des modèles *in vitro* sur blocs en résine ou *ex vivo* sur dents naturelles extraites avec des canaux simulés. Les dimensions de ces ramifications artificielles, de même que leurs caractéristiques géométriques et leur contenu sont trop éloignés de la réalité clinique pour en extrapoler les résultats à la situation *in vivo*.

Colonne d'air

Le déplacement de l'insert en surface entraînant l'incorporation de bulles d'air dans la solution et une perte de liquide de la cavité par éclaboussure, on peut craindre une perte d'efficacité de la solution par formation d'une colonne d'air piégée dans le canal. L'activation de la solution d'irrigation doit impérativement donc se faire dans une cavité d'accès remplie de solution, ce qui implique qu'elle présente quatre parois pour limiter le phénomène d'inclusion de bulles d'air et serve de réservoir de solution pour favoriser l'échange (7).

L'élimination de ces bulles d'air piégées dans le système canalaire impose aussi le principe

d'une activation intermittente : le rinçage à la seringue avec une aiguille suffisamment fine pour être positionnée dans le tiers apical³⁷ permettant d'éliminer le risque de création d'une colonne d'air (*vapor lock*).

CONCLUSION

S'il n'existe pas à ce jour d'étude clinique démontrant de manière définitive l'intérêt d'une activation, même ultrasonore³⁸, des solutions d'irrigation pour ce qui concerne le taux de succès, la littérature montre clairement de meilleurs résultats pour ce qui concerne le nettoyage canalaire. Les inserts soniques, s'ils ne sont responsables que d'un brassage de la solution, sont néanmoins intéressants de par leur simplicité de mise en œuvre, notamment dans les canaux courbes³⁹ : le matériau plastique ne risquant pas d'abraser les parois lors des inévitables contacts ni de se fracturer. Il est même probable que ce contact soit responsable, par les frottements et chocs répétés contre les parois, de la désintégration des enduits pariétaux, expliquant sa supériorité sur les ultrasons dans l'élimination de la boue dentinaire du tiers apical des canaux courbes.

RÉFÉRENCES

- Ng YL, Mann V, Gulabivala K. A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int J Endod.*, 2011;44(7):583-609.
- Salehrabi R, Rotstein I. Endodontic treatment outcomes in a large patient population in the USA: an epidemiological study. *J Endod.*, 2004 Dec;30(12):846-50.
- Ricucci D, Siqueira JF Jr. Fate of the tissue in lateral canals and apical ramifications in response to pathologic conditions and treatment procedures. *J Endod.*, 2010;36(1):1-15.
- Gambarini G, Laszkiewicz J. A scanning electron microscopic study of debris and smear layer remaining following use of GT rotary instruments. *Int J Endod.*, 2002;35(5):422-7.
- Paqué F, Boessler C, Zehnder M. Accumulated hard tissue debris levels in mesial roots of mandibular molars after sequential irrigation steps. *Int J Endod.*, 2011 Feb;44(2):148-53.
- Cunningham WT, Martin H, Forrest WR. Evaluation of root canal débridement by the endosonic ultrasonic synergistic system. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.*, 1982;53(4):401-4.
- Ahmad M, Pitt Ford TR, Crum LA. Ultrasonic débridement of root canals: an insight into the mechanisms invo. *J Endod.*, 1987;13(3):93-101.

RÉFÉRENCES

- 8 Ahmad M, Roy RA, Kamarudin AG. Observations of acoustic streaming fields around an oscillating ultrasonic file. *Endod Dent Traumatol.*, 1992;8(5):189-94.
- 9 Weller RN, Brady JM, Bernier WE. Efficacy of ultrasonic cleaning. *J Endod.*, 1980;6(9):740-3.
- 10 Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, Langedijk J, Wesselink P, van der Sluis LW. The influence of the ultrasonic intensity on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *J Endod.*, 2011 May;37(5):688-92.
- 11 Verhaagen B, Boutsoukis C, van der Sluis LW, Versluis M. Acoustic streaming induced by an ultrasonically oscillating endodontic file. *J Acoust Soc Am.*, 2014;135(4):1717-30.
- 12 van der Sluis LW, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR. Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int J Endod.*, 2007;40(6):415-26.
- 13 Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis LW. Evaluation of a sonic device designed to activate irrigant in the root canal. *J Endod.*, 2010;36(1):143-6.
- 14 http://www.endoruddle.com/tc2pdfs/show/100/EndoDisinfect_Feb2008.pdf.
- 15 Boutsoukis C, Verhaagen B, Walmsley AD, Versluis M, van der Sluis LW. Measurement and visualization of file-to-wall contact during ultrasonically activated irrigation in simulated canals. *Int J Endod.*, 2013;46(11):1046-55.
- 16 Saletes I. Cavitation par excitation acoustique bibréquentielle : application à la thrombolyse ultrasonore. Thèse de Science. Université Claude Bernard – Lyon-I, 2009.
- 17 Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, Zangrillo C, Cuckovic D, van der Sluis LW. An evaluation of the effect of pulsed ultrasound on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *J Endod.*, 2010;36(11):1887-91.
- 18 Gulabivala K, Ng YL, Gilbertson M, Eames I. The fluid mechanics of root canal irrigation. *Physiol Meas.*, 2010;31(12):R49-84.
- 19 Conde AJ, Estevez R, Loroño G, Valencia de Pablo Ó, Rossi-Fedeles G, Cisneros R. Effect of sonic and ultrasonic activation on organic tissue dissolution from simulated grooves in root canals using sodium hypochlorite and EDTA. *Int J Endod.*, in press.
- 20 Shen Y, Stojicic S, Qian W, Olsen I, Haapasalo M. The synergistic antimicrobial effect by mechanical agitation and two chlorhexidine preparations on biofilm bacteria. *J Endod.*, 2010;36(1):100-4.
- 21 Macedo RG, Verhaagen B, Wesselink PR, Versluis M, van der Sluis LW. Influence of refreshment/activation cycles and temperature rise on the reaction rate of sodium hypochlorite with bovine dentine during ultrasonic activated irrigation. *Int J Endod.*, 2014;47(2):147-54.
- 22 François Zaviska, Patrick Drogui, Guy Mercier et Jean-François Blais. Procédés d'oxydation avancée dans le traitement des eaux et des effluents industriels : Application à la dégradation des polluants réfractaires. *Revue des Sciences de l'Eau*, 2009;22(4):535-564.
- 23 Tiong TJ, Price GJ. Ultrasound promoted reaction of Rhodamine B with sodium hypochlorite using sonochemical and dental ultrasonic instruments. *Ultrason Sonochem.*, 2012;19(2):358-64.
- 24 Macedo RG, Verhaagen B, Fernandez Rivas D, Gardeniers JG, van der Sluis LW, Wesselink PR, Versluis M. Sonochemical and high-speed optical characterization of cavitation generated by an ultrasonically oscillating dental file in root canal models. *Ultrason Sonochem.*, 2014;21(1):324-35.
- 25 Pasqualini D, Cuffini AM, Scotti N, Mandras N, Scalas D, Pera F, Berutti E. Comparative evaluation of the antimicrobial efficacy of a 5% sodium hypochlorite subsonic-activated solution. *J Endod.*, 2010 Aug;36(8):1358-60.
- 26 Caron G, Nham K, Bronnec F, Machtou P. Effectiveness of different final irrigant activation protocols on smear layer removal in curved canals. *J Endod.*, 2010 Aug;36(8):1361-6.
- 27 Blank-Gonçalves LM, Nabeshima CK, Martins GH, Machado ME. Qualitative analysis of the removal of the smear layer in the apical third of curved roots: conventional irrigation versus activation systems. *J Endod.*, 2011;37(9):1268-71.
- 28 Mancini M, Cerroni L, Iorio L, Armellini E, Conte G, Cianconi L. Smear layer removal and canal cleanliness using different irrigation systems (EndoActivator, EndoVac, and passive ultrasonic irrigation): field emission scanning electron microscopic evaluation in an *in vitro* study. *J Endod.*, 2013;39(11):1456-60.
- 29 Verhaagen B, Lea SC, de Bruin GJ, van der Sluis LW, Walmsley AD, Versluis M. Oscillation characteristics of endodontic files: numerical model and its validation. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control.*, 2012;59(11):2448-59.
- 30 Malki M, Verhaagen B, Jiang LM, Nehme W, Naaman A, Versluis M, Wesselink P, van der Sluis L. Irrigant flow beyond the insertion depth of an ultrasonically oscillating file in straight and curved root canals: visualization and cleaning efficacy. *J Endod.*, 2012;38(5):657-61.
- 31 Jiang LM, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis LW. Influence of the oscillation direction of an ultrasonic file on the cleaning efficacy of passive ultrasonic irrigation. *J Endod.*, 2010;36(8):1372-6.
- 32 Shen Y, Li W, Haapasalo M. Penetration of sodium hypochlorite into dentin. *J Endod.*, 2010;36(5):793-6.
- 33 Verhaagen B, Boutsoukis C, Sleutel CP, Kastrinakis E, van der Sluis LWM, Versluis M. Irrigant transport into dental microchannels. *Microfluidics and Nanofluidics.*, 2014;16(6):1165-1177.
- 34 de Gregorio C, Estevez R, Cisneros R, Heilborn C, Cohenca N. Effect of EDTA, sonic and ultrasonic activation on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals: an *in vitro* study. *J Endod.*, 2009;35(6):891-5.
- 35 de Gregorio C, Estevez R, Cisneros R, Paranjpe A, Cohenca N. Efficacy of different irrigation and activation systems on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals and up to working length: an *in vitro* study. *J Endod.*, 2010;36(7):1216-21.
- 36 Spoorthy E, Velmurugan N, Ballal S, Nandini S. Comparison of irrigant penetration up to working length and into simulated lateral canals using various irrigating techniques. *Int J Endod.*, 2013;46(9):815-22.
- 37 Boutsoukis C, Kastrinakis E, Lambrianidis T, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis LW. Formation and removal of apical vapor lock during syringe irrigation: a combined experimental and computational fluid dynamics approach. *Int J Endod.*, 2014 Feb;47(2):191-201.
- 38 Liang YH, Jiang LM, Jiang L, Chen XB, Liu YY, Tian FC, Bao XD, Gao XJ, Versluis M, Wu MK, van der Sluis L. Radiographic healing after a root canal treatment performed in single-rooted teeth with and without ultrasonic activation of the irrigant: a randomized controlled trial. *J Endod.*, 2013;39(10):1218-25.
- 39 Merino A, Estevez R, de Gregorio C, Cohenca N. The effect of different taper preparations on the ability of sonic and passive ultrasonic irrigation to reach the working length in curved canals. *Int J Endod.*, 2013 May;46(5):427-33.