



Article

# Réduction de la durée globale du traitement orthodontique grâce aux ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS)

Harmanpreet Kaur <sup>1</sup> et Tarek El-Bialy <sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Division de biologie orale, École de médecine dentaire, Katz Group for Pharmacy and Health Research, Université de l'Alberta, Edmonton, AB T6G 2E1, Canada ; kaur3@ualberta.ca

<sup>2</sup> Division d'orthodontie, École dentaire, Katz Group for Pharmacy and Health Research, Université de l'Alberta, Edmonton, AB T6G 1C9, Canada

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

25 mars 2020 ; Accepté : 22 avril 2020 ; Publié : 1er mai 2020



**Résumé :** L'objectif de cette étude clinique rétrospective était de déterminer s'il y avait une réduction de la durée totale du traitement chez les patients orthodontiques utilisant des ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) et des aligneurs clairs Invisalign SmartTrack®. Les données ont été recueillies auprès des trente-quatre premiers patients (9 hommes, 25 femmes ; âge moyen  $41,37 \pm 15,02$ ) qui ont terminé leur traitement orthodontique à l'aide d'un appareil LIPUS intra-oral et les gouttières transparentes Invisalign dans une clinique privée. Les paramètres LIPUS utilisés par les patients à domicile pendant 20 min/jour étaient les suivants : fréquence ultrasonique de 1,5 MHz, durée d'impulsion de 200  $\mu$ s, fréquence de répétition des impulsions de 1 kHz et intensité moyenne spatiale-temporelle de  $30\text{mW}/\text{cm}^2$ . Un contrôle (11 hommes, 23 femmes ; âge moyen  $31,36 \pm 14,41$ ) correspondant pour les mêmes malocclusions a été choisis au hasard parmi les cas de traitement terminés du même clinicien. La date de la première mise en place de l'attache Invisalign et de la première utilisation de l'application LIPUS a été notée  $T_0$ , et la date de livraison de l'appareil de rétention a été notée  $T_1$ . La durée du traitement ( $T_1 - T_0$ ) et le pourcentage de réduction du traitement avec le dispositif LIPUS ont été recueillis et analysés à l'aide d'un test t à deux échantillons dans Microsoft Excel. La durée du traitement a été significativement réduite dans le groupe LIPUS ( $541,44 \pm 192,23$  jours) par rapport au groupe contrôle ( $1061,05 \pm 455,64$  jours) ( $p < 0,05$ ). Le groupe LIPUS a montré une réduction moyenne de 49 % de la durée totale du traitement par rapport au groupe t contrôle. L'observance moyenne des patients en utilisant LIPUS était de 66,02 %. Les patients qui ont utilisé LIPUS ont montré une réduction cliniquement significative de la durée totale du traitement orthodontique par rapport au groupe de contrôle qui a utilisé uniquement des gouttières transparentes Invisalign.

**Mots clés :** mouvement dentaire orthodontique ; thérapie non invasive ; ultrasons pulsés de faible intensité ; LIPUS ; aligneurs transparents

## 1. Introduction

La malocclusion se définit comme un mauvais alignement des dents et/ou des mâchoires dans l'une ou l'autre des trois dimensions de l'espace. Elle peut entraîner une usure anormale des surfaces dentaires, des difficultés à parler et à mâcher, une tension sur l'os alvéolaire et les gencives qui le soutiennent, ainsi qu'un éventuel dysfonctionnement de l'articulation temporo-mandibulaire [1]. Les racines des dents sont recouvertes d'un tissu minéralisé spécial, l'émail, qui est relié à l'os alvéolaire par l'intermédiaire d'un tissu conjonctif mou très vascularisé, le ligament parodontal (LDP)[2]. Contrairement au mouvement physiologique des dents, le mouvement orthodontique des dents (OTM) est un processus complexe de remodelage osseux qui se produit en réponse aux forces mécaniques appliquées de l'extérieur par l'intermédiaire de fils et des brackets ou des gouttières transparentes [3]. Différents types de cellules osseuses se trouvent dans l'os alvéolaire, notamment les ostéoblastes, les ostéoclastes, ostéocytes et cellules du revêtement osseux [4].

L'OTM a d'abord été décrite comme la théorie "pression-tension" par Oppenheim [5] et Schwarz [6]. Pendant l'OTM, le côté vers lequel la dent se déplace est le côté pression, tandis que le côté opposé est le côté tension. La compression des vaisseaux sanguins dans le LDP du côté de la pression entraîne une diminution du flux de nutriments, une sténose et la formation de tissus nécrotiques [7,8]. Ce processus inflammatoire provoque la migration de cellules phagocytaires, comme les macrophages, les cellules géantes et les ostéoclastes, ce qui entraîne une résorption osseuse du côté de la pression de la LDP. La résorption osseuse à l'interface entre l'os et de la PDL est le facteur limitant la vitesse de l'OTM [9]. Un facteur important de la réussite de la pratique orthodontique est l'estimation précise ou approximative de la durée du traitement. Avec un nombre croissant de patients adultes demandant un traitement orthodontique, où l'OTM est connue pour être plus lente que chez les adolescents, la recherche et l'innovation dans le domaine de l'orthodontie conduit à la modification des protocoles de traitement. Par exemple, la modification de la biomécanique orthodontique par l'utilisation de techniques orthodontiques à faible frottement ou sans frottement, et le développement de diverses techniques pour accélérer la OTM, y compris les agents pharmacologiques (par exemple, l'hormone parathyroïdienne), la Vitamine D3, les Prostaglandines) [10], les champs magnétiques [11], la corticotomie [12], l'ostéogénèse par distraction [13], le laser de faible intensité [14] et les vibrations mécaniques [15].

Les ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) sont l'une des méthodes non invasives et non pharmacologiques pour d'accélérer l'OTM qui a été utilisée dans le domaine médical depuis plus de six décennies comme dans la Médecine sportive, la thérapie myofonctionnelle, la réduction de la sensibilité des articulations, l'augmentation de la mobilité musculaire et la guérison des fractures osseuses non cicatrisants [16]. Il s'agit d'une forme d'onde de pression acoustique qui, lorsqu'elle traverse les dans les tissus vivants, provoque une déformation micromécanique qui entraîne une cascade d'événements moléculaires [17]. Dans les études in vitro, animales et humaines précédentes, LIPUS a montré qu'il réduisait la résorption des racines dentaires induite par l'orthodontie (OITRR), qu'il accélérerait le mouvement des dents orthodontiques et qu'il augmentait l'expression du collagène 1 (Col1), de la phosphatase alcaline (ALP), de l'ostéoprotégérine (OPG) et du récepteur activateur du facteur nucléaire kappa -ligand (RANK-L) [2,18-23]. L'objectif de cette étude rétrospective était d'analyser la durée totale du traitement et le pourcentage de réduction du traitement, le cas échéant, chez les patients utilisant un système LIPUS dans le commerce pour une utilisation intrabuccale avec des gouttières transparentes Invisalign et de comparer ces variables avec les patients traités uniquement avec des gouttières transparentes Invisalign.

## 2. Méthodes

### 2.1. Conception de l'étude

Cette étude clinique rétrospective a été approuvée par le Comité d'éthique de la recherche humaine de l'Université d'Alberta, Canada (numéro de protocole Pro00032422). Les données des trente-quatre premiers patients (9 hommes, 25 femmes; âge moyen  $41,37 \pm 15,02$ ) qui ont terminé leur traitement orthodontique avec l'appareil intraoral LIPUS en même temps qu'ils utilisaient les gouttières transparentes Invisalign dans une clinique privée ont été collectées et analysées. Le même orthodontiste a effectué toutes les procédures orthodontiques. Un groupe de contrôle (11 hommes, 23 femmes ; âge moyen  $31,36 \pm 14,41$ ) correspondant à la même malocclusion que le groupe LIPUS a été sélectionné au hasard parmi les cas de traitement terminés de la clinique. Les critères d'inclusion suivants ont été appliqués:

1. Une bonne hygiène bucco-dentaire
2. Dentition permanente complète
3. Patients sans antécédents médicaux
4. Patients sans antécédents médicamenteux
5. Femmes non enceintes
6. Patients suivant un traitement orthodontique avec des gouttières transparentes uniquement

Aucun autre critère supplémentaire n'a été appliqué lors de la sélection du groupe de contrôle, à l'exception des critères suivants cas avec le type de malocclusion. Tous les cas ont été traités par un traitement de non-extraction. Un consentement éclairé a été signé par tous les patients et/ou tuteurs pour l'utilisation de leurs données à des fins de recherche. Tous les patients ont été traités par des gouttières transparentes Invisalign SmartTrack® (Align Technology, Santa Clara, CA, USA) programmées à la vitesse par défaut de déplacement des dents de 0,25 mm maximum par gouttière.

Tous les patients ont reçu des instructions sur la manière de placer et de retirer leurs gouttières de la bouche. Ils ont été invités à porter leurs gouttières pendant 20 à 22 heures par jour et à les changer dès qu'elles se détachent.

## 2.2. Dispositif LIPUS

Le LIPUS a été appliqué à l'aide du système Aevo (SmileSonica Inc., Edmonton, AB, Canada). Le LIPUS les paramètres de l'appareil sont les suivants: fréquence ultrasonique de 1,5MHz, durée d'impulsion de 200  $\mu$ s, fréquence de répétition des impulsions de 1kHz et intensité moyenne spatiale-temporelle de 30mW/cm<sup>2</sup>. Il s'agit d'un appareil non invasif, alimenté par batterie, portable et destiné à être utilisé 20 minutes par jour à domicile. L'appareil se compose de trois éléments principaux (fig. 1).



**Figure 1.** Appareil à ultrasons pulsés de faible intensité (LIPUS) (système Aevo). (A) : dispositif électronique portable ; (B) : embouts buccaux ; et (C) : gel de couplage ultrasonore.

- A: Appareil électronique portatif: Il contrôle l'administration du traitement LIPUS et fournit des informations sur la procédure et l'état du traitement. Il est alimenté par une batterie rechargeable. Les informations affichées à l'écran comprennent l'état actuel de l'appareil, la durée de traitement restante, le niveau de charge de la batterie, ainsi que la date et l'heure actuelles. L'appareil conserve également un enregistrement complet des paramètres de traitement.
- B: Embouts buccaux: Le dispositif comporte deux embouts buccaux, l'un pour le traitement de l'arcade mandibulaire et l'autre pour le traitement de l'arcade maxillaire. Chaque embout est

semblable à un protège-dents et se compose de 10 émetteurs d'ultrasons placés à l'intérieur d'une encapsulation biocompatible flexible. Tous les composants internes sont hermétiquement fermés pour éviter tout contact avec la salive. L'embout buccal est relié à l'électronique portable par un câble.

C: Gel de couplage ultrasonique: Un gel insipide fourni dans des sachets à usage unique est appliqué sur les parois internes de l'embout buccal avant le début de chaque traitement. Les patients ont reçu l'instruction d'appliquer un L'os alvéolaire doit être recouvert d'une fine couche d'eau afin que LIPUS puisse être correctement transmis de l'embout buccal à l'os alvéolaire entourant les racines des dents, en passant par les gencives.

### 2.3. Collecte de données

Les données générales, telles que l'âge, le sexe, le type de malocclusion et les dates de début et de fin du traitement orthodontique Invisalign, ont été recueillies. La date de la première pose de l'attache Invisalign et de la première application de LIPUS a été notée T0, et la date du retrait de l'attache Invisalign a été notée T1. La durée du traitement, c'est-à-dire T1-T0, le nombre moyen de jours par gouttière ont été recueillis et analysés, et le pourcentage de réduction globale du traitement a été calculé.

$$\text{Globalement traitement réduction pourcentage} = \left[ \frac{\text{Jours de traitement moyen}_{\text{Contrôle}} - \text{Jours de traitement moyen}_{\text{LIPUS}}}{\text{Nombre moyen de jours de traitement}_{\text{Contrôle}}} \right] \times 100$$

### 2.4. Analyse statistique

Des statistiques descriptives (moyenne et écart-type) ont été calculées pour toutes les variables recueillies dans les deux groupes. Des comparaisons statistiques avec le test-t de Student pour échantillons indépendants ont été réalisées sur la durée de traitement T1-T0 et sur le nombre moyen de jours par plateau. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de Microsoft Excel 2016, la valeur p inférieure à 0,05 étant considérée comme significative.

## 3. Résultats

### 3.1. Thèmes

Sujets : Sur les trente-quatre patients traités avec le dispositif LIPUS, il y avait 9 hommes et 25 femmes. L'âge moyen du groupe traité par LIPUS était de 41,37 ± 15,02 (minimum 16 ans et 4 mois et maximum 72 ans). Le groupe contrôle comptait 11 hommes et 23 femmes. L'âge moyen du groupe contrôle était de 31,36 ± 14,41 (minimum 15 ans et maximum 64 ans et 6 mois).

Le nombre de patients dans chaque classe de malocclusion est présenté dans le tableau 1.

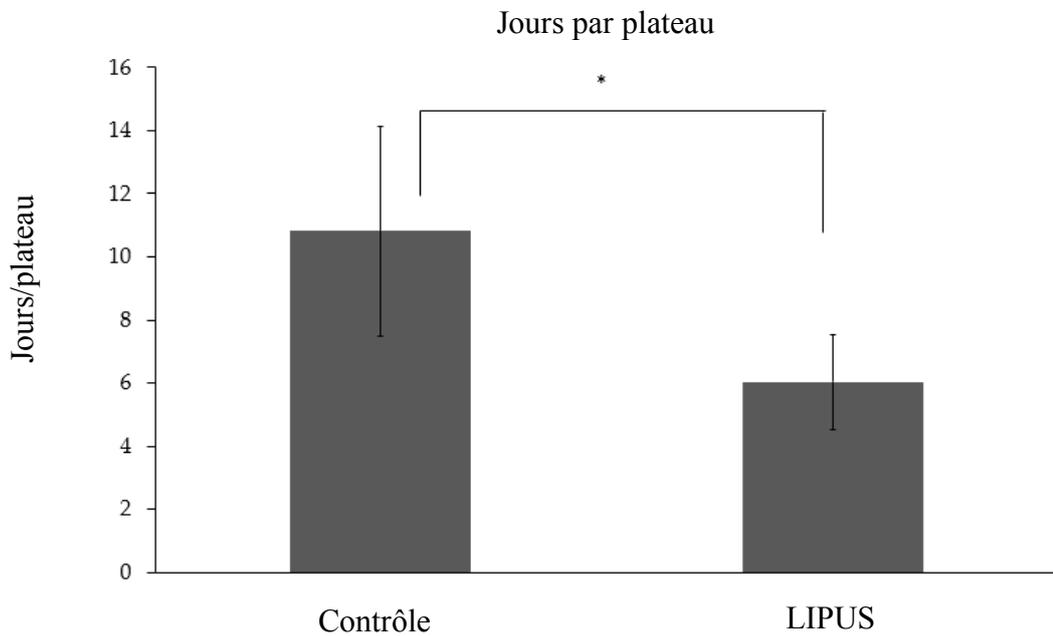
**Tableau 1.** Nombre de patients dans chaque classe de malocclusion.

|            | Contrôle | LIPUS |
|------------|----------|-------|
| Classe I   | 7        | 7     |
| Classe II  | 13       | 13    |
| Classe III | 14       | 14    |

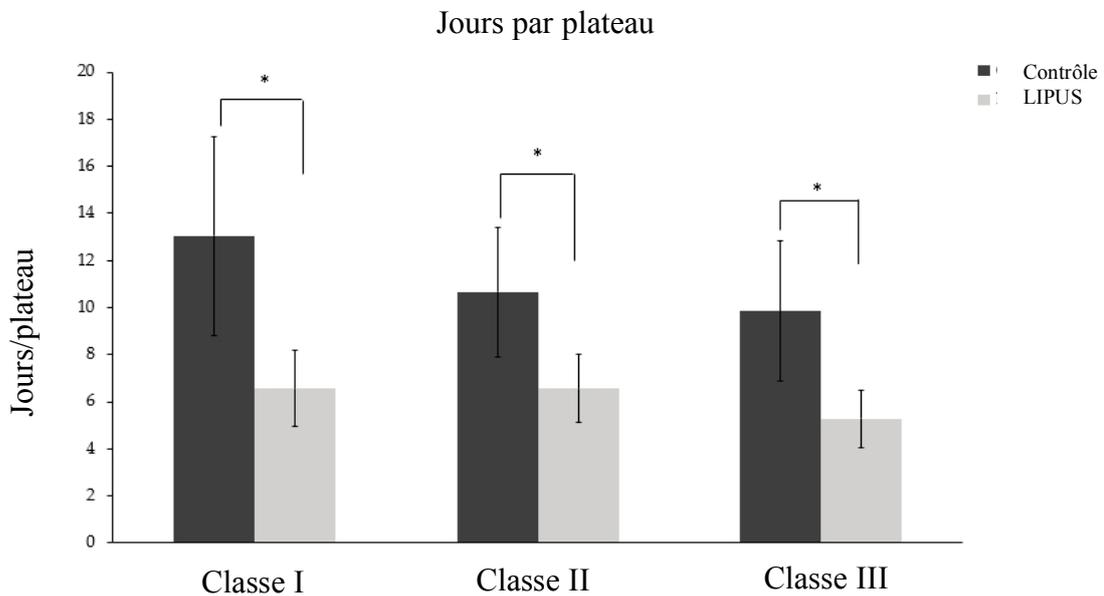
### 3.2. Nombre de jours par plateau

Les patients traités avec le dispositif LIPUS (6,02 ± 1,49) ont montré une différence significative dans le nombre de jours par gouttière portée par rapport au groupe témoin (10,81 ± 3,31) (p < 0,05) (Figure 2). La figure 3 représente le nombre de jours par gouttière pour chaque

malocclusion, et la différence était statistiquement significative pour chaque type de malocclusion.



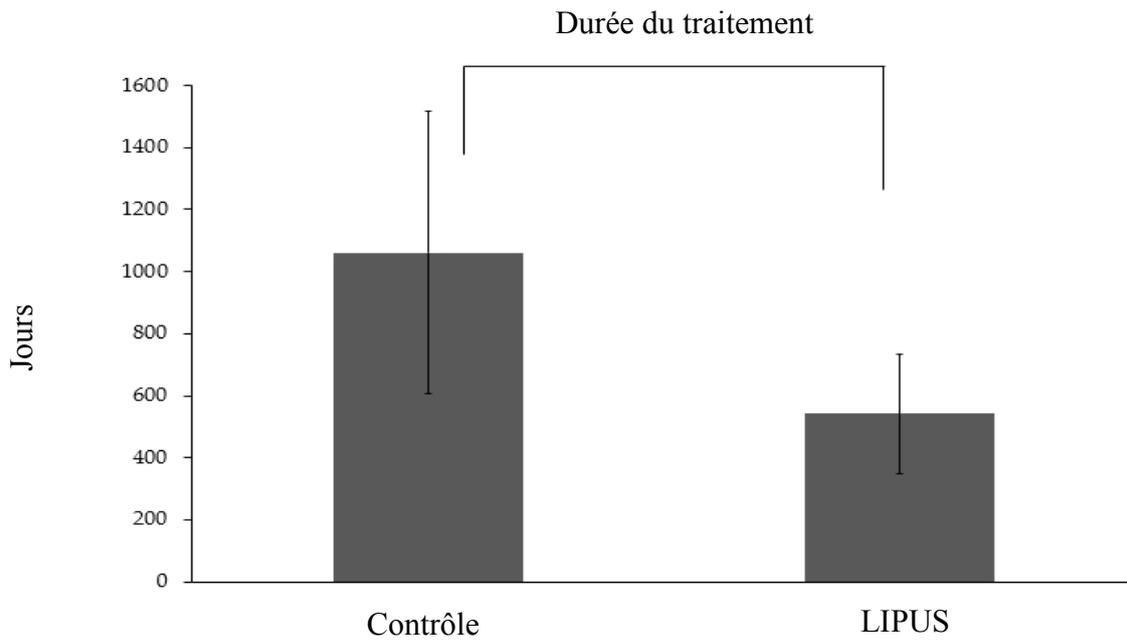
**Figure 2.** Nombre moyen de jours par plateau/aligneur dans le groupe témoin et le groupe traité par LIPUS (\* $p < 0,05$ ).



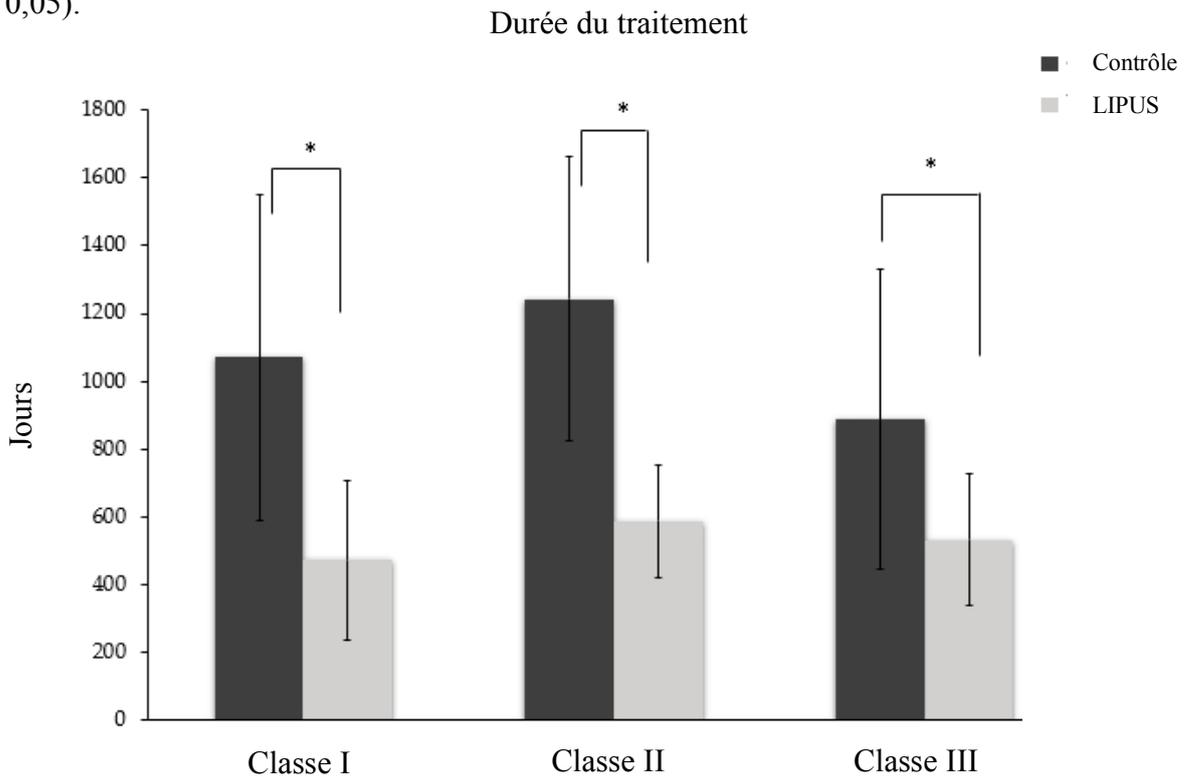
**Figure 3.** Nombre moyen de jours par plateau pour les malocclusions de classe I, de classe II et de classe III (\* $p < 0,05$ ).

### 3.3. Durée du traitement

La durée du traitement a été significativement réduite chez les patients traités par LIPUS ( $541,44 \pm 192,23$  jours) par rapport au groupe contrôle ( $1061,05 \pm 455,64$  jours) ( $p < 0,05$ ) (Figure 4), et la différence était statistiquement significative pour chaque malocclusion ( $p < 0,05$ ) (Figure 5).



**Figure 4.** Durée moyenne du traitement dans le groupe témoin et le groupe LIPUS (\* $p < 0,05$ ).



**Figure 5.** Durée moyenne du traitement pour les malocclusions de classe I, de classe I I et de classe III (\* $p < 0,05$ ).

Au total, les patients traités avec LIPUS pendant leur traitement orthodontique avec Invisalign ont montré une réduction de 49 % de la durée totale du traitement par rapport aux patients subissant un traitement orthodontique avec Invisalign uniquement. L'observance moyenne des patients utilisant le système Aevo était de 66,02 % selon la puce électronique interne intégrée au système Aevo qui enregistre chaque fois que le patient utilise le système Aevo. [23].

#### 4. Discussion

Avec l'augmentation du nombre de patients adultes pour le traitement orthodontique et l'intérêt pour l'accélération du mouvement des dents afin de raccourcir la durée du traitement, de nombreuses technologies ont été développées et beaucoup sont encore en phase de recherche et de développement.

LIPUS est l'une de ces formes de technologie non-invasive qui est utilisée dans le domaine médical depuis plus de six décennies. Dans le domaine dentaire, il a permis d'accélérer de manière significative le mouvement orthodontique des dents et de réduire la résorption des racines dentaires induite par l'orthodontie dans des études sur l'animal et sur l'homme [21,22,24]. Dans un essai clinique prospectif multicentrique randomisé et contrôlé [23], le taux de déplacement des dents a augmenté en moyenne de 29 %. La présente étude clinique rétrospective a analysé l'effet de LIPUS sur la réduction du temps de traitement orthodontique à l'aide des aligneurs transparents Invisalign. Les résultats ont montré que les patients utilisant le système LIPUS pendant le traitement orthodontique ont pu raccourcir la durée totale du traitement a été réduite en moyenne de 49 % par rapport au groupe contrôle, tandis que l'observance moyenne avec le système LIPUS a été de 66,02 %. La différence entre les deux études pourrait s'expliquer par le fait que dans l'essai clinique multicentrique [23], le traitement orthodontique a été réalisé à l'aide d'appareils orthodontiques fixes par 5 cliniciens différents; en revanche, dans la présente étude, le traitement a été réalisé par un seul orthodontiste à l'aide d'aligneurs transparents.

L'OTM est un processus de remodelage osseux dans lequel interviennent différents types de cellules, tels que les ostéoblastes, les ostéoclastes et les ostéocytes. La résorption osseuse, provoquée par l'activation des ostéoclastes, est régulée par la famille des récepteurs-ligands du facteur de nécrose tumorale (TNF), qui comprend l'OPG, le récepteur activateur du facteur nucléaire kappa (RANK) et le RANK-ligand (RANK-L). Lors d'un stress mécanique en cas d'application d'une force orthodontique, les ostéocytes libèrent RANK-L, qui se lie à RANK, stimulant la fusion des pré-ostéoblastes, la différenciation des ostéoclastes, leur prolifération et leur survie [25-27]. L'OPG est un récepteur soluble leurre qui empêche la liaison de RANK-L à RANK, inhibant ainsi la formation d'ostéoclastes [28]. RANK-L et OPG jouent un rôle important dans la régulation du remodelage osseux pendant le déplacement des dents [29]. En outre, le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire (VEGF) augmente pendant l'OTM, ce qui empêche l'apoptose des ostéoblastes, stimule le recrutement des cellules et favorise la formation de nodules minéralisés et la libération d'ALP [30,31]. Plusieurs facteurs ont un effet sur l'OTM, notamment l'ampleur de la force orthodontique, le type de mouvement dentaire et la santé générale et parodontale du patient [32,33]. Avec un nombre croissant de patients de toutes les tranches d'âge, les orthodontistes doivent envisager différentes modalités de traitement pour un traitement plus efficace et plus sûr, en plus d'appliquer des forces plus faibles pour l'OTM [34]. Le taux accéléré de déplacement des dents dans cette étude pourrait être dû au fait que LIPUS induit une déformation affectant les récepteurs mécanosensibles, tels que les intégrines, des canaux activés par l'étirement sur la membrane cellulaire [35]. Ces récepteurs initient ensuite la cascade d'événements cellulaires et moléculaires dans la cellule, connue sous le nom de mécanotransduction. Plusieurs voies de signalisation cellulaire, telles que la kinase d'adhésion focale (FAK) [36], la protéine kinase activée par les mitogènes (MAPK) [37] et les voies Rho [38], ont montré les études in vitro avec l'application de LIPUS. Grâce à ces mécanismes, LIPUS a permis d'améliorer la formation osseuse et la différenciation des ostéoblastes dans les cas de guérison de fractures. Il a également été démontré qu'il favorise l'angiogenèse en régulant à la hausse l'expression du VEGF dans les ostéoblastes humains [39], la cicatrisation des plaies [40], l'ostéogenèse précoce en régulant à la hausse le facteur de croissance analogue à l'insuline qui médie l'expression de l'ostéonectine [41,42], et l'augmentation de l'expression des marqueurs ostéogéniques, à savoir le collagène I [43], l'ostéocalcine [44], l'ostéopontine et la sialoprotéine osseuse [45,46]. LIPUS augmente la

prolifération des cellules ostéoprogénitrices avec une expression accrue de la protéine morphogénétique osseuse 2 (BMP-2), de la BMP-7 et du facteur de transcription lié au runt (Runx2) [39,47,48]. Runx2 est un facteur de transcription pour la différenciation des ostéoblastes à partir de cellules souches mésenchymateuses. Une étude de Xue et al. [24] a montré une augmentation du remodelage de l'os alvéolaire en augmentant l'expression de Runx2 et de BMP-2 dans le modèle orthodontique du rat, augmentant ainsi la vitesse de l'OTM. Il semble que le mécanisme d'accélération de l'OTM par LIPUS présente des similitudes avec d'autres techniques d'accélération, telles que le laser, les vibrations à haute fréquence et la corticotomie, qui agissent par le biais de la voie RANK-RANKL. Cela pourrait justifier une étude plus approfondie afin de comparer toutes les techniques à cet égard.

Bien qu'il ait été prouvé dans de nombreuses études que LIPUS augmentait l'expression des marqueurs ostéogéniques, il a également été démontré qu'il régulait la différenciation des ostéoclastes par l'expression de l'OPG/RANK-L. LIPUS à l'intensité de 100 et 150 mW/cm<sup>2</sup> a montré une diminution du nombre et de l'activité des ostéoclastes, et une augmentation l'expression de l'OPG/RANK-L chez les rats traités par LIPUS [49]. Dans une autre étude [50], le gène RANK-L était la plus profonde au cours de la troisième semaine d'application de LIPUS ; d'autre part, l'expression de l'OPG est restée constante pendant trois semaines dans une culture cellulaire d'ostéoblastes murins. Cela implique que LIPUS renforce l'ostéoclastogenèse pendant la régénération osseuse. Dans une étude de Feres et al [51], LIPUS a montré une augmentation de l'activité des ostéoclastes en l'absence d'ostéoblastes. Ces constatations confirment les résultats de notre étude rétrospective actuelle, à savoir que du côté de la compression de l'application de la force orthodontique, LIPUS augmente l'activité ostéoclastique, tandis que du côté de la tension, LIPUS accélère l'activité ostéoblastique et améliore la régénération osseuse, ce qui accélère le mouvement des dents et est sans danger [52,53]. Un autre avantage de l'utilisation de LIPUS pendant le traitement orthodontique est l'effet préventif sur la résorption radiculaire. Bien que dans l'étude actuelle nous n'ayons pas analysé l'effet de LIPUS sur la résorption radiculaire, des études cliniques antérieures [21-23], cependant, ont montré une diminution de la résorption radiculaire induite par l'orthodontie en utilisant les mêmes paramètres de traitement LIPUS. L'étude rétrospective actuelle permet de surmonter certaines des limites rencontrées lors d'un essai clinique précédent [23], en particulier le petit nombre de patients inclus dans le modèle de bouche divisée (21 paires de données provenant de 21 patients à bouche divisée) et le fait que l'effet de LIPUS n'a été étudié que pendant la fermeture de l'espace chez les patients atteints de malocclusion de classe II nécessitant l'extraction d'une première prémolaire. L'étude actuelle étend les connaissances à toutes les classes de malocclusions, utilise un plus grand nombre de sujets (34 patients actifs et 34 patients témoins) et examine la durée totale du traitement.

## 5. Conclusions

Dans l'étude actuelle, les patients traités avec le LIPUS ont montré un mouvement dentaire plus rapide et une réduction de la durée totale du traitement de 49 % en moyenne, tandis que la conformité moyenne à l'utilisation du dispositif LIPUS était de 66,02 %. Cette étude a démontré que l'utilisation de LIPUS par le système Aevo pendant un traitement orthodontique à l'aide de gouttières transparentes a permis de réduire de manière significative la durée totale du traitement.

**Contributions des auteurs:** Conceptualisation, H.K. et T.E.-B.; collecte et analyse des données, H.K. et T.E.-B.; investigation, H.K. et T.E.-B.; rédaction - préparation de la version originale, H.K.; rédaction - révision et édition, T.E.-B.; supervision, T.E.-B. Tous les auteurs ont lu et approuvé la version publiée du manuscrit.

**Financement :** Cette recherche n'a bénéficié d'aucun financement externe.

**Conflits d'intérêts :** H.K. est un ancien étudiant en doctorat de T.E.B. et a travaillé à SmileSonica Inc. T.E.B. ne déclare aucun intérêt financier avec SmileSonica Inc.

## Références

1. Batista, K.B. ; Thiruvengkatachari, B. ; Harrison, J.E. ; O'Brien, K.D. Traitement orthodontique pour les dents antérieures supérieures proéminentes (malocclusion de classe II) chez les enfants et les adolescents. *Cochrane Database Syst. Rev.* **2018**, *3*, 1-89. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. 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](#)] [[PubMed](#)]
3. 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.
4. Maleeh, I. ; Robinson, J. ; Wadhwa, S. Role of alveolar bone in mediating orthodontic tooth movement and relapse. Dans *Biology of Orthodontic Tooth Movement : Current Concepts and Applications in Orthodontic Practice* ; Shroff, B., Ed. ; Springer : Cham/Bâle, Suisse, 2016 ; pp. 1-12.
5. Oppenheim, A. Changements tissulaires, en particulier de l'os, liés au mouvement des dents. *Eur. J. Orthod.* **2007**, *29*, i2-i15. [[CrossRef](#)].
6. Schwarz, A.M. Tissue changes incidental to orthodontic tooth movement. *Int. J. Orthod. Oral Surg. Radiogr.* **1932**, *18*, 331-352. [[CrossRef](#)]
7. Rygh, P. Ultrastructural changes of the periodontal fibers and their attachment in rat molar periodontium incident to orthodontic tooth movement. *Eur. J. Oral Sci.* **1973**, *81*, 467-480. [[CrossRef](#)]
8. Reitan, K. The initial tissue reaction incident to orthodontic tooth movement as related to the influence of function, an experimental histologic study on animal and human material. *Acta Odontol. Scand. Suppl.* **1951**, *6*, 1- 240.
9. Huang, H. ; Williams, R.C. ; Kyrkanides, S. Mouvement dentaire orthodontique accéléré : Mécanismes moléculaires. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **2014**, *146*, 620-632. [[CrossRef](#)]
10. Almpiani, K. ; Kantarci, A. Méthodes non chirurgicales pour l'accélération du mouvement orthodontique des dents. *Front Oral Biol.* **2016**, *18*, 80-91.
11. Showkatbakhsh, R. ; Jamilian, A. ; Showkatbakhsh, M. The effect of pulsed electromagnetic fields on the acceleration of tooth movement. *World J. Orthod.* **2010**, *11*, e52-e56.
12. 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](#)] [[PubMed](#)]
13. 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. Dentofac. Orthop.* **2005**, *127*, 533-541. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. 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](#)]
15. 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. Dentofac. Orthop.* **2008**, *133*, 572-583. [[CrossRef](#)]
16. Ter Haar, G. Applications thérapeutiques des ultrasons. *Prog. Biophys. Mol. Biol.* **2007**, *93*, 111-129. [[CrossRef](#)]
  17. Dinno, M.A. ; Dyson, M. ; Young, S.R. ; Mortimer, A.J. ; Hart, J. ; Crum, L.A. The significance of membrane changes in the safe and effective use of therapeutic and diagnostic ultrasound. *Phys. Med. Biol.* **1989**, *34*, 1543-1552. [[CrossRef](#)]
  18. 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](#)]
  19. Al-Daghreer, S. ; Doschak, M. ; Sloan, A.J. ; Major, P.W. ; Heo, G. ; Scurtescu, C. ; Tsui, Y.Y. ; El-Bialy, T. Long term effect of low intensity pulsed ultrasound on a human tooth slice organ culture. *Arch. Oral Biol.* **2012**, *57*, 760-768. [[CrossRef](#)]
  20. Al-Daghreer, S. ; Doschak, M. ; Sloan, A.J. ; Major, P.W. ; Heo, G. ; Scurtescu, C. ; Tsui, Y.Y. ; El-Bialy, T. Effect of low-intensity pulsed ultrasound on orthodontically induced root resorption in beagle dogs. *Ultrasound Med. Biol.* **2014**, *40*, 1187-1196. [[CrossRef](#)]
  21. Raza, H. ; Major, P. ; Dederich, D. ; El-Bialy, T. Effect of low-intensity pulsed ultrasound on orthodontically induced root resorption caused by torque : A prospective, double-blind, controlled clinical trial. *Angle Orthod.* **2016**, *86*, 550-557. [[CrossRef](#)]
  22. El-Bialy, T. ; El-Shamy, I. ; Graber, T.M. Repair of orthodontically induced root resorption by ultrasound in humans. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **2004**, *126*, 186-193. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
  23. El-Bialy, T. ; Farouk, K. ; Carlyle, T.D. ; Wiltshire, W. ; Drummond, R. ; Dumore, T. ; Knowlton, K. ; Tompson, B. Effect of low intensity pulsed ultrasound (LIPUS) on tooth movement and root resorption : A prospective multi-center randomized controlled trial. *J. Clin. Med.* **2020**, *16*, 804. [[CrossRef](#)]
  24. Xue, H. ; Zheng, J. ; Cui, Z. ; Bai, X. ; Li, G. ; Zhang, C. ; He, S. ; Li, W. ; Lajud, S.A. ; Duan, Y. ; et al. Low-intensity pulsed ultrasound accelerates tooth movement via activation of the BMP-2 signaling pathway. *PLoS ONE* **2013**, *8*, e68926. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
  25. Matsumoto, K. ; Shimo, T. ; Kurio, N. ; Okui, T. ; Ibaragi, S. ; Kunisada, Y. ; Obata, K. ; Masui, M. ; Pai, P. ; Horikiri, Y. ; et al. Low-intensity pulsed ultrasound stimulation promotes osteoblast differentiation through hedgehog signaling. *J. Cell Biochem.* **2018**, *119*, 4352-4360. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
  26. Nakashima, T. ; Hayashi, M. ; Fukunaga, T. ; Kurata, K. ; Oh-Hora, M. ; Feng, J.Q. ; Bonewald, L.F. ; Kodama, T. ; Wutz, A. ; Wagner, E.F. ; et al. Evidence for osteocyte regulation of bone homeostasis through RANKL expression. *Nat. Med.* **2011**, *17*, 1231-1234. [[CrossRef](#)]
  27. Sasaki, T. Différentiation et fonctions des ostéoclastes et des odontoclastes dans la résorption des tissus minéralisés. *Microsc. Res. Tech.* **2003**, *61*, 483-495. [[CrossRef](#)].
  28. Lacey, D.L. ; Timms, E. ; Tan, H.L. ; Kelley, M.J. ; Dunstan, C.R. ; Burgess, T. ; Elliott, R. ; Colombero, A. ; Elliott, G. ; Scully, S. ; et al. Osteoprotegerin ligand is a cytokine that regulates osteoclast differentiation and activation. *Cell* **1998**, *93*, 165-176. [[CrossRef](#)]
  29. Tyrovolas, J.B. ; Spyropoulos, M.N. ; Makou, M. ; Perrea, D. Résorption radiculaire et système OPG/RANKL/RANK : A mini review. *J. Oral Sci.* **2008**, *50*, 367-376. [[CrossRef](#)]
  30. Street, J. ; Lenihan, B. Le facteur de croissance de l'endothélium vasculaire régule la survie des ostéoblastes - preuve d'un mécanisme de rétroaction autocrine. *J. Orthop. Surg. Res.* **2009**, *4*, 19. [[CrossRef](#)]

31. Luo, Y. ; Wang, Y. ; Poynter, J.A. ; Manukyan, M.C. ; Herrmann, J.L. ; Abarbanell, A.M. ; Weil, B.R. ; Meldrum, D.R. Le prétraitement des cellules souches mésenchymateuses avec l'interleukine-1 et le facteur de croissance transformant augmente de manière synergique la production du facteur de croissance endothélial vasculaire et améliore la protection myocardique médiée par les cellules souches mésenchymateuses après une ischémie aiguë. *Surgery* **2012**, *151*, 353-363. [[CrossRef](#)]
32. Alikhani, M. ; Alyami, B. ; Lee, I.S. ; Almoammar, S. ; Vongthongleur, T. ; Alikhani, M. ; Alansari, S. ; Sangsuwon, C. ; Chou, M.Y. ; Khoo, E. ; et al. Saturation de la réponse biologique aux forces orthodontiques et son effet sur la vitesse de déplacement des dents. *Orthod. Craniofac. Res.* **2015**, *18*, 8-17. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Okamoto, A. ; Ohnishi, T. ; Bandow, K. ; Kakimoto, K. ; Chiba, N. ; Maeda, A. ; Fukunaga, T. ; Miyawaki, S. ; Matsuguchi, T. Reduction of orthodontic tooth movement by experimentally induced periodontal inflammation in mice. *Eur. J. Oral Sci.* **2009**, *117*, 238-247. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Alikhani, M. ; Chou, M.Y. ; Khoo, E. ; Alansari, S. ; Kwal, R. ; Elfersi, T. ; Almansour, A. ; Sangsuwon, C. ; Al-Jearah, M. ; Nervina, J.M. ; et al. Age-dependent biologic response to orthodontic forces. *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.* **2018**, *153*, 632-644. [[CrossRef](#)]
35. Pounder, N.M. ; Harrison, A.J. Low intensity pulsed ultrasound for fracture healing : A review of the clinical evidence and the associated biological mechanism of action. *Ultrasonics* **2008**, *48*, 330-338. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
36. De Gusmão, C.V.B. ; Pauli, J.R. ; Saad, M.J.A. ; Alves, J.M. ; Belangero, W.D. Les ultrasons de faible intensité augmentent les risques de cancer du sein. FAK, ERK-1/2 et IRS-1 dans les os de rats intacts de manière non cumulative. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **2010**, *468*, 1149-1156. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
37. Kaur, H. ; Siraki, A.G. ; Uludag, H. ; Dederich, D.N. ; Flood, P. ; El-Bialy, T. Role of reactive oxygen species during low-intensity pulsed ultrasound application in MC-3 T3 E1 pre-osteoblast cell culture. *Ultrasound Med. Biol.* **2017**, *43*, 2699-2712. [[CrossRef](#)]
38. Kusuyama, J. ; Nakamura, T. ; Ohnishi, T. ; Eiraku, N. ; Noguchi, K. ; Matsuguchi, T. Low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS) promotes BMP9-induced osteogenesis and suppresses inflammatory responses in human periodontal ligament derived stem cells. *J. Orthop. Trauma* **2017**, *31*, S4. [[CrossRef](#)]
39. Doan, N. ; Reher, P. ; Meghji, S. ; Harris, M. In vitro effects of therapeutic ultrasound on cell proliferation, la synthèse des protéines et la production de cytokines par les fibroblastes, les ostéoblastes et les monocytes humains. *J. Oral Maxillofac. Surg.* **1999**, *57*, 409-419. [[CrossRef](#)].
40. Young, S.R. ; Dyson, M. L'effet des ultrasons thérapeutiques sur l'angiogenèse. *Ultrasound Med. Biol.* **1990**, *16*, 261-269. [[CrossRef](#)].
41. Naruse, K. ; Mikuni-Takagaki, Y. ; Azuma, Y. ; Ito, M. ; Oota, T. ; Kameyama, K. ; Itoman, M. Anabolic response of mouse bone-marrow-derived stromal cell clone ST2 cells to low-intensity pulsed ultrasound. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **2000**, *268*, 216-220. [[CrossRef](#)].
42. Suzuki, A. ; Takayama, T. ; Suzuki, N. ; Sato, M. ; Fukuda, T. ; Ito, K. La différenciation ostéogénique dans les ostéoblastes de rat par des ultrasons pulsés quotidiens de faible intensité. *Acta Biochim. Biophys. Sin.* **2009**, *41*, 108-115. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Tsai, W.C. ; Pang, J.H.S. ; Hsu, C.C. ; Chu, N.K. ; Lin, M.S. ; Hu, C.F. Ultrasound stimulation of types I and III collagen expression of tendon cell and upregulation of transforming growth factor beta. *J. Orthop. Res.* **2006**, *24*, 1310-1316. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

44. Leung, K.S. ; Cheung, W.H. ; Zhang, C. ; Lee, K.M. ; Lo, H.K. Les ultrasons pulsés de faible intensité stimulent l'activité ostéogénique des cellules périostées humaines. *Clin. Orthop. Relat. Res.* **2004**, *418*, 253- 259. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Harle, J. ; Salih, V. ; Knowles, J.C. ; Mayia, F. ; Olsen, I. Effects of therapeutic ultrasound on osteoblast gene expression. *J. Mater. Sci. Mater. Med.* **2001**, *12*, 1001-1004. [[CrossRef](#)].
46. Cheung, W.H. ; Chow, S.K.H. ; Sun, M.H. ; Qin, L. ; Leung, K.S. Low-intensity pulsed ultrasounded accelerated callus formation, angiogenesis and callus remodeling in osteoporotic fracture healing. *Ultrasound Med. Biol.* **2011**, *37*, 231-238. [[CrossRef](#)]
47. Gleizal, A. ; Li, S. ; Pialat, J.B. ; Beziat, J.L. Expression transcriptionnelle de l'os calvarial après traitement par low-intensity ultrasound : An in vitro study. *Ultrasound Med. Biol.* **2006**, *32*, 1569-1574. [[CrossRef](#)].
48. Reher, P. ; Doan, N. ; Bradnock, B. ; Meghji, S. ; Harris, M. Therapeutic ultrasound for osteoradionecrosis : An in vitro comparison between 1 MHz and 45 kHz machines. *Eur. J. Cancer* **1998**, *34*, 1962-1968. [[CrossRef](#)].
49. Liu, Z. ; Xu, J. ; Lingling, E. ; Wang, D. Les ultrasons améliorent la guérison de la résorption de la racine induite par l'orthodontie chez les rats. *Angle Orthod.* **2012**, *82*, 48-55. [[CrossRef](#)]
50. Bandow, K. ; Nishikawa, Y. ; Ohnishi, T. ; Kakimoto, K. ; Soejima, K. ; Iwabuchi, S. ; Kuroe, K. ; Matsuguchi, T. Low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS) induces RANKL, MCP-1, and MIP-1beta expression in osteoblasts through the angiotensin II type 1 receptor. *J. Cell Physiol.* **2007**, *211*, 392-398. [[CrossRef](#)].
51. Feres, M.F.N. ; Kucharski, C. ; Diar-Bakirly, S. ; El-Bialy, T. Effect of low-intensity pulsed ultrasound on the activité des ostéoclastes : Une étude in vitro. *Arch. Oral Biol.* **2016**, *70*, 73-78. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
52. 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](#)]
53. Miller, D.L. Safety assurance in obstetrical ultrasound. *Semin. Ultrasound CT MR* **2008**, *29*, 156-164. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

