

Que sont les ultrasons ?

Les ultrasons désignent une bande de fréquence située au-dessus du spectre audible de l'être humain (env. 20 ~ 16000 Hz), et qui débute à 20000 Hz.

Ce sont des ondes sonores qui propagent des ondes de pression et de dépression mécaniques dans les matériaux qu'ils traversent.

Lorsque des ultrasons sont envoyés à travers le corps humain, ils pénètrent sur quelques cm, perdent graduellement leur énergie, rebondissent sur les obstacles les plus durs, et agitent les organes, les fluides et les cellules soumis aux pressions et dépressions.

Les applications médicales les plus connues des ultrasons

L'échographie construit une image des organes se trouvant devant une sonde (multi-éléments) émettant des ondes ultrasonores et détectant les échos.

La lithotritie permet de fractionner les calculs rénaux à l'aide d'une sonde qui envoie des ondes de choc jusqu'au rein.

La technologie mise en oeuvre

Pour créer des ultrasons on utilise généralement une céramique particulière possédant des propriétés piézo-électriques (Curie 1880).

Une pression mécanique exercée sur la céramique la polarise électriquement et fait apparaître une tension électrique très faible (effet direct).

Une tension électrique appliquée sur la céramique crée une contrainte mécanique qui la déforme physiquement de quelques micromètres (effet indirect).

Lorsque la tension électrique appliquée est temporellement variable et périodique, on crée une déformation mécanique variable et périodique qui produit des ondes de pression et de dépression.

La tension électrique de commande provient d'un générateur électronique de signal qui définit les fréquence, forme, amplitude et modulations.

Pour optimiser le transfert d'énergie acoustique entre la céramique et le matériau dans lequel on souhaite envoyer les ondes, on utilise un(des) adaptateur(s) acoustique(s).

C'est un matériau dont les propriétés physiques vont dépendre du milieu à sonder, de la fréquence exploitée, de la quantité d'énergie en présence, de la surface active souhaitée et de sa forme (surface de contact, plane, concave ou convexe).

La stimulation ultrasonore du cerveau – la neurostimulation

Il existe différentes propositions matérielles pour stimuler le cerveau, elles se différencient par :

- la forme et les propriétés de la sonde exploitée (focalisée (l'énergie émise est concentrée dans un volume restreint) ou non-focalisée, fréquence de travail, mono ou multi-éléments)
- la nature du signal transmis par la sonde (symétrique ou assymétrique, impulsionnel et périodique ou continu, modulé en amplitude ou pas, modulé en fréquence ou pas)
- la puissance ultrasonore en présence (de quelques mW/cm² à quelques W/cm²),
- la complexité matérielle requise pour le traitement (un positionnement précis sur le patient → sonde focalisée, plusieurs sondes, plusieurs fréquences, visualisation per-interventionnelle)

Quelque soit la configuration matérielle utilisée, la FDA a défini des critères et des valeurs limites à ne pas dépasser pour la sécurité du patient.

Elle définit pour les dispositifs de diagnostic :

- un index mécanique MI qui évalue l'énergie de dépression ultrasonore maximale,
- un index thermique TI qui traduit la variation de température du volume stimulé,
- des caractéristiques physiques du signal ultrasonore (fréquence, pression acoustique, durées active et inactives, intensités temporelle et spatiale, répétition du signal)

usage	Ispta (mW/cm ²)	Isppa (mW/cm ²)	MI
vaisseau périphérique	720	190	1.9
coeur	430	190	1.9
imagerie fetale et autre	94	190	1.9
ophtalmique	17	28	0.23

Ces données permettent de s'assurer que le traitement appliqué ne crée pas de lésion irréversible non-souhaitée (*voir le § les risques induits par une exposition aux ultrasons*) .

Les dispositifs de neuromodulation ultrasonores exploités

Les LIPUS (Low-Intensity Pulsed Ultrasound Stimulator) ou tLIPUS (transcranial-LIPUS) exploitent un signal impulsionnel et périodique qui est appliqué sur une sonde focalisée visant une zone cible du cerveau elle-même choisie en fonction de la maladie et/ou de l'effet recherché.

Les LIUS (low-intensity Ultrasound Stimulator) ou cLIUS (continuous-LIUS) exploitent un signal aperiodique qui est appliqué sur une sonde focalisée visant une zone cible du cerveau qui est choisie en fonction de la maladie et/ou de l'effet recherché.

Ces équipements sont utilisés avec ou sans médication. Des études ont montré que l'exposition d'un sujet à des ondes ultrasonores permettait de faciliter l'absorption de médicaments. Notamment dans le cerveau, où le passage des agents thérapeutiques à travers la barrière hémato-encéphalique peut être facilité.

Les effets

Deux effets principaux (dépendant de l'énergie ultrasonore en présence) sont observés : un effet thermique et un effet mécanique.

L'effet thermique est produit par :

- un mauvais transfert d'énergie entre la sonde et le patient, cela crée une élévation de température de la sonde et peut causer un érythème sur la surface de contact.
- une concentration de l'énergie dans un volume restreint (focalisation) et une exposition du patient assez longue entraîne localement une élévation de la température (jusqu'à quelques degrés).

L'effet mécanique est lui directement lié à la pression acoustique et il dépend des propriétés du signal qui est émis. Sa fréquence, la répétition des émissions, les modulations éventuelles (amplitude et/ou fréquence), sa variation temporelle (forme), et son amplitude vont construire l'onde de pression et déterminer ses effets.

Parmi ceux-ci, il y a :

- une stimulation de cellules souches (différentiation, recrutement, migration, prolifération, régénération),
- la création de nano-bulles et de composés chimiques oxydants (modification de pH),
- une cavitation avec la création de micro-bulles qui vont rendre perméable les parois cellulaires et créer des micro-flux,
- l'activation d'une réponse anti-inflammatoire,
- la réduction de caillot de sang et de calcul renal
- la contribution à une guérison plus rapide de diverses blessures (plaies, fractures, oséo-intégration de prothèses, arthrose, plaies musculaires, revascularisation de blessure)

Les risques induits par une exposition aux ultrasons

Un article présente les facteurs de risques et les séquelles constatées suite à des expositions particulières aux ultrasons (expositions auditive, échographique, stimulation externe, etc...) et il présente les valeurs limites fixées par la réglementation de divers états.

Possible Effects on Health of Ultrasound Exposure, Risk Factors in the Work Environment and Occupational Safety Review (2022)

Les essais cliniques de neuromodulation sur des sujets humains

Ci-dessous une liste des études et revues d'études traitant d'essais sur patients humains.

Se reporter à l'article pour connaître les modalités des essais et les résultats observés.

système nerveux central	système nerveux périphérique	article concerné
9	4	Ultrasound Neuromodulation A review of results, mechanisms and safety (2018)
16		Ultrasound Neuromodulation as a New Brain Therapy (2023)
12		Transcranial Focused Ultrasound (tFUS) and Transcranial Unfocused Ultrasound (tUS) Neuromodulation: From Theoretical Principles to Stimulation Practices (2019)
35		Human Studies of Transcranial Ultrasound neuromodulation: A systematic review of effectiveness and safety (2022)
1		Focused Transcranial Ultrasound for Treatment of Neurodegenerative Dementia (2019)
1		A Pilot Study of Whole-Brain Low-Intensity Pulsed Ultrasound Therapy for Early Stage of Alzheimer's Disease (LIPUS-AD): A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Trial (2022)