

*Critères
d'hygiène de
l'environnement 22*

Les ultrasons

*Résumé
d'orientation*

Publié par l'Organisation mondiale de la Santé
en liaison avec le Programme des Nations Unies
pour l'Environnement et
l'Association internationale de Radioprotection

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Pour donner suite à un certain nombre de résolutions de l'Assemblée mondiale de la Santé, et compte tenu des recommandations de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain tenue à Stockholm en 1972 et de celles du Conseil d'administration du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), on a entrepris en 1973 un programme intégré de grande envergure consacré à l'évaluation des effets sur la santé dûs à la pollution de l'environnement. Connue sous le nom de Programme OMS des critères d'hygiène de l'environnement, il est mis en œuvre avec l'appui du Fonds du PNUE pour l'environnement. En 1980, le Programme des critères d'hygiène de l'environnement a été incorporé dans un programme de plus grande ampleur, le Programme international sur la sécurité des substances chimiques (IPCS) que patronnent conjointement le Programme des Nations Unies pour l'Environnement, l'Organisation internationale du Travail et l'Organisation mondiale de la Santé. L'une des fonctions du programme consiste dans la publication d'une série de documents sur les critères d'hygiène de l'environnement.

Chaque document de la série consiste en une mise au point scientifique approfondie sur des polluants ou des groupes de polluants particuliers de l'environnement. Il fournit toute une gamme de renseignements, depuis la nature des sources et la valeur des niveaux d'exposition jusqu'à un exposé détaillé des données disponibles au sujet des effets de ces polluants sur la santé humaine. Des projets rédactionnels sont préparés pour le compte de l'OMS par des experts ou des institutions nationales, puis soumis à l'examen approfondi d'une part de représentants des quelque 25 Etats membres participant au Programme, d'autre part d'un ou plusieurs groupes internationaux d'experts (*groupes de travail*). Un objectif important du programme consiste dans l'évaluation des données disponibles sur les rapports entre l'exposition à certains polluants environnementaux (ou à d'autres facteurs physiques et chimiques) et la santé humaine *en vue de fournir des directives garantissant la compatibilité entre les limites d'exposition fixées et la protection de la santé publique*.

Pour faciliter l'application de ces directives dans le cadre des programmes nationaux de protection de l'environnement, l'OMS a décidé de faire rédiger des «résumés d'orientation» où l'accent serait mis, parmi toutes les données présentées dans les documents *in extenso*, sur celles qui sont utiles aux spécialistes qui ont besoin de connaître les problèmes sanitaires en cause sans entrer dans le détail des aspects scientifiques.

Les résumés d'orientation reproduisent les directives d'exposition qui figurent dans les documents relatifs aux critères établis par les groupes de travail, ainsi que les principales données relatives aux effets sanitaires. On s'est efforcé d'éviter toute divergence par rapport aux données présentées dans les documents *in extenso*. Pour certains d'entre eux, particulièrement lorsque leur publication remonte à trois ou quatre ans, ce souci a conduit à l'exclusion des données nouvelles éventuellement publiées depuis la réunion des groupes de travail correspondants. Ces données seront prises en considération lorsque les documents relatifs aux critères et les résumés d'orientation seront revus et corrigés.

Les observations du lecteur au sujet de difficultés éventuelles rencontrées dans l'utilisation des données figurant dans les résumés d'orientation sont les bienvenues. Elles doivent être communiquées à l'adresse suivante:

Division de l'hygiène de l'environnement,
Organisation mondiale de la Santé,
1211 Genève 27,
Suisse

LES ULTRASONS*

1. Introduction

Les ultrasons sont des ondes sonores de fréquence supérieure à la gamme des fréquences audibles par l'homme (le plus souvent, au-dessus de 16 kHz). A la différence des rayonnements électromagnétiques, un milieu (gazeux, liquide ou solide) est essentiel pour leur propagation.

L'exposition aux ultrasons transmis par l'air intervient dans de nombreuses applications industrielles — nettoyage par ultrasons, émulsification, soudage ou brasage et repérage des défauts dans les métaux — ainsi qu'à l'occasion de l'emploi de dispositifs vendus dans le commerce tels que les sifflets à chien, les appareils destinés à éloigner les oiseaux et les rongeurs, les télémètres pour appareils photographiques ou les systèmes d'alarme contre les cambrioleurs. En revanche, l'exposition aux ultrasons transmis par des liquides se produit essentiellement lors d'actes diagnostiques, thérapeutiques ou chirurgicaux.

L'exposition aux ultrasons utilisés à des fins diagnostiques est aujourd'hui fort répandue. Dans les pays développés, la plupart des femmes enceintes subissent au moins une échographie avant la naissance de chaque enfant. Si rien ne prouve que les ultrasons utilisés à des fins de diagnostic aient chez l'homme des effets nocifs, leur utilisation de plus en plus fréquente au cours de la grossesse reste préoccupante quand on connaît la sensibilité du fœtus aux autres agents physiques et chimiques.

2. Caractéristiques physiques

La production d'ultrasons est en général obtenue à l'aide d'un transducteur comportant un matériau piézo-électrique. Ce matériau transforme un signal électrique en déformation mécanique, et inversement. Par suite, l'énergie électrique véhiculée par une fréquence donnée peut servir à produire une vibration mécanique de même

* Résumé de "Les ultrasons," Genève, Organisation mondiale de la Santé, 1985 (Critères d'hygiène de l'environnement No. 22) (sous presse).

fréquence. La production d'ultrasons peut se faire sous forme d'ondes entretenues ou d'ondes pulsées. Quand les ultrasons se propagent dans un milieu hétérogène tel qu'un tissu biologique, ils se réfléchissent en partie au niveau des interfaces (comme il en existe, dans l'organisme humain, à la limite d'un organe et des tissus voisins). Le faisceau réfléchi, ou écho, peut être enregistré au moyen du même transducteur, le faisceau entraînant, par voie mécanique, la déformation du matériau piézo-électrique, d'où production d'un signal électrique.

Pour caractériser l'exposition aux ultrasons transmis par un liquide, il faut indiquer la puissance totale en watts (W), ainsi que les valeurs appropriées de l'intensité (W/m^2) dans l'espace et dans le temps. Pour mesurer une intensité ultrasonore dans un liquide, on peut se servir d'un hydrophone (microphone immergé) étalonné. L'intensité des ultrasons transmis par l'air est exprimée sous forme d'un niveau de pression acoustique, mesuré en décibels (dB), la mesure se faisant au moyen d'un sonomètre.

Les ultrasons se propagent sous forme d'ondes longitudinales (ondes de compression) formées de régions alternées de compression et de raréfaction des particules du milieu, lesquelles sont animées d'un mouvement vibratoire dans la direction de propagation de l'énergie. La distance séparant deux points de compression maximale ou de raréfaction maximale est appelée longueur d'onde. Les ondes transversales (de cisaillement) qui se propagent surtout dans les solides, sont caractérisées par le déplacement des particules dans une direction orthogonale à celle de la propagation. A l'interface entre tissu osseux et tissu mou, l'un des types d'onde peut se transformer en l'autre (changement de mode). Quand une onde longitudinale se propageant dans des tissus mous vient frapper obliquement un tissu osseux, des ondes longitudinales et transversales peuvent prendre naissance simultanément dans le milieu solide. Ce phénomène peut entraîner un échauffement à la surface de l'os.

On notera une différence importante entre les rayonnements ionisants et les ultrasons. Quand le flux des photons d'un faisceau de rayons X augmente, l'énergie de ce faisceau augmente elle-même bien que l'énergie propre de chaque photon soit inchangée. Par suite, le mécanisme d'interaction reste le même pour un photon isolé, mais

le nombre d'interactions par unité de temps augmente puisque le nombre de photons s'accroît. Quand l'amplitude du mouvement des particules d'un faisceau ultrasonore de fréquence déterminée augmente, le flux énergétique par unité de surface augmente lui-même, d'où un accroissement de l'intensité du faisceau. De ce fait, il peut très bien se produire une modification du mode d'interaction avec la matière, alors même que la fréquence demeure inchangée.

3. Applications

Les ultrasons ont été utilisés au départ dans un dispositif de repérage des sous-marins. Ce dispositif, inventé par Paul Langevin en 1917, comportait un cristal de quartz vibrant à 50 kHz, en émettant dans l'eau un faisceau d'ultrasons dont on repérait l'écho. En thérapeutique, la première utilisation des ultrasons remonte au milieu des années 30 tandis que leur application au repérage des défauts date de 1939.

Depuis la Seconde Guerre mondiale, des progrès considérables ont été réalisés dans la mise au point de nouveaux cristaux piézo-électriques, de céramiques ferro-électriques et de matériaux magnéto-strictifs, permettant à la fois le développement et la diversification des applications des ultrasons. La figure 1 illustre les applications des ultrasons en médecine, dans l'industrie, dans les produits de consommation ainsi que pour le traitement des signaux et divers contrôles, avec les fréquences correspondantes. Les applications médicales constituent pour l'homme la source d'exposition qui se développe le plus rapidement.

4. Mécanismes d'interaction

L'énergie ultrasonore peut se transformer en plusieurs autres formes d'énergie selon un mécanisme thermique, un mécanisme de cavitation et des mécanismes de contrainte faisant intervenir la production de courants. Quand les ultrasons sont absorbés par la matière, ils se transforment en chaleur, d'où une élévation de température chez le sujet exposé. Une onde ultrasonore détermine dans le milieu où elle se propage des ondes alternées de surpression et de dépression, ces variations de pression donnant naissance au phénomène de cavitation. Ce dernier se produit quand la dilatation et la contraction

des bulles de gaz (dans les liquides et les tissus organiques) déterminent soit de simples oscillations ou pulsations (cavitation stable), soit des phénomènes violents (cavitation transitoire ou implosion) lorsque l'effondrement des bulles détermine la production de températures et pressions instantanées extrêmement élevées. L'apparition de courants et d'efforts tranchants est possible par suite du phénomène de cavitation stable; en outre, on observe des mouvements de torsion dans les systèmes biologiques exposés aux ultrasons.

Les appareils diagnostiques émettant avec une intensité moyenne de l'ordre de quelques milliwatts par centimètre carré ne semblent pas provoquer chez l'homme une élévation de température susceptible de déterminer des lésions. Mais une cavitation est possible *in vivo* à ces intensités quand on se sert de dispositifs à impulsions-échos. L'élévation de température associée à l'emploi d'intensités moyennes plus élevées (0,1 – 3 W/cm²) contribue peut-être à l'effet thérapeutique bénéfique des ultrasons. On a détecté des bulles de gaz *in vivo* après exposition thérapeutique, ce qui témoigne d'une certaine activité cavitationnelle.

5. Effets biologiques des ultrasons transmis par les liquides

Les études effectuées sur les cellules en suspension montrent que les ultrasons peuvent modifier la vitesse de synthèse des macromolécules et déterminer des altérations ultrastructurales intracellulaires. Des altérations structurales et fonctionnelles au niveau de la membrane cellulaire ont été observées après exposition aux ondes ultrasonores pulsées ou entretenues produites par les appareils diagnostiques du commerce.

Des résultats contradictoires ont été rapportés au sujet des effets des ultrasons sur l'ADN. Une synthèse anarchique de l'ADN (témoignant d'une lésion éventuelle et de la réparation ultérieure de cet acide nucléique) a été observée après exposition à des ultrasons utilisés à titre diagnostique (ondes pulsées) ou thérapeutique (ondes entretenues). D'après certaines observations, les altérations de l'activité de la surface cellulaire pourraient durer de nombreuses générations.

La croissance osseuse est retardée après exposition aux intensités élevées qu'on emploie en thérapeutique, même lorsque le transduc-

teur est maintenu en mouvement pendant le traitement. Quand le transducteur reste stationnaire, les lésions tissulaires, osseuses et autres, se produisent à des intensités plus faibles. L'exposition aux ultrasons peut déclencher des contractions dans le tissu musculaire. Aux intensités utilisées en thérapeutique, on a également montré que les ultrasons altéraient la fonction thyroïdienne chez l'homme.

Une baisse du poids fœtal a été observée après exposition de fœtus de rongeur *in utero*. La plus faible intensité moyenne, en ondes entretenues, produisant cet effet chez la souris se situe à l'extrémité inférieure de la gamme thérapeutique. Certaines études montrent que des anomalies fœtales et une perte de poids chez la mère sont également possibles chez les animaux d'expérience.

6. Effets biologiques des ultrasons transmis par l'air

Le recours aux animaux d'expérience pour étudier les effets des ultrasons transmis par l'air présente de sérieux inconvénients car les animaux ont une meilleure acuité auditive, possèdent une gamme de fréquences audibles plus large et un rapport surface cutanée/poids plus élevée que chez l'homme, sans compter que la plupart sont revêtus d'une fourrure. L'exposition pendant 40 min environ de souris, rats et cobayes à des ultrasons transmis par l'air à une pression acoustique de 150 dB au moins, entraîne la mort, par échauffement excessif de l'organisme, tandis qu'une exposition à 155 – 158 dB tue les animaux en 10 min environ. Chez ces espèces animales, un échauffement de l'organisme a été observé à des niveaux dépassant 144 dB, à 18 – 20 kHz. Chez une souche de souris glabre, il a fallu 155 dB pour déterminer le même échauffement. Ce résultat s'explique par le fait que la fourrure a un coefficient d'absorption acoustique beaucoup plus élevé que la peau.

7. Effets sur la santé humaine

A ce jour, aucun effet nocif n'a été décelé à la suite de l'exposition aux ultrasons transmis par un liquide, au niveau utilisé dans l'imagerie diagnostique. Cependant, il est fort préoccupant de constater qu'aucune étude épidémiologique satisfaisante n'a encore été effectuée alors que, dans les pays technologiquement développés, la plupart des fœtus sont soumis à au moins une échographie. A défaut d'études épidémiologiques convenables dans un très proche avenir,

on ne disposera d'aucune population "témoin" permettant des comparaisons avec les populations exposées aux ultrasons.

La plupart des études faites chez l'homme pèchent par de nombreux aspects, notamment l'absence d'appariement avec des témoins et la valeur trop faible des effectifs; si ces études n'ont fait apparaître aucun effet nocif, elles ne peuvent être considérées comme concluantes. La possibilité, récemment rapportée, d'une perte de poids du fœtus après son exposition *in utero*, devrait faire l'objet d'études complémentaires, d'autant que des rapports précédents ont fait état du même phénomène chez les fœtus d'animaux ainsi exposés.

Aucun effet physiologique ou auditif nocif ne semble survenir chez l'homme tant que la pression acoustique à laquelle il est exposé ne dépasse pas 120 dB environ. A 140 dB, un léger échauffement peut être ressenti au fond des replis cutanés. A mesure que la pression acoustique augmente, le corps humain se réchauffe jusqu'à survenue de la mort par hyperthermie, à un niveau estimé à plus de 180 dB.

Des malaises tels que nausées, vomissements, sensation de fatigue, céphalées et sensation désagréable de compression ou de "bourrage" au niveau des oreilles ont été signalés par des sujets exposés dans l'industrie. Il est souvent difficile de dire si les effets observés sont imputables aux ultrasons et non au bruit à des fréquences audibles, car les fréquences émises par de nombreuses sources d'exposition se situent à la fois dans l'audible et l'ultrasonore.

Certaines observations donnent à penser que les risques pour l'audition sont probablement dus à des sons audibles de fréquence élevée ou à des sous-harmoniques de fréquences ultrasonores. Cependant, on a signalé des décalages temporaires du seuil auditif à la suite d'une brève exposition à des ondes ultrasonores transmises par l'air à 150 dB.

8. Normes

La base actuelle de données biologiques et biophysiques semble insuffisante pour qu'on puisse imposer une limite quantitative au niveau de sortie des appareils à ultrasons utilisés à des fins diagnostiques. Cependant, il est généralement recommandé de limiter l'exposition au plus faible niveau compatible avec l'obtention de l'information nécessaire.

Il existe dans certains pays une réglementation qui prévoit un niveau maximal à la sortie des appareils thérapeutiques à ultrasons (par exemple au Canada) et c'est l'une des conditions requises par un sous-comité technique de la Commission électrotechnique internationale. D'autres pays, par exemple les Etats-Unis d'Amérique, n'ont pas fixé de limite pour le niveau de sortie dans la norme applicable aux appareils thérapeutiques à ultrasons.

Des limites d'exposition professionnelle aux ultrasons transmis par l'air ont déjà été établies ou proposées au Canada, aux Etats-Unis d'Amérique, au Japon, au Royaume-Uni, en Suède et en URSS. Ces normes, projets de normes ou règlements sont tous semblables en ce qu'ils prévoient une augmentation de la limite d'exposition au-delà du domaine audible (20 kHz), avec des niveaux de 110 ou 115 dB.

9. Mesures de protection

Les implications sur le plan sanitaire d'un certain nombre des effets déjà signalés montrent que la prudence s'impose chaque fois que l'homme est exposé aux ultrasons, même si les avantages de cette exposition l'emportent de loin sur les risques présumés. Des mesures particulières permettent de limiter l'exposition au niveau le plus faible indispensable pour obtenir l'effet souhaité ou pour obtenir les renseignements diagnostiques recherchés. On peut fixer les règles suivantes pour les appareils à visée diagnostique:

- a) Il convient de mettre au point et de diffuser des critères de qualité de l'imagerie. Ces critères aideraient l'utilisateur à évaluer les risques et avantages comparés des appareils et à maintenir le niveau de sortie à la plus faible valeur compatible en pratique avec l'obtention des renseignements diagnostiques nécessaires.
- b) Des niveaux de sortie approchant les limites inférieures des valeurs utilisées dans les applications thérapeutiques (c'est-à-dire 100 mW/cm^2) sont à exclure aux fins diagnostiques sauf lorsqu'ils sont justifiés par l'absence de tout autre moyen d'obtenir les renseignements nécessaires.
- c) Les appareils doivent être munis de commandes permettant à

l'opérateur de limiter l'exposition à la stricte valeur nécessaire pour obtenir l'image ou tout autre renseignement voulu au sujet de l'organe en cause chez chaque patient.

- d) Les ultrasons à visée diagnostique ne doivent être utilisés chez l'homme que lorsqu'il existe pour cela une raison médicale valable. L'exposition, spécialement celle des femmes enceintes, est à exclure pour une simple démonstration commerciale ou pour la production régulière d'images-tests lors de l'entretien de l'appareil.

Pour les appareils à usage thérapeutique, on respectera les règles suivantes:

- a) Des spécifications relatives à l'exactitude de la puissance de sortie et de la minuterie sont indispensables, car ces deux éléments influent directement sur la dose délivrée au patient.
- b) Aucune femme enceinte ne doit être exposée à des ultrasons à visée thérapeutique s'il risque d'en découler une exposition, directe ou indirecte, du fœtus. A l'heure actuelle, il est courant d'utiliser les ultrasons pour le traitement, chez la femme enceinte, des algies lombaires. Cette pratique est déconseillée.
- c) Il n'est pas souhaitable d'appliquer des ultrasons au niveau de la colonne vertébrale, spécialement après une laminectomie ou quand l'irradiation englobe des territoires anesthésiés.
- d) Des précautions s'imposent lorsque, chez un enfant, on irradie l'épiphyse à la limite d'un cartilage de conjugaison, spécialement si la croissance n'est pas encore terminée.
- e) Des précautions sont également à prendre dans le traitement des maladies vasculaires périphériques des extrémités car, du fait d'une hypo-esthésie et de la réduction de la circulation sanguine, le patient risque de ne pas déceler une surexposition aux ultrasons.

- f) L'exposition ultrasonore à proximité d'une surface solide réfléchissante, par exemple une structure osseuse, peut entraîner la formation d'ondes stationnaires, risquant de produire une stase sanguine, avec les effets qui en découlent. En thérapeutique, il faut déplacer le transducteur émetteur d'ultrasons au-dessus de la région lésée, de façon à réduire au minimum les effets nocifs des ondes stationnaires et d'une éventuelle cavitation.
- g) L'exposition des patients peut et doit être réduite au minimum par les procédés suivants:
 - i) contrôler les sensations cutanées du patient avant l'application des ultrasons car un patient incapable de distinguer le chaud du froid n'est pas à même de déceler une surexposition;
 - ii) utiliser l'exposition efficace minimale;
 - iii) une fois le transducteur branché, le déplacer lentement au niveau de la région traitée de façon à réduire au minimum le risque d'une élévation excessive de la température locale;
 - iv) veiller à ce que l'opérateur soit présent pour mettre fin au traitement dès que le patient manifeste le moindre signe d'intolérance;
 - v) étalonner régulièrement les appareils.
- h) L'exposition de l'opérateur peut être limitée moyennant deux précautions:
 - i) ne pas toucher la face du transducteur ou de la sonde pendant l'émission d'ultrasons; et
 - ii) ne pas plonger une partie du corps dans le bain d'eau pendant l'émission.

S'agissant de l'exposition aux ultrasons dans l'industrie, on suivra les consignes suivantes:

- a) Les personnes exposées à des bruits intenses associés à un appareil à ultrasons doivent être protégées soit par le port d'oreillettes, soit par l'installation autour de l'appareil d'une barrière acoustique destinée à le rendre moins bruyant.

- b) On évitera l'exposition, par contact direct, à des ultrasons très intenses transmis par un liquide. Par exemple, l'opérateur ne doit pas plonger les mains dans un bac de nettoyage par ultrasons en fonctionnement. Des pancartes d'avertissement doivent être installées en des points convenables.
- c) Dans les systèmes d'alarme contre les cambrioleurs, la source d'ultrasons elle-même doit être débranchée et non seulement l'alarme quand le système n'est pas en fonctionnement.

**Autres titres parus dans la série des
«Critères d'hygiène de l'environnement»**

1. Mercure
2. Polychlorobiphényles et polychloroterphényles
3. Plomb
4. Oxydes d'azote
5. Nitrates, nitrites et composés *N*-nitroso
6. Principes et méthodes d'évaluation de la toxicité des produits chimiques. Partie I
7. Oxydants photochimiques
8. Oxydes de soufre et particules en suspension
9. DDT et dérivés
10. Sulfure de carbone
11. Mycotoxines
12. Le bruit
13. Monoxyde de carbone
14. Rayonnement ultraviolet
15. Etain et organostanniques
16. Fréquences radioélectriques et hyperfréquences
17. Manganèse
18. Arsenic
19. Sulfure d'hydrogène
20. Quelques dérivés du pétrole
21. Chlore et gaz chlorhydrique (*sous presse*)
22. Ultrasons (*sous presse*)
23. Lasers et fréquences optiques (*en préparation*)
24. Titane
25. Quelques radionucléides (*en préparation*)
26. Styrène (*en préparation*)
27. Eléments d'épidémiologie environnementale (*en préparation*)
28. Acrylonitrile (*sous presse*)
29. Acide dichloro-2,4 phénoxyacétique (2,4-D) (*sous presse*)

30. Principles for Evaluating Health Risks to Progeny Associated with Exposure to Chemicals during Pregnancy (*en préparation*)
31. Tetrachloroethylene (*en préparation*)
32. Methylene Chloride (*en préparation*)
33. Epichlorohydrin (*en préparation*)
34. Chlordane (*en préparation*)
35. Extremely Low Frequency (ELF) Fields (*en préparation*)
36. Fluorine and Fluorides (*en préparation*)
37. Aquatic (Marine and Freshwater) Biotoxins (*en préparation*)
38. Heptachlor (*en préparation*)
39. Paraquat and Diquat (*en préparation*)
40. Endosulfan (*en préparation*)
41. Quintozene (*en préparation*)
42. Tecnazene (*en préparation*)
43. Chlordecone (*en préparation*)
44. Mirex (*en préparation*)
45. Camphechlor (*en préparation*)