



Article

Effet des ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) sur le mouvement des dents et la résorption des racines: Un essai contrôlé randomisé multicentrique prospectif

Tarek El-Bialy ^{1,*}, Khaled Farouk ^{2,3}, Terry D. Carlyle ⁴, William Wiltshire ⁵, Robert Drummond ⁶, Tim Dumore ⁶, Kevin Knowlton ⁷ et Bryan Tompson ⁸

¹ Division d'orthodontie, Katz Group Centre for Pharmacy and Health Research, École de médecine dentaire, Université de l'Alberta, Edmonton, AB T6G 1C9, Canada

² Département d'orthodontie, Faculté de médecine dentaire, Université Al-Azhar, Le Caire, Égypte

³ Division d'orthodontie, École dentaire, Faculté de médecine et d'odontologie, Université de l'Alberta, Edmonton, AB T6G 1C9, Canada ; khaledfarouk@azhar.edu.eg

⁴ Division d'orthodontie, programme d'études supérieures d'orthodontie, Faculté de médecine et d'odontologie, Université de l'Alberta, Edmonton, AB T6G 1C9, Canada ; terry.carlyle@str8teeth.com

⁵ Département des sciences dentaires préventives (y compris la dentisterie communautaire, l'orthodontie et la dentisterie pédiatrique), Division de l'orthodontie, Programme orthodontique de troisième cycle, Collège de dentisterie, Université du Manitoba, Winnipeg, MB R3E 0W3, Canada ; wa.wiltshire@umanitoba.ca

⁶ Division d'orthodontie, programme d'études supérieures en orthodontie, Collège de dentisterie, Université du Manitoba,

Winnipeg, MB R3E 0W3, Canada ; robert.drummond@umanitoba.ca (R.D.) ; tim@drumore.com (T.D.)

⁷ Programme d'études supérieures en orthodontie, Université de Toronto, Toronto, ON M5G 1G6, Canada ; drkevinortho@gmail.com

⁸ Discipline Head Orthodontics, Faculty of Dentistry, University of Toronto ; Division of Orthodontics, Hôpital pour enfants malades, Université de Toronto, Toronto, ON, M5G 1G6, Canada ; bryan.tompson@dentistry.utoronto.ca

* Correspondance : telbially@ualberta.ca ; Tél : +1-780-492-2751

Reçu : 18 février 2020 ; Accepté : 12 mars 2020 ; Publié : 16 mars 2020



Résumé : L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet possible des ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) sur le mouvement des dents et la résorption des racines chez les patients orthodontiques. Vingt-et-un patients ont été inclus dans un modèle d'étude à bouche séparée (groupe 1). Dix autres patients ont été inclus sans qu'aucun dispositif LIPUS ne soit utilisé et ce groupe a été utilisé comme groupe de contrôle négatif (groupe 2). Les patients du groupe 1 ont reçu des dispositifs LIPUS qui ont été assignés au hasard au côté droit ou gauche sur les arcades supérieures ou inférieures. Le LIPUS a été appliqué au côté assigné par randomisation, en utilisant des transducteurs qui produisent des ultrasons avec une fréquence d'impulsion de 1,5 MHz, un taux de répétition des impulsions de 1 kHz et une intensité de sortie moyenne de 30 mW/cm². Des images de tomographie à faisceau conique (CBCT) ont été prises avant et après le traitement. Les dimensions de l'espace d'extraction ont été mesurées toutes les quatre semaines et la longueur des racines des canines a été mesurée avant et après le traitement. Les données ont été analysées à l'aide d'un *test t* par paires. Les résultats de l'étude ont montré que le taux moyen de déplacement des dents du côté LIPUS était de 0,266 ± 0,092 mm/semaine et du côté contrôle de 0,232 ± 0,085 mm/semaine, et que la différence était statistiquement significative. LIPUS a augmenté la vitesse de déplacement des dents de 29 % en moyenne. En ce qui concerne la résorption orthodontique des racines, le côté LIPUS (0,0092 ± 0,022 mm/semaine) a montré une diminution statistiquement significative par rapport au côté témoin (0,0223 ± 0,022 mm/semaine). L'application de LIPUS a accéléré le mouvement des dents et minimisé la résorption radiculaire induite par l'orthodontie en même temps.

Mots clés : mouvement dentaire orthodontique ; accélération ; ultrasons pulsés de faible intensité ; LIPUS ; essai clinique

1. Introduction

L'esthétique faciale et dentaire joue un rôle très important dans la mesure sociale de l'attractivité globale. Une personne dont le sourire et l'apparence faciale sont agréables est plus susceptible de recevoir des appréciations et des évaluations favorables de la part de son groupe de pairs, de ses aînés et de ses employeurs [1]. D'autre part, les patients souffrant de malocclusion peuvent avoir des problèmes de santé bucco-dentaire, physique et psychologique, en fonction de la gravité de la malocclusion [2,3]. L'aspect psychologique est la principale motivation d'une personne pour suivre un traitement orthodontique, ainsi que la quintessence de l'adhésion au traitement. Une étude de Sergl et Zentner [4] sur l'aspect psychologique des patients orthodontiques a révélé qu'environ deux tiers d'entre eux étaient préoccupés par une mauvaise esthétique. Néanmoins, la durée totale du traitement orthodontique n'inquiète pas seulement les patients et les parents, mais aussi les orthodontistes [5].

Un nombre croissant d'adultes suivent un traitement orthodontique et la préoccupation la plus fréquente de ces patients est la durée du traitement, ainsi que le type d'appareil orthodontique à utiliser pour le traitement [5]. La durée moyenne d'un traitement orthodontique est de 2 à 3 ans [6,7]. Un traitement orthodontique prolongé affecte non seulement l'observance du patient [8], mais le prédispose également à une incidence plus élevée de caries, à des lésions de la zone blanche [9], à une inflammation et à une récession gingivale, ainsi qu'à une résorption radiculaire [10].

Par conséquent, l'accélération du traitement orthodontique tout en préservant l'intégrité de la structure dentaire et de l'os alvéolaire fait l'objet d'une attention croissante de la part des universitaires et des cliniciens en orthodontie. Diverses procédures ont été employées pour réduire la durée du traitement. Ces techniques comprennent la thérapie laser de bas niveau [11], les champs électromagnétiques pulsés [12], les courants électriques [13], la corticotomie [14], l'ostéogenèse par distraction [15], la vibration mécanique [16] et la photobiomodulation [17]. Cependant, il n'existe pas de données confirmées indiquant que ces techniques peuvent minimiser la résorption des racines dentaires induite par l'orthodontie (OITRR), tout en accélérant le mouvement de la dent.

Le déplacement orthodontique des dents est un processus inflammatoire complexe qui dépend du remodelage de l'os alvéolaire qui entoure la dent. Ce processus comprend une cascade d'événements impliquant la sécrétion de médiateurs biochimiques, par exemple des cytokines (interleukine IL-1, IL-2, IL-6, etc.), des facteurs de croissance (facteur de croissance transformant- β (TGF- β), facteur de croissance des fibroblastes (FGF), protéine morphogénétique osseuse (BMP) et facteur de croissance endothélial vasculaire (VEGF)) et des prostaglandines (PG-E) ; le recrutement d'ostéoblastes et d'ostéoclastes. Le facteur limitant la vitesse de la MTO est la résorption osseuse [18,19]. L'un des effets secondaires courants du traitement orthodontique est l'OITRR, qui est la deuxième résorption radiculaire la plus fréquente après la résorption radiculaire liée à l'infection de la pulpe [20]. Le mécanisme moléculaire de l'OITRR est encore inconnu, mais il a donné lieu à de nombreux procès pour faute professionnelle contre des orthodontistes [21,22]. La prévalence de la résorption radiculaire a augmenté de 73 à 80 % après un traitement orthodontique [23,24].

Récemment, il a été démontré que les ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) augmentaient la vitesse de déplacement des dents dans les cultures ex vivo de tranches de mandibule et chez les animaux, et diminuaient l'OITRR [25,26]. Les ultrasons sont une forme d'énergie mécanique qui peut être transmise à travers différents tissus sous forme d'ondes de pression. La fréquence de ces ondes est supérieure à la limite de l'audition humaine. Les ultrasons ont été utilisés en médecine pour des opérations chirurgicales, des applications thérapeutiques et des diagnostics [27,28]. Il a également été rapporté que LIPUS accélère la réparation normale des fractures lorsqu'il est appliqué quotidiennement pendant une période de trois semaines, à raison de 15 à 20 minutes par jour et d'une intensité comprise entre 30 et 50 mW/cm^2 [29]. Une étude clinique récente sur des patients humains a montré que l'utilisation intermittente de LIPUS (aux jours 0, 3, 5, 7, 14 et tous les 15 jours par la suite) augmentait le taux de déplacement des dents, mais l'appareil LIPUS utilisé était appliqué par voie extraorale et le dispositif était appliqué par l'opérateur d'un côté de la bouche [30]. Il a été rapporté que l'effet stimulant de LIPUS dépendait de la dose [31]. On ne sait pas si l'application de LIPUS par voie intra-orale et sur une base quotidienne serait bénéfique pour accélérer le mouvement des dents ou non.

L'objectif principal de la présente étude était d'évaluer l'effet de LIPUS sur le taux de déplacement

orthodontique des dents dans le cadre de l'essai clinique "split-mouth". Les hypothèses nulles étaient les suivantes (1) il n'y a pas de différence significative dans la vitesse de déplacement des dents entre le côté LIPUS et le côté contrôle ; et (2) il n'y a pas de différence significative dans la vitesse de déplacement des dents entre le côté LIPUS et le côté contrôle différence de résorption radiculaire après un mouvement dentaire orthodontique entre le côté traité par LIPUS et le côté témoin. Les hypothèses alternatives sont les suivantes : (1) le côté traité par LIPUS aura un mouvement dentaire accéléré et une résorption radiculaire réduite par rapport au côté de contrôle.

2. Section expérimentale

Il s'agissait d'un essai contrôlé randomisé à bouche partagée avec un ratio d'allocation de 1:1. Il s'agissait d'une étude multicentrique menée sur cinq sites - trois universités publiques et deux cliniques privées. Le comité d'éthique de chaque institut participant a approuvé l'étude. Les participants sélectionnés ont été informés des procédures de l'étude et des expositions aux rayonnements, puis des consentements écrits éclairés ont été signés. Cette étude est également enregistrée sur ClinicalTrials.gov avec le numéro d'identification : NCT01828164.

Les sujets répondant à tous les critères suivants ont été admis à l'étude :

- dentition permanente et âgés de 12 à 40 ans ;
- les extractions de la première prémolaire indiquées pour corriger la malocclusion dentaire existante (pour éliminer l'overjet ou le crowding) avec un minimum de 3 mm d'espace d'extraction ;
- une bonne hygiène bucco-dentaire et le respect des règles ; et
- aucun antécédent de maladie

systemique. Les critères

d'exclusion étaient les suivants

- toute condition médicale ou dentaire compromise qui empêche le sujet de participer à l'essai ou d'utiliser un dispositif médical (comme le diabète, l'insuffisance rénale, un traitement aux corticostéroïdes, etc ;)
- tout dispositif d'assistance implanté, par exemple un stimulateur cardiaque, un implant cochléaire, etc ;
- l'utilisation chronique de médicaments affectant le mouvement orthodontique des dents, par exemple les bisphosphonates ; et,
- les femmes enceintes.

2.1. Calcul de la taille de l'échantillon

D'après les études précédentes, le mouvement dentaire orthodontique moyen pour la rétraction de la canine chez les sujets humains est de 1,11 mm par mois avec un écart type de 0,43 mm [32,33]. Dans l'étude précédente sur les chiens [26], le mouvement orthodontique des dents du côté traité par LIPUS était environ 50 % plus rapide que celui du côté témoin. Cette accélération a été obtenue pour des chiens traités pendant 20 minutes chaque jour (observance de 100 %). Par conséquent, le taux mensuel moyen attendu de déplacement des dents était de 1,66 mm pour le groupe traité par LIPUS + appareil orthodontique et de 1,1 mm pour le groupe ayant reçu l'appareil orthodontique seul. Sur la base d'une analyse réalisée à l'aide du *test t* apparié, un minimum de 10 sites d'extraction par groupe (avec une conformité d'utilisation de 100 %) était nécessaire, pour une puissance de 80 % et un niveau de signification de 0,05. La figure 1 présente les détails des patients recrutés et les raisons pour lesquelles ils ont abandonné l'essai. En résumé, soixante patients ont été sélectionnés pour cet essai clinique et quarante-sept ont répondu aux critères de sélection. Sur ces quarante-sept patients, vingt-et-un ont terminé l'essai clinique, avec un taux de conformité de ≥ 67 % pour l'utilisation du dispositif selon le protocole.

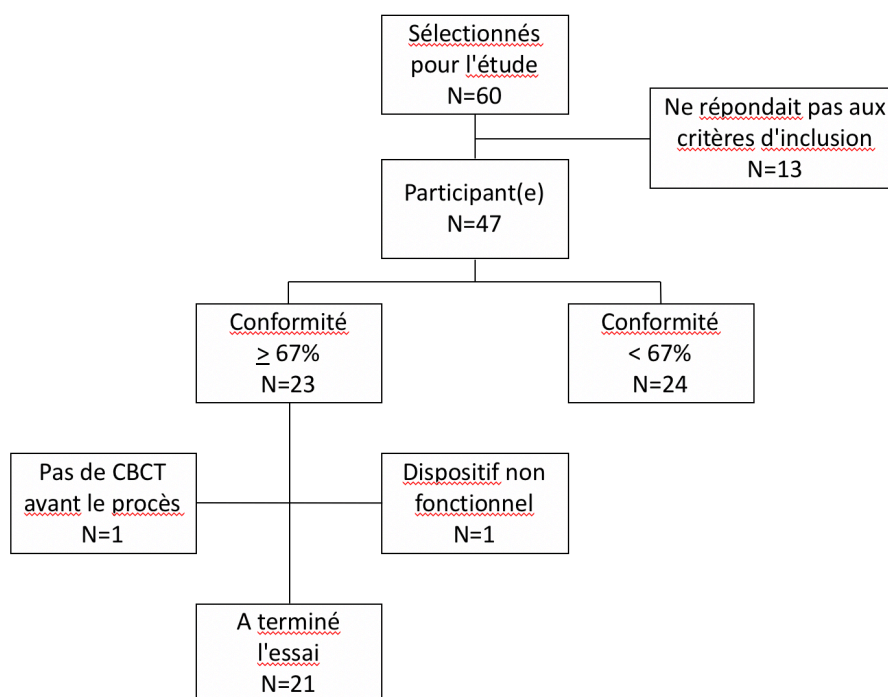


Figure 1. Organigramme CONSORT.

3.2 Approbation éthique et consentement des patients

L'étude a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche de l'Université de l'Alberta (PR-0018 date d'approbation 27 septembre 2012), de l'Université de Toronto (PR-0031 date d'approbation 8 janvier 2013), de Strathcona Orthodontics (PR-0018.3 date d'approbation 25 mars 2014), de l'Université du Manitoba (PR-0041 date d'approbation 26 mars 2014) et du Dr. Dumore and Team Orthodontics (PR-0041 date d'approbation 26 mars 2014). Toutes les procédures étaient conformes au code de déontologie de l'Association médicale mondiale (Déclaration d'Helsinki), au règlement canadien sur les dispositifs médicaux SOR-98-282, aux lignes directrices tripartites de l'ICH sur les bonnes pratiques cliniques et à la norme ISO 14155:2011 sur l'étude clinique des dispositifs médicaux pour les sujets humains. Les participants sélectionnés ont été informés des procédures de l'étude et des expositions aux rayonnements, puis des consentements écrits éclairés ont été signés.

2.3 Randomisation

Les patients presentis ont été répartis au hasard en deux groupes. Le groupe 1, dans l'étude "split-mouth", comprenait 21 patients qui répondaient aux critères de sélection pré-approuvés et qui ont terminé leur participation à l'essai clinique (24 semaines ou jusqu'à la fermeture de l'espace d'extraction d'un côté ou de l'autre, selon la période la plus courte). Un côté de la bouche du patient recevait le traitement LIPUS, tandis que l'autre côté du même patient était inactivé et servait de placebo ou de contrôle positif. L'appareil LIPUS a été fourni avec les zones de traitement actif de l'embout buccal présélectionnées par le fabricant (SmileSonica Inc., Edmonton, AB, Canada). L'appareil a été fourni gratuitement aux patients participant à l'étude. Le choix du côté actif de l'embout buccal s'est fait site par site, selon une séquence d'attribution aléatoire prédéterminée, créée par un tiers indépendant. Le patient et l'investigateur étaient tous deux aveugles quant au côté actif ou inactif. L'aveuglement a été respecté car LIPUS ne peut être ni entendu ni ressenti. L'assistant de recherche de l'étude ou le chercheur principal a pris les mesures intra-orales, sur un moulage ou des mesures scannographiques au début de la rétraction de la canine, et toutes les quatre semaines. Toutes les mesures cliniques ont été effectuées par la même personne sur chaque site afin de garantir la cohérence des mesures et d'éliminer les erreurs de mesure.

Le modèle de la bouche divisée a été choisi pour cet essai clinique, car les côtés droit et gauche d'une arcade dentaire sont normalement quasi-symétriques avec des propriétés et des dimensions similaires (par exemple, la taille des dents, épaisseur de la gencive, etc.) Cependant, un autre groupe a également été utilisé en raison de la probabilité de transmission des ondes ultrasonores du côté actif au côté passif (contamination croisée de la bouche). Le groupe 2 était composé de 10 patients qui n'avaient reçu aucun traitement LIPUS d'un côté ou de l'autre ; il a servi de groupe de contrôle négatif et a été inclus dans l'étude (aucune cécité n'a été appliquée à ce groupe).

2.4 Dispositif LIPUS

LIPUS a été appliqué pendant 20 minutes par jour à l'aide d'un appareil à ultrasons sur mesure pendant toute la durée de l'essai, c'est-à-dire 24 semaines ou jusqu'à la fermeture de l'espace d'extraction de chaque côté, la période la plus courte étant retenue. L'appareil comportait un embout buccal semblable à un protège-dents relié à un dispositif électronique portable, dont l'écran fournissait des informations sur le traitement (figure 2). Les transducteurs sont intégrés dans l'embout buccal situé au niveau de la racine de la dent. Le gel de couplage, fourni par le fabricant, a été appliqué à l'intérieur de la gouttière avant le début de chaque traitement, afin que le LIPUS puisse être correctement transmis de la gouttière aux racines des dents en passant par les gencives. L'appareil LIPUS était doté d'une puce à mémoire interne qui enregistrait la date, l'heure et la durée de chaque application du LIPUS. L'appareil LIPUS émettait des ultrasons à une fréquence de 1,5 MHz, avec un taux de répétition des impulsions de 1 kHz et une intensité moyenne de 30 mW/cm^2 . Chaque patient avait un appareil jumeau qui était échangé tous les mois, de sorte que l'appareil pouvait être renvoyé au fabricant pour vérifier l'étalonnage de l'intensité de sortie de LIPUS.



Figure 2. Dispositif à ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) utilisé dans l'essai clinique, comprenant **A** : dispositif électronique portable ; **B** : embout buccal contenant les transducteurs LIPUS ; et **C** : gel ultrasonore ora

3.2 Intervention

Tous les patients ont subi une extraction des premières prémolaires et une rétraction canine ultérieure à l'aide d'une boucle en T de rétraction canine de 0,017" × 0,025" en alliage de titane et de molybdène (TMA) qui a été construite pour chaque site d'extraction, comme décrit précédemment par Burstone (1962) [34]. La boucle en T a été activée en cintrant la branche postérieure du ressort à 5-6 mm du tube auxiliaire de la première molaire. Le ressort a été réactivé tous les deux mois (figure 3). L'ancrage a été réalisé à l'aide de la deuxième prémolaire, de la première et de la deuxième molaire en utilisant l'arc transpalatin et l'arc lingual dans le maxillaire et l'arcade mandibulaire, respectivement. Une empreinte à l'alginate avant rétraction (T_0) et un CBCT ont été enregistrés le premier jour du traitement. Les visites de suivi ont été programmées toutes les quatre semaines. L'espace d'extraction intra-oral a été mesuré au début du traitement et avant la fermeture de l'espace d'extraction pour calculer le taux de déplacement hebdomadaire des dents. Les mesures des visites intermédiaires n'étaient pas nécessaires pour déterminer le taux global de déplacement des dents au cours de l'étude clinique. Les dossiers comprenaient, avant le traitement, soit un scanner CBCT à grand champ de vision, soit une céphalométrie ordinaire, en plus d'un CBCT à petit champ de vision (la plus petite image possible est prise à environ 8 cm × 8 cm, avec une taille de voxel de 0,3 mm) (iCAT, Hatfield, PA, USA).

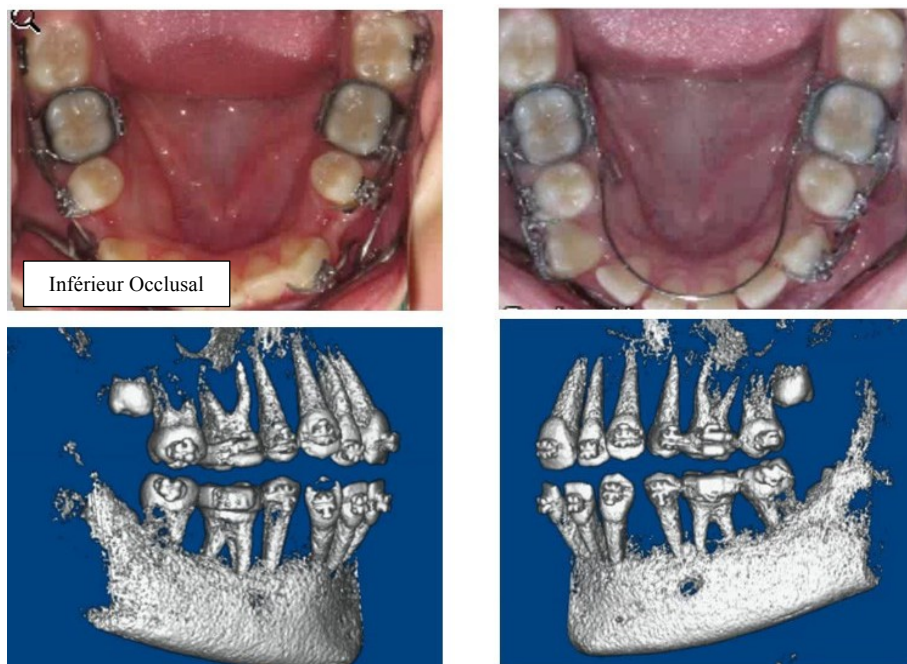


Figure 3. Un cas dans le groupe LIPUS au début (en haut à gauche) et deux mois après le traitement (en haut à droite). Le côté inférieur droit du patient a été traité par LIPUS et le côté inférieur gauche était le contrôle. Scanner CBCT montrant l'angulation de la racine après la rétraction de la canine (en bas à gauche, côté traité par LIPUS et à droite, côté témoin).

2.6 Évaluation des résultats

2.6.1 Conformité du sujet

Un programme informatique téléchargeant les données d'utilisation de l'appareil à chaque visite a contrôlé la conformité de l'utilisation de l'appareil. Un niveau de conformité de 67 % pour la durée de l'essai était le minimum accepté pour chaque visite.

2.6.3 Résultat primaire

Trois types de mouvements dentaires peuvent se produire au cours d'un traitement orthodontique : la translation pure, la bascule pure ou une combinaison de translation et de bascule. Seul le même type de mouvement a été comparé puisque l'étude clinique consistait à comparer les taux de fermeture des espaces sur les deux côtés d'une même arcade.

Si les deux côtés présentaient des types de mouvements dentaires différents, c'est-à-dire si un côté présentait une bascule et l'autre une translation, les données ont été exclues de l'analyse. La mesure du mouvement des couronnes et des extrémités des racines des canines par rapport aux premières molaires sur les scans CBCT ou les radiographies dentaires a permis de quantifier le type de mouvement des dents. L'ampleur du mouvement dentaire a été calculée en mesurant l'ampleur du mouvement du cornet pulpaire de la canine par rapport à la chambre pulpaire de la première molaire et l'ampleur du mouvement dentaire de l'apex de la racine de la canine par rapport à l'apex mésial de la racine de la première molaire.

- d_{Couronne} : l'ampleur du mouvement de la couronne de la canine
- d_{Racine} : l'importance du mouvement dentaire de l'apex de la racine de la canine

$$\text{Basculement} = d_{\text{Couronne}} - d_{\text{Racine}}$$

$$\text{Traduction} = \begin{cases} d_{\text{Couronne}}, & |d_{\text{Couronne}}| \geq |d_{\text{Racine}}| \\ d_{\text{Racine}}, & |d_{\text{Couronne}}| < |d_{\text{Racine}}| \\ 0, & \text{sgn}(d_{\text{Couronne}}) \neq \text{sgn}(d_{\text{Racine}}) \end{cases} \quad (1)$$

Les IP ou les assistants de recherche ont pris les mesures des plâtres dentaires (ou les mesures intra-orales si les plâtres dentaires n'étaient pas disponibles) au début de la rétraction des canines, et toutes les quatre semaines pour évaluer la fermeture totale de l'espace. Le taux de déplacement des dents a été calculé comme suit :

- d_{t_0} : la mesure du premier espace d'extraction (de la pointe de la cuspidé de la canine au sillon mésiobuccal de la première molaire) ;
- d_{t_1} : la dernière mesure de l'espace d'extraction avant la fermeture de l'espace d'extraction (c'est-à-dire l'espace d'extraction = 0 mm) de part et d'autre ; et,
- t : le nombre de semaines entre d_{t_0} et d_{t_1} .

$$\text{Vitesse de déplacement des dents} = \frac{d_{t_0} - d_{t_1}}{t} \quad (2)$$

Le pourcentage de changement a été calculé comme suit, en utilisant :

- $r_{\text{Ultrasound}}$: Taux de déplacement des dents par ultrasons ; et,
- r_{Control} : Contrôle de la vitesse de déplacement de la dent.

$$\text{Pourcentage de changement} = \frac{(r_{\text{Ultrasons}} - r_{\text{Contrôle}})}{|r_{\text{Contrôle}}|} \times 100\% \quad (3)$$

2.6.3 Résultat secondaire : Résorption radiculaire par CBCT

Sur les images CBCT, la longueur de la canine a été calculée du cornet pulpaire à l'apex de la racine. Le cornet pulpaire s'est avéré plus précis que la pointe de la cuspidé, car il n'est pas affecté par des facteurs externes, tels que le meulage, les obturations, etc. En outre, le repère de la corne pulpaire peut être identifié avec précision sur les images CBCT [35]. L'apex radiculaire et le cornet pulpaire de la canine ont été identifiés sur les coupes axiale, sagittale et coronale. Les coordonnées tridimensionnelles (3D) de chaque point ont été obtenues et la distance en ligne droite entre l'apex et le cornet pulpaire a été calculée en utilisant la formule de la distance euclidienne :

$$D = \sqrt{((XC - XR)^2 + (YC - YR)^2 + (ZC - ZR)^2)}$$

où D est la longueur de la dent, X est la position transversale (par rapport à l'axe x), Y est la position antéropostérieure (par rapport à l'axe y), Z est la position verticale (par rapport à l'axe z), C est le cornet pulpaire et R est l'apex de la racine.

Le taux de résorption de la racine a été calculé comme suit, en utilisant :

- $l_{(pre-trial)}$: la longueur de la dent avant le procès ;
- $l_{(post-procès)}$: la longueur de la dent après le procès ; et,
- t : le nombre de semaines entre $l_{(pré-procès)}$ et $l_{(post-procès)}$.

$$\text{Taux de résorption radiculaire} = \frac{l_{pré-procès} - l_{post-procès}}{t} \tag{5}$$

Le pourcentage de changement a été calculé comme suit, en utilisant :

- $r_{\text{Ultrasons}}$: Taux de résorption radiculaire par ultrasons ; et,
- r_{Control} : Taux de résorption de la racine de contrôle.

$$\text{Pourcentage de changement} = \frac{(r_{\text{Contrôle}} - r_{\text{Ultrasons}})}{|r_{\text{Ultrasound}}|} \times 100\% \tag{6}$$

3.2 Analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du programme SPSS version 20 (SPSS Inc, Chicago, IL, USA). Le test de Kolmogorov-Smirnov a été utilisé pour tester la normalité de la distribution des données, ce qui a révélé une distribution normale ; par conséquent, des tests paramétriques ont été utilisés. Un test-*t* non apparié a été utilisé pour comparer les différences de vitesse de déplacement des dents et de longueur des racines comme estimation de la résorption radiculaire entre le côté du contrôle positif (placebo) dans le groupe à bouche séparée et les résultats du contrôle négatif. Le test-*t* apparié a été utilisé pour comparer les variables entre les deux côtés du groupe split-mouth. Le niveau de signification (alpha) a été fixé à 0,05.

• Résultats

L'organigramme CONSORT présenté à la figure 1 fournit un résumé de la responsabilité des sujets dans l'étude clinique. En résumé, sur les soixante patients inscrits dans le groupe actif, treize ne répondaient pas aux critères d'inclusion après l'inscription ; par conséquent, sur soixante patients, seuls quarante-sept sont entrés dans le flux des participants. Vingt-quatre de ces 47 patients ont moins bien respecté le dispositif ; ils ont donc été retirés de l'analyse finale. Un patient avait un appareil non fonctionnel et un autre n'avait pas passé de scanner CBCT avant l'essai ; ces deux patients ont donc également été retirés de l'analyse finale. Pour l'analyse finale, l'analyse de l'essai clinique a porté sur 21 patients. L'âge moyen des 21 patients était de $19,7 \pm 6,63$ (minimum = 12 ans et maximum = 37 ans et cinq mois), avec cinq hommes et 16 femmes. Les données de 10 patients ont été recueillies et analysées en tant que groupe de contrôle négatif et n'ont été comparées qu'au groupe de contrôle positif pour étudier si LIPUS atteignait le contrôle positif dans le groupe actif et n'ont pas été comparées à l'analyse du côté actif. En comparant le mouvement des dents et la résorption des racines entre le groupe de contrôle négatif et le groupe de contrôle positif, il n'y avait pas de différence significative entre ces groupes ($p = 0,11$; et $p = 0,32$, respectivement), aucun effet cross-mouth n'a pu être mis en évidence. Par conséquent, le modèle "split-mouth" est validé dans notre étude (tableau 1).

Tableau 1. Comparaison du taux hebdomadaire de déplacement dentaire et de résorption radiculaire entre les groupes de contrôle positif et négatif.

	Mouvement des dents		Résorption de la racine		
	Moyenne (mm/semaine)	DS	<i>p</i> Valeur DS	Moyenne (mm/semaine) <i>p</i> Valeur	
Contrôle positif	0.232	0.0855	0.11	0.0241	0.32
Contrôle négatif (<i>n</i> = 10)	0.201	0.0398		0.02836	

3.2 Analyse du mouvement des dents

Dans le groupe de traitement actif, quatre patients ont été exclus parce que le type de mouvement dentaire n'était pas comparable ; dix-sept patients ont donc été inclus dans l'analyse finale du mouvement dentaire. Le taux moyen de déplacement des dents du côté LIPUS était de $0,266 \pm 0,0927$ mm/semaine et celui du côté du contrôle positif était de $0,232 \pm 0,0855$ mm/semaine (figure 4). Le tableau 2 présente une comparaison du taux de déplacement des dents du côté LIPUS et du côté du contrôle positif dans le groupe de traitement actif. La différence était statistiquement significative ($p < 0,05$). Le pourcentage de changement de la vitesse de déplacement des dents pour chaque patient a d'abord été calculé, car il s'agissait d'une étude à bouche ouverte. Ensuite, la moyenne des changements de pourcentage individuels pour les dix-sept patients a été calculée, ce qui a donné une augmentation moyenne de 29 % de la vitesse de déplacement des dents par rapport au contrôle positif.

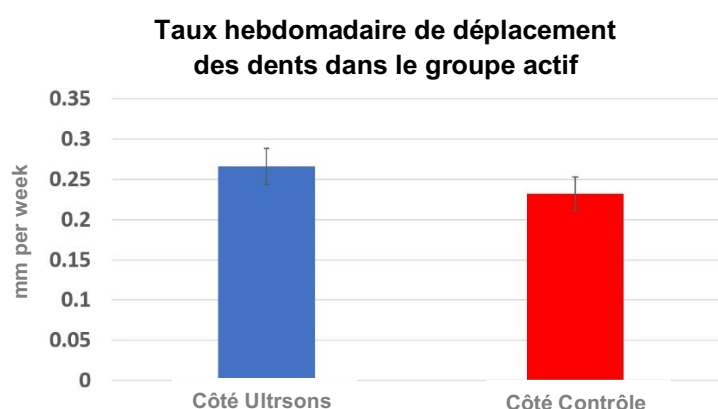


Figure 4. Comparaison du taux hebdomadaire de déplacement des dents dans le groupe actif.

Tableau 2. Comparaison du taux hebdomadaire de déplacement des dents entre le côté LIPUS et le côté contrôle positif dans le groupe "split-mouth".

	Max (mm/semaine)	Min (mm/semaine)	Moyenne (mm/semaine)	SD	Pourcentage de variation *	p Valeur
LIPUS (n = 17)	0.495	0.138	0.266	0.0927	29%	0.0164
Contrôle positif (n = 17)	0.388	0.045	0.232	0.0855		

* Comme l'étude portait sur une bouche divisée, le pourcentage moyen de changement pour le taux de déplacement des dents (29 %) a été calculé comme la moyenne des pourcentages individuels de changement pour les dix-sept patients.

3.2 Analyse de la résorption radiculaire

Six sujets d'un site d'essai ont eu des radiographies dentaires au lieu de CBCT (en raison du manque d'équipement CBCT) et, chez deux autres sujets, l'extrémité des racines canines n'a pas été capturée dans les scans CBCT ; par conséquent, ces huit patients ont été exclus de l'analyse de la résorption radiculaire. Par conséquent, pour l'analyse de la résorption radiculaire, les données de treize patients en bouche séparée ont été incluses dans l'analyse finale. Le taux moyen de résorption radiculaire pour le côté LIPUS était de $0,0092 \pm 0,0226$ mm/semaine et pour le côté contrôle positif de $0,0241 \pm 0,0223$ mm/semaine (Figure 5). Le tableau 3 présente l'analyse descriptive du côté LIPUS et du côté contrôle positif dans le groupe de traitement actif. La différence a été considérée comme statistiquement significative ($p < 0,05$)

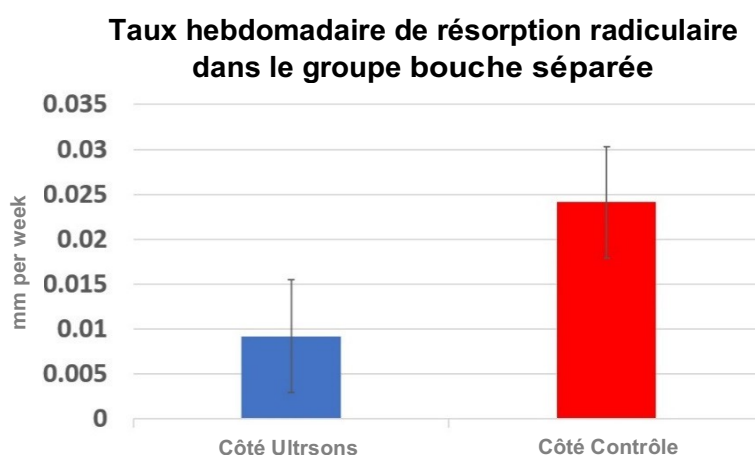


Figure 5. Comparaison du taux hebdomadaire de résorption radiculaire dans le groupe actif.

Tableau 3. Comparaison du taux hebdomadaire de résorption radiculaire entre le côté LIPUS et le côté contrôle positif dans le groupe à bouche divisée.

	Max (mm/semaine)	Min (mm/semaine)	Moyenne (mm/semaine)	SD	Pourcentage de variation *	p Valeur
LIPUS (n = 13)	0.49	-0.03	0.0092	0.0226	220.8%	0.0423
Contrôle positif (n = 13)	0.057	-0.014	0.0241	0.0223		

* Comme l'étude portait sur une bouche divisée, le pourcentage moyen de changement pour le taux de résorption radiculaire (220,8 %) a été calculé comme la moyenne des pourcentages individuels de changement pour les treize patients.

• Discussion

Outre le coût du traitement, la deuxième question la plus fréquemment posée à l'orthodontiste est la durée du traitement. Il est important de prévoir avec précision la durée du traitement et de le terminer dans les délais prévus, car cela aura non seulement un effet sur l'observance du patient, mais aussi sur la reconnaissance de l'orthodontiste à plus long terme [36,37]. Compte tenu du nombre croissant de patients adultes soumis à un traitement orthodontique, diverses méthodes sont utilisées dans la pratique pour accélérer le déplacement des dents et raccourcir la durée du traitement. Il s'agit de méthodes invasives et non invasives. La corticotomie a été l'une des premières méthodes introduites par Kole en 1959 en coupant l'os alvéolaire autour des dents [38]. LIPUS est une technique dentaire émergente qui permet d'accélérer le déplacement des dents et qui est utilisée dans le domaine médical comme outil diagnostique, opératoire et thérapeutique depuis plus de cinq décennies [27].

Cette étude clinique visait à évaluer l'effet de LIPUS sur la vitesse de déplacement des dents et les changements de longueur de la racine, en tant qu'indication de l'OITRR. Dans cette étude, on a choisi un modèle de bouche divisée, où le LIPUS a été attribué au hasard à un côté de chaque individu, afin de minimiser la variabilité entre les individus ou les sites. Le patient et les chercheurs principaux étaient tous deux aveugles quant au côté actif/placebo pendant toute la durée de l'étude. Un groupe de contrôle négatif a été utilisé dans cette étude pour éviter la possibilité de contamination croisée entre LIPUS et le côté de contrôle positif chez chaque patient. Il n'y a pas eu de différence significative entre les contrôles positifs et négatifs en ce qui concerne le taux de déplacement des dents ($p = 0,11$) et la résorption des racines ($p = 0,32$). Cela indique que tout LIPUS qui aurait pu atteindre le côté contrôle à partir du côté traitement n'a pas eu d'effet sur le mouvement des dents ou la minimisation de la résorption radiculaire. Cependant, il a été rapporté que la puissance de LIPUS s'atténue de façon exponentielle lorsqu'elle se propage dans la structure dentoalvéolaire.

Vingt-et-un patients ont terminé l'étude sur la base des critères de sélection prédéterminés et du respect de l'utilisation de l'appareil. Pour l'analyse des mouvements dentaires, il y avait dix-sept patients en bouche divisée, dont six patients en bouche divisée au niveau du maxillaire et onze patients en bouche divisée au niveau de la mandibule. Pour l'analyse de la résorption, treize patients en bouche séparée ont été inclus dans l'analyse finale, soit quatre patients en bouche séparée au maxillaire et neuf patients en bouche séparée à la mandibule. La mécanique d'arcade segmentée a été utilisée pour atténuer toute friction possible entre le fil et l'attache sur la vitesse de déplacement des dents, qui peut être un facteur de confusion. Dans la présente étude, le système intraoral LIPUS permet une augmentation statistiquement significative de la vitesse de déplacement des dents, avec un pourcentage moyen d'augmentation de 29 % de la vitesse de déplacement des dents par rapport au contrôle. Des résultats similaires ont été rapportés dans l'étude récente menée par Maurya et al [30], où l'application de LIPUS a augmenté le mouvement orthodontique des dents dans les cas de protrusion bimaxillaire.

L'OTM en réponse aux forces mécaniques externes appliquées par les fils et les appareils orthodontiques s'explique le mieux par la "théorie de la pression-tension". La direction vers laquelle la dent se déplace est le côté pression, tandis que le côté opposé est le côté tension. Du côté de la pression, l'application de la force déclenche plusieurs changements métaboliques dans la zone du ligament parodontal, provoquant une inflammation par la constriction des vaisseaux sanguins, le manque de nutriments, la hyalinisation et la mort cellulaire qui s'ensuivent [39]. La vitesse de déplacement des dents orthodontiques dépend du remodelage de l'os alvéolaire et le facteur limitant la vitesse de déplacement des dents est la résorption osseuse à l'interface de l'os et du PDL [19,40]. Les macrophages, les odontoclastes et les ostéoclastes sont recrutés dans la zone de hyalinisation pour éliminer le tissu nécrotique, ce qui entraîne la résorption du tissu minéralisé en sécrétant du phosphate acide résistant au tartrate (TRAP), de la cathepsine-K et de la métalloprotéinase matricielle-9 (MMP-9) [41,42].

Il a été démontré que LIPUS a un effet biostimulant sur les ostéoblastes et les ostéoclastes. En outre, il a été démontré que LIPUS augmente le nombre de cellules et les activités au sein du PDL, ce qui pourrait être important pour le remodelage de l'os alvéolaire [26,43]. La stimulation mécanique de LIPUS est reçue par les récepteurs de la membrane cellulaire tels que les intégrines [44,45] et les GPCR (récepteurs couplés aux protéines G) [46] pour activer différentes voies de mécanotransduction dans les cellules osseuses. Cela entraîne une augmentation de l'expression des gènes [47,48], qui à son tour entraîne une augmentation de l'expression des protéines [49]. LIPUS augmente l'expression de la protéine RANK-L (récepteur activateur du facteur nucléaire kappa-ligand) dans les ostéoclastes pour accélérer la résorption osseuse [50,51], tandis que dans les ostéoblastes, LIPUS augmente les protéines de formation osseuse RUNX2 (runt-related transcription factor 2) [52], OPG (osteoprotégerin) [53], et ALP (alkaline phosphatase) [54].

La diminution statistiquement significative de la résorption radiculaire avec l'application de LIPUS est cohérente avec les études précédentes [55]. Cela pourrait être dû à l'effet suppressif de LIPUS sur la cimentoclastogénèse [53], à l'altération de l'expression de l'OPG/RANKL pendant le déplacement orthodontique des dents [56] et à l'amélioration de la régénération des tissus, favorisant ainsi la cicatrisation parodontale [57]. Le CBCT est la seule radiographie capable d'évaluer le mouvement de la dent et la longueur de la racine en trois dimensions.

À notre connaissance, il s'agit du premier essai clinique à bouche séparée rapporté dans la littérature, où l'effet stimulant de LIPUS sur la vitesse de déplacement des dents et l'OITRR a été étudié. En outre, à notre connaissance, il n'existe pas d'autre technique que le LIPUS qui puisse minimiser l'OITRR et améliorer le mouvement des dents en même temps. Les recherches futures pourraient être orientées vers l'optimisation de la sortie de LIPUS pour l'amélioration possible du mouvement des dents et des résultats de l'OITRR.

La première limite de cette étude est la taille de l'échantillon de vingt-et-un patients dans un modèle de bouche partagée (vingt-et-une paires de données). Deuxièmement, sur les 21 patients, il y avait 16 femmes et 5 hommes. La fréquence des patients de sexe féminin dans les cabinets

d'orthodontie est plus élevée, car les femmes sont plus soucieuses de leur apparence dentaire que les hommes [58,59]. Une étude réalisée par Ashari et al [60] a également montré que les femmes étaient deux fois plus nombreuses que les hommes. À l'avenir, un essai clinique avec un échantillon plus important, une répartition égale entre les sexes et des groupes de traitement et de contrôle propres sera entrepris. La présente étude aidera à calculer la taille de l'échantillon à partir de l'écart type calculé et de la conformité de l'utilisation du dispositif.

• Conclusions

Néanmoins, cette étude doit être considérée comme ayant d'importantes implications pratiques en matière de traitement orthodontique, malgré les limites susmentionnées. LIPUS a augmenté la vitesse de déplacement des dents et a diminué la résorption radiculaire induite par l'orthodontie lorsqu'il est appliqué pendant 20 minutes par jour pendant six mois.

Sur la base des résultats de cette étude, nous rejetons l'hypothèse nulle et acceptons l'hypothèse alternative selon laquelle le côté traité par LIPUS a accéléré le mouvement des dents et réduit la résorption radiculaire par rapport au côté témoin.

Contributions des auteurs : T.E.-B., K.F., T.D.C., W.W., R.D., T.D., K.K. et B.T. ont réalisé le collage des brackets, l'insertion des arcs et les étapes suivantes du traitement des patients. T.E.-B., K.F. et K.K. ont analysé et interprété les données des patients. T.E.-B. et K.F. ont contribué à la rédaction du manuscrit. Tous les auteurs ont lu et approuvé le manuscrit final.

Financement : La présente étude a été partiellement financée par SmileSonica Inc. d'Edmonton, Canada, qui a fourni le salaire d'un assistant de recherche (à temps partiel) engagé pour coordonner la documentation dans l'un des sites. Les patients ont été indemnisés pour le stationnement de leur voiture (20 \$ par visite) pendant leur participation à l'étude.

Conflits d'intérêts : Les auteurs déclarent ne pas avoir de conflits d'intérêts.

Références

1. Jung, M.H. Evaluation des effets de la malocclusion et du traitement orthodontique sur l'estime de soi dans une population d'adolescents. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2010**, *138*, 160-166. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Rusanen, J. ; Lahti, S. ; Tolvanen, M. ; Pirttiniemi, P. Qualité de vie des patients souffrant de malocclusion sévère avant le traitement. *Eur. J. Orthod.* **2010**, *32*, 43-48. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Pabari, S. ; Moles, D.R. ; Cunningham, S.J. Assessment of motivation and psychological characteristics of adult orthodontic patients. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2011**, *140*, 263-272. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Sergl, H.G. ; Zentner, A. Étude des aspects psychosociaux du traitement orthodontique chez l'adulte. *Int. J. Adult Orthodon. Orthognath. Surg.* **1997**, *12*, 17-22.
5. Bichara, L.M. ; de Aragón, M.L.C. ; Brandão, G.A.M. ; Normando, D. Factors influencing orthodontic treatment time for non-surgical Class III malocclusion. *J. Appl. Oral. Sci.* **2016**, *24*, 431-436. [[CrossRef](#)]
6. Skidmore, K.J. ; Brook, K.J. ; Thomson, W.M. ; Harding, W.J. Facteurs influençant la durée du traitement chez les patients en orthodontie. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2006**, *129*, 230-238. [[CrossRef](#)]
7. Long, H. ; Pyakurel, U. ; Wang, Y. ; Liao, L. ; Zhou, Y. ; Lai, W. Interventions for accelerating orthodontic tooth movement : A systematic review. *Angle Orthod.* **2013**, *83*, 164-171. [[CrossRef](#)]
8. Roykó, A. ; Dénes, Z. ; Razouk, G. La relation entre la durée du traitement orthodontique et l'observance du patient. *Fogorv. Sz* **1999**, *92*, 79-86.
9. Bishara, S.E. ; Ostby, A.W. White spot lesions : Formation, prévention et traitement. *Semin. Orthod.* **2008**, *14*, 174-182. [[CrossRef](#)]
10. Pandis, N. ; Nasika, M. ; Polychronopoulou, A. ; Eliades, T. Résorption radiculaire apicale externe chez des patients traités avec des brackets conventionnels et autoligaturants. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2008**, *134*, 646-651. [[CrossRef](#)]
11. Yamaguchi, M. ; Hayashi, M. ; Fujita, S. ; Yoshida, T. ; Utsunomiya, T. ; Yamamoto, H. ; Kasai, K. L'irradiation laser à basse énergie facilite la vitesse de déplacement des dents et les expressions de la métalloprotéinase matricielle-9, cathepsine K, et de l'intégrine alpha(v) beta(3) chez les rats. *Eur. J. Orthod.* **2010**, *32*, 131-139. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Showkatbakhsh, R. ; Jamilian, A. ; Showkatbakhsh, M. The effect of pulsed electromagnetic fields on the acceleration of tooth movement. *World J. Orthod.* **2010**, *11*, 52-56.

13. Kim, D.H. ; Park, Y.G. ; Kang, S.G. The effects of electrical current from a micro-electrical device on tooth movement. *Korean J. Orthod.* **2008**, *38*, 337. [[CrossRef](#)]
14. Hassan, A.H. ; Al-Fraidi, A.A. ; Al-Saeed, S.H. Traitement orthodontique assisté par corticotomie : Review. *Open Dent. J.* **2010**, *13*, 159-164. [[CrossRef](#)]
15. Is,eri, H. ; Kis,nis,ci, R. ; Bzizi, N. ; Tüz, H. Rétraction rapide de la canine et traitement orthodontique par ostéogenèse de distraction dentoalvéolaire . *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2005**, *127*, 533-541. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Nishimura, M. ; Chiba, M. ; Ohashi, T. ; Sato, M. ; Shimizu, Y. ; Igarashi, K. ; Mitani, H. Activation du tissu parodontal par vibration : La stimulation intermittente par vibration de résonance accélère le mouvement expérimental de la dent chez les rats. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2008**, *133*, 572-583. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Ojima, K. ; Dan, C. ; Kumagai, Y. ; Schupp, W. Invisalign treatment accelerated by photobiomodulation. *J. Clin. Orthod.* **2016**, *50*, 309-317. [[PubMed](#)]
18. Isola, G. ; Matarese, G. ; Cordasco, G. ; Perillo, L. ; Ramaglia, L. Mécanobiologie du mouvement des dents pendant le traitement orthodontique : A literature review. *Minerva Stomatol.* **2016**, *65*, 299-327.
19. Huang, H. ; Williams, R.C. ; Kyrkanides, S. Mouvement dentaire orthodontique accéléré : Mécanismes moléculaires. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2014**, *146*, 620-632. [[CrossRef](#)]
20. Tsesis, I. ; Fuss, Z. ; Rosenberg, E. ; Taicher, S. Évaluation radiographique de la prévalence de la résorption radiculaire dans une population du Moyen-Orient . *Quintessence Int.* **2008**, *39*, 40-44.
21. Machen, D.E. Aspects juridiques de la pratique orthodontique : Concepts de gestion des risques. Diagnostic, résorption radiculaire, et suivi des progrès. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **1989**, *95*, 267-268. [[CrossRef](#)]
22. Franklin, E. Pourquoi les orthodontistes sont poursuivis en justice. *Semin. Orthod.* **2002**, *8*, 210-215. [[CrossRef](#)]
23. Lupi, J.E. ; Handelman, C.S. ; Sadowsky, C. Prévalence et gravité de la résorption radiculaire apicale et de la perte osseuse alvéolaire chez des adultes traités orthodontiquement. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **1996**, *109*, 28-37. [[CrossRef](#)]
24. Harris, E.F. ; Boggan, B.W. ; Wheeler, D.A. Résorption radiculaire apicale chez les patients traités par l'orthodontie complète . *J. Tenn. Dent. Assoc.* **2001**, *81*, 30-33.
25. El-Bialy, T. ; Lam, B. ; Al-Daghreer, S. ; Sloan, A.J. The effect of low intensity pulsed ultrasound in a 3D ex vivo orthodontic model. *J. Dent.* **2011**, *39*, 693-699. [[CrossRef](#)]
26. Al-Daghreer, S. ; Doschak, M. ; Sloan, A.J. ; Major, P.W. ; Heo, G. ; Scurtescu, C. ; Tsui, Y.Y. Effet des ultrasons pulsés de faible intensité sur la résorption radiculaire induite par l'orthodontie chez le chien beagle. *Ultrasound Med. Biol.* **2014**, *40*, 1187-1196. [[CrossRef](#)]
27. Tanaka, E. ; Kuroda, S. ; Horiuchi, S. ; Tabata, A. ; El-Bialy, T. Low-intensity pulsed ultrasound in dentofacial tissue engineering. *Ann. Biomed. Eng.* **2015**, *43*, 871-886. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Salem, K.H. ; Schmelz, A. Les ultrasons pulsés de faible intensité raccourcissent la durée du traitement dans la distraction tibiale ostéogénèse. *Int. Orthop.* **2014**, *38*, 1477-1482. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Heckman, J.D. ; Ryaby, J.P. ; McCabe, J. ; Frey, J.J. ; Kilcoyne, R.F. Accélération de la guérison des fractures du tibia par ultrasons pulsés non invasifs de faible intensité. *J. Bone Joint Surg. Am.* **1994**, *76*, 26-34. [[CrossRef](#)].
30. Maurya, R.K. ; Singh, H. ; Kapoor, P. ; Jain, U. ; Mitra, R. Effects of low-level laser and low-intensity pulsed ultrasound therapy on treatment duration and pain perception. *J. Clin. Orthod.* **2019**, *53*, 154-162.
31. El-Bialy, T.H. ; Royston, T.J. ; Magin, R.L. ; Evans, C.A. ; Zaki, A.E. ; Frizzell, L.A. The effect of pulsed ultrasound on mandibular distraction. *Ann. Biomed. Eng.* **2002**, *30*, 1251-1261. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Nightingale, C. ; Jones, S.P. Étude clinique des systèmes d'application de la force pour la fermeture des espaces orthodontiques. *J. Orthod.* **2003**, *30*, 229-236. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Hayashi, K. ; Uechi, J. ; Lee, S.P. ; Mizoguchi, I. Analyse tridimensionnelle des mouvements dentaires orthodontiques basée sur les systèmes d'axes hélicoïdaux XYZ et finis. *Eur. J. Orthod.* **2007**, *29*, 589-595. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Burstone, C.J. Raison d'être de l'arc segmenté. *Am. J. Orthod.* **1962**, *48*, 805-822. [[CrossRef](#)]
35. Lagravère, M.O. ; Carey, J. ; Heo, G. ; Toogood, R.W. ; Major, P.W. Changements transversaux, verticaux et antéropostérieurs de l'expansion maxillaire à ancrage osseux par rapport à l'expansion maxillaire rapide traditionnelle : Un essai clinique randomisé . *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2010**, *137*, 1-12.
36. Shia, G.J. Treatment overruns. *J. Clin. Orthod.* **1986**, *20*, 602-604.

37. Keim, R.G. ; Gottlieb, E.L. ; Nelson, A.H. ; Vogels, D.S. 2003 JCO orthodontic practice study. Part 4 : Additional breakdowns. *J. Clin. Orthod.* **2004**, *38*, 17-27.
38. Lee, W. Corticotomy for orthodontic tooth movement. *J. Korean Assoc. Oral Maxillofac. Surg.* **2018**, *44*, 251-258. [[CrossRef](#)]
39. Zainal, A.S.H. ; Yamamoto, Z. ; Zainol, A.L.Z. ; Megat, A.W.R. ; Zainal, A.Z. Cellular and molecular changes in orthodontic tooth movement. *Sci. World J.* **2011**, *11*, 1788-1803. [[CrossRef](#)]
40. Roberts, W.E. ; Huja, S. ; Roberts, J.A. Bone modeling : Biomécanique, mécanismes moléculaires et perspectives cliniques . *Semin. Orthod.* **2004**, *10*, 123-161. [[CrossRef](#)].
41. Brudvik, P. ; Rygh, P. La phase initiale de la résorption radiculaire orthodontique liée à la compression locale du ligament parodontal . *Eur. J. Orthod.* **1993**, *15*, 249-263. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Tsuchiya, M. ; Akiba, Y. ; Takahashi, I. ; Sasano, Y. ; Kashiwazaki, J. ; Tsuchiya, S. ; Watanabe, M. Comparaison des profils d'expression de la cathepsine K et de la MMP-9 dans les odontoclastes et les ostéoclastes dans la résorption physiologique de la racine chez la molaire de rat. *Arch. Histol. Cytol.* **2008**, *71*, 89-100. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. El-Bialy, T. ; El-Shamy, I. ; Graber, T.M. Repair of orthodontically induced root resorption by ultrasound in humans. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* **2004**, *126*, 186-193. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Watabe, H. ; Furuhashi, T. ; Tani-Ishii, N. ; Mikuni-Takagaki, Y. La mécanotransduction active l'intégrine $\alpha\beta_1$ et les voies de signalisation PI3K/Akt dans les ostéoblastes mandibulaires. *Exp. Cell Res.* **2011**, *317*, 2642-2649. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Xia, P. ; Wang, X. ; Qu, Y. ; Lin, Q. ; Cheng, K. ; Gao, M. ; Ren, S. ; Zhang, T. ; Li, X. La chondrogenèse induite par le TGF- β 1 des cellules souches mésenchymateuses de la moelle osseuse est favorisée par les ultrasons pulsés de faible intensité par le biais de la voie de signalisation integrin-mTOR. *Stem Cell Res. Ther.* **2017**, *8*, 281. [[CrossRef](#)]
46. Padilla, F. ; Puts, R. ; Vico, L. ; Raum, K. Stimulation de la réparation osseuse par ultrasons : A review of the possible mechanic effects. *Ultrasonics* **2014**, *54*, 1125-1145. [[CrossRef](#)]
47. Li, J.K. ; Chang, W.H. ; Lin, J.C. ; Ruaan, R.C. ; Liu, H.C. ; Sun, J.S. Cytokine release from osteoblasts in response to ultrasound stimulation. *Biomaterials* **2003**, *24*, 2379-2385. [[CrossRef](#)].
48. Fávoro-Pípi, E. ; Bossini, P. ; de Oliveira, P. ; Ribeiro, J.U. ; Tim, C. ; Parizotto, N.A. ; Alves, J.M. ; Ribeiro, D.A. ; Selistre de Araujo, H. ; Renno, A.C.M. Low-intensity pulsed ultrasound produced an increase of osteogenic genes expression during the process of bone healing in rats. *Ultrasound Med. Biol.* **2010**, *36*, 2057-2064. [[CrossRef](#)]
49. Yang, Z. ; Ren, L. ; Deng, F. ; Wang, Z. ; Song, J. Les ultrasons pulsés de faible intensité induisent une différenciation ostéogénique des cellules du ligament parodontal humain par l'activation de la signalisation de la protéine morphogénétique osseuse-smad . *J. Ultrasound Med.* **2014**, *33*, 865-873. [[CrossRef](#)]
50. Chiu, C.Y. ; Tsai, T.L. ; Vanderby, R. ; Bradica, G. ; Lou, S.L. ; Li, W.J. Osteoblastogenesis of mesenchymal stem cells in 3-D culture enhanced by low-intensity pulsed ultrasound through soluble receptor activator of nuclear factor kappa B ligand. *Ultrasound Med. Biol.* **2015**, *41*, 1842-1852. [[CrossRef](#)]
51. Rego, E.B. ; Inubushi, T. ; Miyauchi, M. ; Kawazoe, A. ; Tanaka, E. ; Takata, T. ; Tanne, K. La stimulation par ultrasons atténue la résorption radiculaire des molaires replantées chez le rat et entrave la signalisation du facteur de nécrose tumorale- α in vitro. *J. Periodont. Res.* **2011**, *46*, 648-654. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. Akagi, H. ; Nakanishi, Y. ; Nakanishi, K. ; Matsubara, H. ; Hirose, Y. ; Wang, P.L. ; Ochi, M. Influence de la stimulation par ultrasons pulsés de faible intensité sur l'expression des gènes liés aux os dans les cellules de la moelle osseuse du rat. *J. Hard Tissue Biol.* **2016**, *25*, 1-5. [[CrossRef](#)]
53. Inubushi, T. ; Tanaka, E. ; Rego, E.B. ; Ohtani, J. ; Kawazoe, A. ; Tanne, K. ; Miyauchi, M. ; Takata, T. La stimulation ultrasonore atténue la résorption de la racine dentaire induite par l'application d'une force expérimentale. *Bone* **2013**, *53*, 497-506. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
54. Unsworth, J. ; Kaneez, S. ; Harris, S. ; Ridgway, J. ; Fenwick, S. ; Chenery, D. ; Harrison, A. Les ultrasons pulsés de faible intensité améliorent la minéralisation dans les cellules préostéoblastes. *Ultrasound Med. Biol.* **2007**, *33*, 1468-1474. [[CrossRef](#)].
55. Raza, H. ; Major, P. ; Dederich, D. ; El-Bialy, T. Effet des ultrasons pulsés de faible intensité sur la résorption radiculaire induite orthodontiquement par le couple : A prospective, double-blind, controlled clinical trial. *Angle Orthod.* **2016**, *86*, 550-557. [[CrossRef](#)]

56. Dalla-Bona, D.A. ; Tanaka, E. ; Inubushi, T. ; Oka, H. ; Ohta, A. ; Okada, H. ; Miyauchi, M. ; Takata, T. ; Tanne, K. Cementoblast response to low- and high-intensity ultrasound. *Arch. Oral Biol.* **2008**, *53*, 318-323. [[CrossRef](#)]
57. Rego, E.B. ; Inubushi, T. ; Kawazoe, A. ; Tanimoto, K. ; Miyauchi, M. ; Tanaka, E. ; Takata, T. ; Tanne, K. La stimulation ultrasonore induit la synthèse de PGE2 favorisant la différenciation cémentoblastique par la voie du récepteur EP2/EP4 . *Ultrasound Med. Biol.* **2010**, *36*, 907-915. [[CrossRef](#)].
58. Baldwin, D.C. Apparence et esthétique en santé bucco-dentaire. *Commun. Dent. Oral Epidemiol.* **1980**, *8*, 244-256. [[CrossRef](#)]
59. Grzic', R. ; Spalj, S. ; Lajnert, V. ; Glavicic', S. ; Uhac, I. ; Pavicic', D.K. Factors influencing a patient's decision to choose the type of treatment to improve dental esthetics. *Vojnosanit Pregl.* **2012**, *69*, 978-985. [[CrossRef](#)]
60. Ashari, A. ; Mohamed, A.M. Relation entre l'indice d'esthétique dentaire et la qualité de vie liée à la santé bucco-dentaire. *Angle Orthod.* **2016**, *86*, 337-342. [[CrossRef](#)]



2020 par les auteurs. Licencié MDPI, Bâle, Suisse. Cet article est un article en libre accès distribué selon les termes et conditions de la Creative Commons Attribution (CC BY) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).