

# Bruit des installations à ultrasons

**Suva**

Sécurité au travail

**Renseignements**

Case postale, 1001 Lausanne

Tél. 021 310 80 40-42

Fax 021 310 88 49

medecine.travail@suva.ch

www.suva.ch

**Commandes**

Case postale, 6002 Lucerne

www.suva.ch/waswo-f

Tél. 041 419 58 51

Fax 041 419 59 17

**Titre**

Bruit des installations à ultrasons

**Auteur**

Franz Herger, secteur industrie et arts et métiers

Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, avec mention de la source.

1<sup>re</sup> édition: (CSST n° 137): octobre 1982

Edition revue et corrigée: mars 1997

**Référence**

44006.f (disponible uniquement sous forme de fichier pdf)

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>La physique des ultrasons</b> .....	<b>5</b>
2.1	Notions fondamentales d'acoustique .....	5
2.2	Définition des ultrasons .....	5
2.3	Production d'ultrasons.....	6
2.3.1	Transducteur magnétostrictif .....	6
2.3.2	Transducteur piézo-électrique .....	6
2.3.3	Emetteur capacitif à ultrasons .....	7
2.3.4	Production mécanique d'ultrasons .....	7
2.4	Normes internationales .....	8
<b>3</b>	<b>Applications des ultrasons</b> .....	<b>9</b>
3.1	Diagnostic et traitement en médecine .....	9
3.2	Essais non destructifs de matériaux.....	9
3.3	Nettoyage par ultrasons.....	11
3.4	Soudage par ultrasons.....	12
3.5	Perçage par ultrasons .....	14
3.6	Usinage mécanique .....	14
3.7	Génie sous-marin.....	15
3.8	Autres domaines d'application .....	16
<b>4</b>	<b>Effets des ultrasons sur la santé, valeurs limites</b> .....	<b>17</b>
4.1	Généralités .....	17
4.2	Effets physiologiques des ultrasons .....	17
4.3	Effets des ultrasons sur l'ouïe .....	18
4.3.1	Généralités .....	18
4.3.2	Valeurs limites .....	19
4.4	Règles de comportement face aux installations à ultrasons .....	20
4.4.1	Femmes enceintes.....	20
4.4.2	Travaux avec des appareils médicaux .....	20
4.4.3	Travaux avec des installations à ultrasons .....	21
<b>5</b>	<b>Mesure du bruit des installations à ultrasons</b> .....	<b>22</b>
5.1	Principes de base .....	22
5.2	Mesure et pondération dans le domaine audible .....	22
5.2.1	Objectif .....	22
5.2.2	Exigences concernant la gamme de fréquences.....	22
5.2.3	Contenir les composantes ultrasonores .....	22
5.3	Mesure et pondération dans le domaine ultrasonore .....	23
5.3.1	Objectif .....	23
5.3.2	Exigences concernant la gamme de fréquences.....	23
5.3.3	Contenir des composantes ultra-sonores dans le domaine audible .....	24
5.4	Pondération temporelle .....	24
5.4.1	Déterminer le niveau de pression acoustique équivalent .....	24
5.4.2	Déterminer le niveau maximum .....	24
5.4.3	Diagramme du niveau de pression acoustique .....	24

5.5	Analyses spectrales .....	24
5.6	Enregistrement des signaux ultrasonores .....	25
5.7	Sons dans les liquides .....	25
5.8	Procédure de mesure .....	26
5.8.1	Point de mesure .....	26
5.8.2	Analyses spectrales .....	26
5.8.3	Données à enregistrer .....	26
5.8.4	Protocole de mesure .....	26
<b>6</b>	<b>Mesures de protection contre le bruit causé par les installations à ultrasons .....</b>	<b>27</b>
6.1	Aperçu.....	27
6.2	Mesures de protection d'ordre technique .....	27
6.2.1	Mesures primaires .....	27
6.2.2	Mesures secondaires .....	28
6.3	Mesures de protection au niveau des locaux .....	31
6.4	Mesures de protection individuelle .....	32
6.5	Mesures de protection relevant de l'organisation .....	32
6.6	Organisation des postes de travail .....	32
6.6.1	Postes de travail des installations à ultrasons.....	32
6.6.2	Postes de travail à proximité d'installations à ultrasons .....	32
<b>7</b>	<b>Bruit causé par les installations à ultrasons: exemples .....</b>	<b>33</b>
7.1	Bains à ultrasons .....	33
7.2	Soudeuses à ultrasons.....	33
7.3	Machines et installations spéciales.....	34
7.3.1	Machine à roder et à polir .....	34
7.3.2	Machine à découper les bandes .....	34
7.3.3	Appareil à ultrasons contre les pigeons .....	35
7.3.4	Appareil de surveillance à ultrasons .....	35
<b>8</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>35</b>
	<b>Annexe:</b> Normes et propositions de normes internationales.....	36

# 1 Introduction

L'ultrason constitue un secteur particulier de l'acoustique. Ce moyen technique est certes très courant, mais rares sont les utilisateurs qui en connaissent les éventuelles conséquences. La présente publication entend combler ces lacunes; elle s'adresse donc à un large public. En effet, les utilisateurs sont tout aussi concernés que les ingénieurs en science des matériaux, les ingénieurs médicaux, les experts en matières synthétiques et les ingénieurs de mesurage.

Dans l'industrie, beaucoup d'activités seraient impensables sans les ultrasons, notamment de nombreux examens ou traitements médicaux. Servant pour la première fois d'appareil militaire pour la localisation des sous-marins ennemis pendant la première guerre mondiale, les ultrasons allaient trouver, après la seconde guerre mondiale, des applications sensées et pacifiques (appareils de nettoyage ou de mesurage à ultrasons, par exemple). Au début des années soixante, l'industrie du traitement des matières synthétiques et la technique médicale connaissent un véritable essor. De plus en plus d'articles techniques sont produits en matière synthétique et la soudeuse à ultrasons joue, dès lors, un rôle très important dans leur assemblage. En ce qui concerne le nettoyage, il convient de mentionner le bain à ultrasons. Aujourd'hui, dans les hôpitaux et les cabinets médicaux, d'innombrables appareils à ultrasons sont utilisés pour les examens et les traitements.

Les ultrasons n'ont pas été découverts au vingtième siècle. Ils ont été observés pour



Figure 1  
Oreillard

la première fois dans le monde animal. Qui n'a pas déjà entendu parler du fabuleux sens de l'orientation des chauves-souris? (figure 1) La chauve-souris émet, dans la bande de 50 000 Hz, de brèves impulsions ultrasonores, qui durent moins de 1/1000 s, et peut capter les ondes sonores réfléchies à l'aide de ses oreilles aux pavillons énormes. Son système de localisation est capable de détecter des insectes même à la surface d'une feuille d'arbre. Il est donc tout à fait justifié de comparer la faculté d'orientation de cet animal nocturne au radar (qui utilise des ondes électromagnétiques à la place des ondes acoustiques).

Il existe un deuxième groupe d'animaux capables de s'orienter à l'aide de signaux acoustiques: les dauphins et les baleines bleues, celles-ci pouvant peser jusqu'à 120 t. Ils émettent des signaux pouvant atteindre la bande des 170 000 Hz. Les ondes se propagent dans l'eau et arrivent directement dans l'oreille interne, où elles sont traitées. Par exemple, un dauphin peut localiser un petit poisson à quelques mètres, tout en ayant les yeux bandés. A l'aide d'un train d'impulsion, il peut se diriger vers sa proie (cela a été prouvé expérimentalement) [1].

Cette brochure traite uniquement des ultrasons et de leurs applications techniques.

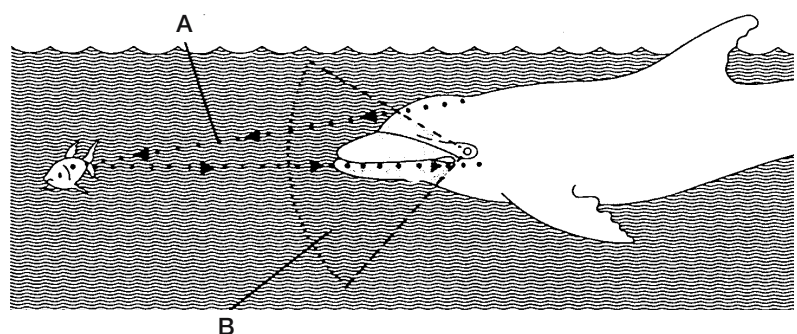


Figure 2  
Dauphin en quête de nourriture: le champ acoustique (A) est beaucoup plus important que le champ visuel (B).

## 2 La physique des ultrasons

### 2.1 Notions fondamentales d'acoustique

Les notions fondamentales d'acoustique ne sont pas l'objet de cette brochure. Elles sont présentées en détail dans la publication de la Suva n° 44057 «Dangers du bruit pour l'ouïe à l'emplacement de travail» (anciennement CSST n° 146). Les concepts suivants y sont abordés:

- ♦ Origine du son
- ♦ Pression sonore et vibration acoustique
- ♦ Ondes sonores et propagation du son
- ♦ Puissance acoustique et énergie sonore
- ♦ Niveau de pression sonore
- ♦ Analyses spectrales
- ♦ Signaux acoustiques
- ♦ Son pur, son composé et bruit
- ♦ Bruit continu, intermittent et impulsif
- ♦ Champs acoustiques
- ♦ etc.

### 2.2 Définition des ultrasons

Comme pour les ondes électromagnétiques, on subdivise les ondes sonores en différentes **bandes** (tableau 1).

Bandes de fréquences	Désignation/ Application
au-dessous de 20 Hz	infrasons
de 20 Hz à 20 kHz	sous audibles
<b>de 20 kHz à 1 GHz</b>	<b>ultrasons</b>
de 20 kHz à 100 kHz	procédés industriels
de 1 MHz à 15 MHz	diagnostic médical et thérapie
de 1 MHz à 15 MHz	essais des matériaux
au-dessus de 1 GHz	hypersons

Tableau 1  
Bandes de fréquences.

Remarque: 1 kHz = 1 000 Hz  
1 MHz = 1 000 kHz = 10<sup>6</sup> Hz  
1 GHz = 1 000 MHz = 10<sup>9</sup> Hz

On désigne par ultrasons (du latin ultra = au-delà) la bande de phénomènes acoustiques que l'homme ne perçoit plus. Comme la limite des fréquences supérieures pouvant être captées par la capacité auditive humaine varie pour chaque individu et dépend fortement de l'âge, la bande des ultrasons ne

peut être clairement délimitée par rapport aux sons audibles. De manière générale, que ce soit dans les normes ou dans les directives, on parle d'ultrasons lorsque la fréquence est supérieure à 20 kHz. Tout comme le son dans le domaine audible, les ultrasons peuvent se propager à travers des gaz, des liquides et même des corps solides. La vitesse de propagation, ou célérité, des ondes sonores, qui est indépendante de la longueur d'onde, varie fortement selon le support utilisé (exemples dans le tableau 2).

Matières		Température [°C]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Célérité des ondes sonores [m/s]
Gaz	air	20	1,205	344
Liquides	eau	20	998	1 483
	oxygène	-183	1 143	909
Métaux	acier	20	7 840	5 100
	aluminium	20	2 700	5 100

Tableau 2  
Exemples de célérité des ondes sonores

La façon dont se propagent les ondes sonores dépend fortement de la longueur d'onde du son. Il est donc utile d'établir une comparaison dans ce sens. Si l'on considère la longueur d'onde  $\lambda$  des différentes bandes du tableau 1, en utilisant la relation

$$\text{longueur d'onde } \lambda \text{ [m]} = \frac{\text{célérité des ondes sonores } c \text{ [m/s]}}{\text{fréquence } f \text{ [Hz]}}$$

pour une célérité des ondes sonores  $c = 344 \text{ m/s}$  (air à 20° C), on obtient les résultats suivants (tableau 3):

Fréquence	Longueur d'onde
20 Hz	17,2 m
1 000 Hz	0,34 m
20 kHz	17,2 mm
1 MHz	0,34 mm
1 GHz	0,34 $\mu\text{m}$

Tableau 3  
Fréquences et longueurs d'onde dans l'air avec une célérité des ondes sonores de 344 m/s et une température de 20° C.

Par rapport aux sons audibles, les ultrasons sont considérés comme des **ondes courtes**. Ils se propagent sur une onde plane, presque en ligne droite. C'est pourquoi les protections des sources sonores à ultrasons peuvent être très efficaces.

## 2.3 Production d'ultrasons

### 2.3.1 Transducteur magnétostrictif

Bien que le transducteur magnétostrictif (ou émetteur de son) ait été supplanté, ces dernières années, par le transducteur piézo-électrique (voir paragraphe 2.3.2) dans de nombreux domaines d'application, ses avantages résident toujours dans sa structure simple et dans sa grande robustesse, tant au niveau mécanique qu'électrique.

Placées dans un champ magnétique, des barres de matériaux ferromagnétiques, tels que fer, nickel ou ferrite, subissent des variations de longueur dues à l'alignement des «domaines de Weiss». La longueur d'une barre ferromagnétique placée dans un champ alternatif varie par analogie avec les changements de champs: la barre commence à osciller (figure 3). Avec des barres de nickel extrêmement courtes, excitées à la résonance mécanique, il est théoriquement possible d'obtenir des oscillations magnétostrictives jusqu'à 1 MHz. En pratique, on utilise des oscillateurs à magnétostriction dans la bande de 20 à 40 kHz. Les transducteurs à ultrasons magnétostrictifs modernes permettent d'atteindre, dans cette bande, des intensités de 10 W/cm<sup>2</sup>, si la chaleur, produite par les pertes mécaniques et les per-

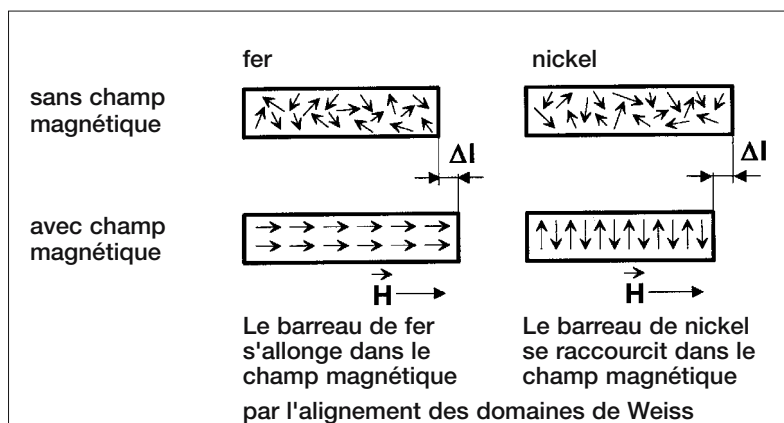


Figure 3  
Principe de la variation de longueur des matériaux ferromagnétiques. Sous l'effet d'un champ magnétique externe, la longueur change du fait de l'alignement des domaines de Weiss.

tes par inversion magnétique, est éliminée par refroidissement de l'air et de l'eau.

En oscillant, la barre ferromagnétique transforme de l'énergie magnétique électrique en énergie mécanique, rayonnée sous forme d'ultrasons. Pour obtenir le rendement le plus élevé possible, c'est-à-dire produire, à partir de l'énergie électrique, un maximum d'énergie ultrasonore rayonnée, on aligne la fréquence de la tension d'alimentation sur la fréquence de résonance de la barre (fréquence propre ou fréquence de résonance).

La figure 4 montre la structure de base d'une installation de nettoyage à ultrasons magnétostrictive.

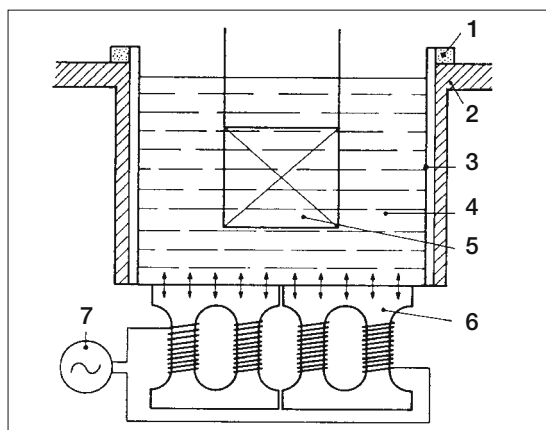


Figure 4  
Structure de base d'une installation de nettoyage à ultrasons magnétostrictive.

- 1 Couche isolante pour éviter la transmission des ultrasons au revêtement de la cuve
- 2 Bâti portant la cuve de nettoyage
- 3 Cuve de nettoyage
- 4 Liquide de nettoyage
- 5 Objet à nettoyer
- 6 Transducteur ultrasonore magnétostrictif
- 7 Générateur de signaux électriques

### 2.3.2 Transducteur piézo-électrique

Le transducteur piézo-électrique, ou électrostrictif, est fabriqué à partir de sel de Seignette, de quartz ou de matériaux ferro-électriques, tels que le zirconate-titanate de baryum ou de plomb (nom commercial PZT ou PXT), et également avec des feuilles de PVDF (fluor de polyvinylidène). La longueur ou l'épaisseur des plaques taillées dans des monocristaux, ou de corps obtenus par concrétion suivie d'une polarisation (dans le cas du PZT ou du PXT), varie sous l'effet d'un champ électrique (figure 5). Les plaques sont munies d'une couche servant de conducteur (électrodes). Dans un champ



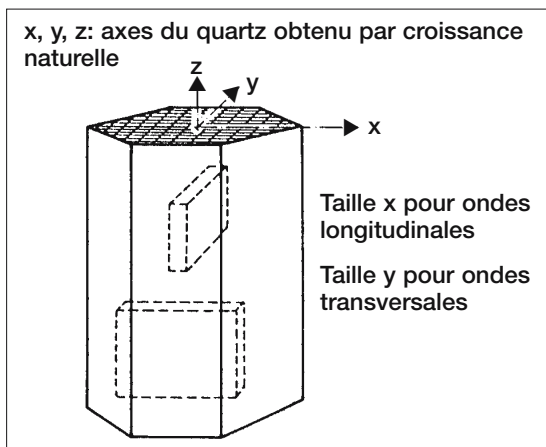


Figure 5  
Positions des quartz à taille x et y dans un cristal obtenu par croissance naturelle

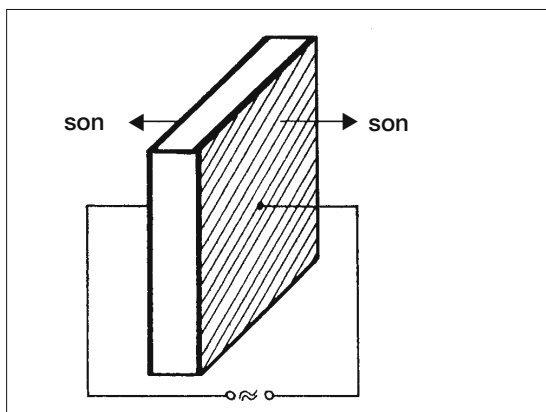


Figure 6  
Excitation d'une plaque ferroélectrique pour obtenir des oscillations d'épaisseur

électrique, les plaques ferroélectriques peuvent subir des oscillations d'épaisseur (figure 6), des vibrations longitudinales ou transversales, selon l'excitation. Ces oscillations forment le coeur du système d'excitation par ultrasons (par exemple, sonotrode).

Une plaque de quartz de 10 mm d'épaisseur a une fréquence de résonance d'environ 300 kHz. Cependant, pour les applications industrielles, les fréquences souhaitées sont nettement inférieures. La plaque de quartz devrait donc être beaucoup plus épaisse. Comme de tels quartz coûtent très chers, on ajoute en complément d'autres matériaux meilleur marché, afin de diminuer la fréquence de résonance et d'obtenir ainsi un résonateur composite.

Les oscillations des quartz peuvent atteindre des intensités acoustiques de  $55 \text{ W/cm}^2$ . A l'aide de lentilles à ultrasons ou de quartz creux, on peut même obtenir des intensités

de  $500 \text{ W/cm}^2$ . Le rendement électroacoustique des transducteurs piézo-électriques à ultrasons est extraordinairement élevé (par exemple,  $>60\%$  à 1 MHz avec un quartz).

Actuellement, on utilise presque exclusivement des matériaux PZT ou PXT pour des applications telles que le nettoyage et le soudage.

Il est intéressant de constater que l'effet piézo-électrique peut également être inversé (effet piézo-électrique réciproque = électrostriction). On peut donc n'utiliser qu'un seul et même transducteur comme émetteur et récepteur d'ultrasons. C'est pourquoi on parle désormais de «transducteur ultrasonore» – par opposition au simple vibreur ultrasonore, pour la technique magnétostrictive.

### 2.3.3 Emetteur capacitif à ultrasons

Les émetteurs de son magnétostrictifs et piézo-électriques produisent d'importants flux alternatifs, nécessaires pour des applications industrielles. Ils sont cependant moins efficaces pour produire, dans des gaz (l'air, par exemple), une vitesse acoustique dérivée élevée. Pour cet environnement, on a donc développé des transducteurs capacitifs ou électrostatiques spéciaux, qui peuvent être fabriqués très facilement. Avec de tels émetteurs, des fréquences supérieures à 200 kHz peuvent être produites dans l'air, ce qui est particulièrement appréciable pour certaines applications (appareils de surveillance, par exemple).

### 2.3.4 Production mécanique d'ultrasons

La production mécanique d'ultrasons n'a plus, aujourd'hui, une grande importance. L'appareil le plus connu doit être le sifflet de Galton, qui, sous une forme quelque peu modifiée, est encore utilisé de nos jours comme sifflet à ultrasons pour les chiens.

Dans l'industrie, les ultrasons produits mécaniquement font office de «sous-produits» sur certaines machines et installations. Par exemple, des mécanismes de sortie d'air ou d'échappement des gaz peuvent produire des bruits supérieurs à 20 kHz (soudage à l'arc de plasma, décapage au sable, moteur à réaction, buses de sortie d'air).



La formation de tourbillons dans des liquides (bruits de cavitation) provoquent également, en partie, des portions de bruits à très haute fréquence.

## **2.4 Normes internationales**

Les problèmes liés aux ultrasons sont régis par toute une série de normes internationales. Les normes CEI, EN et ISO sont les plus importantes dans notre cas.

Les quelque soixante normes abordent, dans leur majorité, les problèmes liés aux ultrasons sous l'angle médical et lors des essais de matériaux. Peu de normes existent pour le domaine industriel; la plupart traite des essais non destructifs de matériaux et des mesures effectuées dans des liquides.

Vous trouverez en annexe les normes internationales les plus importantes (état: juillet 1995).

## 3 Applications des ultrasons

### 3.1 Diagnostic et traitement en médecine

Au cours des dernières décennies, l'**application des ultrasons au diagnostic médical** s'est d'abord développée lentement, puis de manière fulgurante, grâce à l'électronique moderne et à l'informatique, passant ainsi d'une simple curiosité de laboratoire à une méthode clinique standard. La valeur clinique du diagnostic par ultrasons est fondée, en premier lieu, sur la visualisation des contours des tissus et organes par des échos ultrasonores, et également sur la mesure continue, par effet Doppler, de débits et de profondeurs (par exemple, de structure du cœur). Le diagnostic par ultrasons est largement répandu dans les spécialités médicales suivantes:

- ♦ neurologie (discipline étudiant les maladies nerveuses, leur formation et leur traitement)
- ♦ ophtalmologie
- ♦ cardiologie (discipline consacrée aux fonctions et aux maladies cardiaques)
- ♦ angiologie (discipline étudiant les vaisseaux sanguins et leurs maladies)
- ♦ gastro-entérologie (discipline consacrée aux maladies de l'estomac et de l'intestin)
- ♦ gynécologie
- ♦ urologie (discipline étudiant les maladies des organes urinaires)

Ces applications, qui, de nos jours, complètent, voire se substituent au radiodiagnostic ou à d'autres méthodes de diagnostic par imagerie médicale, sont regroupées sous le terme générique de «sonographie» (figure 7). La fréquence de fonctionnement de tels appareils se situe dans la bande de 1 à 10 MHz, le plus souvent entre 4 et 7 MHz.

Depuis des décennies, la **thérapie par ultrasons** utilise des ultrasons intensifs, afin d'obtenir des effets thérapeutiques précis. Toutefois, l'étendue de telles applications est bien plus modeste que pour les diagnostics. Les traitements par ultrasons permettent une amélioration de la circulation

sanguine, ce qui, dans certains cas, peut entraîner une réduction de la douleur, un arrêt des crampes et l'inhibition des inflammations. Cela s'applique particulièrement aux affections du système musculaire et osseux et du système nerveux périphérique, notamment les troubles des articulations, les sciaticques, les névralgies périphériques et les rhumatismes musculaires.

L'application localisée d'ultrasons peut également accélérer la production de cal lors de fractures (les endroits fracturés se soudent alors plus vite). En pratique, la thérapie par ultrasons, efficace à des fréquences de 175 kHz à 3 MHz (généralement 800 kHz), est combinée avec d'autres méthodes de traitement.

Des médicaments pouvant être inhalés par les patients (aérosols) sont produits avec des atomiseurs ultrasonores. Il est donc essentiel que les gouttelettes soient très fines, afin qu'elles pénètrent aussi loin que possible dans les bronches ou les poumons.

### 3.2 Essais non destructifs de matériaux

L'analyse non destructrice des matériaux et des pièces à travailler est l'une des applications techniques les plus importantes des

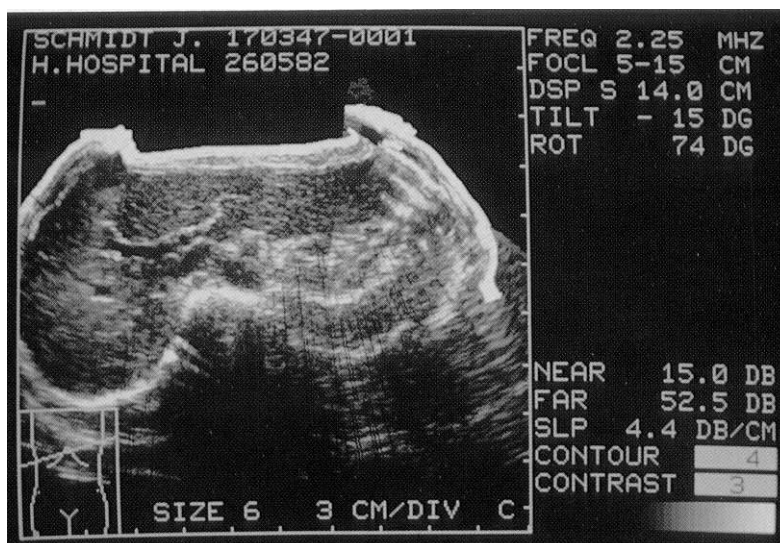


Figure 7  
Sonogramme d'un fœtus

ultrasons. Pour cela, on part du principe que la propagation du son dans les solides est influencée par le manque d'homogénéité. Nous connaissons un effet similaire dans notre vie quotidienne: on remarque une petite craquelure dans un verre à vin lorsque, en donnant un léger coup sur le verre, on entend non pas un son qui expire lentement, mais un bruit court et sec.

Lors des essais de matériaux à l'aide d'ultrasons, on peut non seulement déceler les défauts, mais également les localiser. De plus, selon la technique utilisée, on peut déterminer s'il s'agit de vides, de résidus d'autres matériaux ou de craquelures internes. L'importance de cette méthode pour les essais de matériaux, tant au niveau économique qu'à l'égard des règlements de sécurité, est incontestée. Dans beaucoup de cas, un tel procédé est devenu indispensable: par exemple, les moyens de transport et les réacteurs nucléaires, pour lesquels la sécurité est essentielle. Dans ces domaines, il existe des techniques de vérification encore plus modernes pour prévenir, dans la mesure du possible, une rupture d'essieu sur les wagons ou une rupture des aubes pour turbines dans les réacteurs.

Il existe deux procédés pour l'essai des matériaux (figure 8):

- ♦ Technique d'échographie ultrasonore ou méthode par réflexion
- ♦ Procédé par transmission

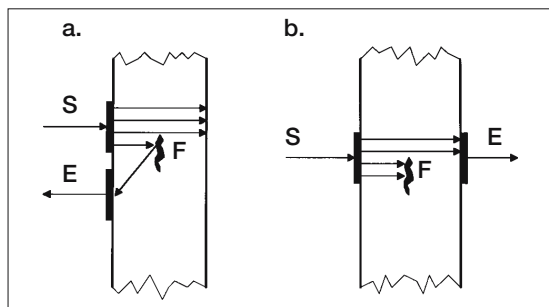


Figure 8  
Méthodes d'essais non destructifs de matériaux avec des ultrasons

- a. Technique d'échographie ultrasonore ou méthode par réflexion
- b. Procédé par transmission
- S Emetteur
- E Récepteur
- F Défaut du matériau

L'épaisseur d'un matériau peut également être mesurée avec des ultrasons (technique d'échographie ultrasonore ou méthode par réflexion); mais c'est un sujet que nous n'aborderons pas ici.

Tout comme un radar, la **technique d'échographie ultrasonore** (figure 9) utilise l'émission de courtes impulsions haute fréquence. Le transducteur sert à la fois d'émetteur et de récepteur. Les ondes ultrasonores réfléchies par les surfaces de séparation, les fissures et les retassures sont captées par le transducteur, commuté entre-temps sur le mode réception. Selon la distance parcourue par l'impulsion sonore, il s'écoule plusieurs microsecondes, voire millisecondes, jusqu'à son retour, après réflexion sur la surface de l'objet à tester. Une interruption-séparation synchronisée sur le cycle émission-réception dévie, de gauche à droite, le faisceau électronique d'un tube cathodique, de façon à donner une image stable sur l'écran, pour autant qu'il y ait adaptation à la célérité et à la longueur du trajet dans l'objet à tester. Les transducteurs ultrasonores utilisés à cet effet ont un rayonnement directif, la directivité augmentant fortement avec la fréquence et les dimensions du transducteur.

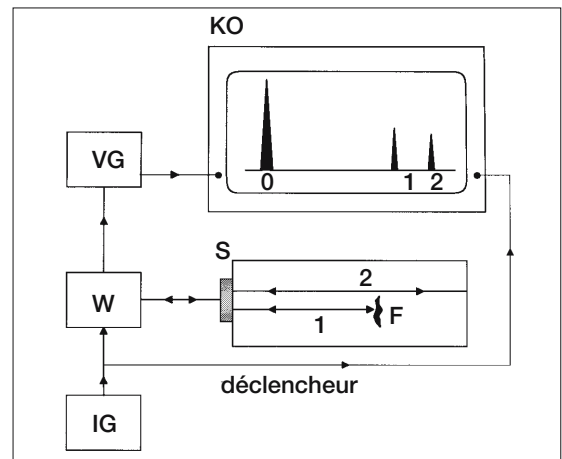


Figure 9  
Technique d'échographie ultrasonore

- IG Générateur d'impulsions
- W Répartiteur
- S Transducteur (émetteur/récepteur)
- F Défaut
- VG Amplificateur/Redresseur
- KO Tube cathodique

Les fréquences utilisées pour la technique d'échographie ultrasonore se situent normalement entre 0,5 et 4 MHz. Dans des cas extrêmes, par exemple, la recherche de défauts minimes dans des matériaux à faible perte et à grains très fins ou dans des matériaux homogènes, on utilise des fréquences pouvant atteindre 20 MHz. Plus le matériau à tester a de gros grains (béton, pierres artificielles, etc.), plus la fréquence utilisée doit être basse. Le diamètre des palpeurs est de 5 à 50 mm; leur puissance de 10 W à 1 kW.

Pour ce qui est du **procédé par transmission** (figure 10), les ondes ultrasonores pénètrent dans une pièce d'un côté et sont reçues de l'autre côté par un capteur. L'intensité acoustique transmise permet de mesurer la défectuosité de la pièce. Contrairement à la technique d'échographie, on travaille avec une puissance ultrasonore constante dans le temps, mais la possibilité d'observer les défauts est limitée.

Avec les procédés décrits, la résolution peut atteindre 0,1 mm, suivant la distance de mesure et la fréquence.

### 3.3 Nettoyage par ultrasons

Les ultrasons énergétiques sont le plus fréquemment utilisés pour nettoyer des objets et produits, tels que des

- ♦ pièces utilisées en mécanique de précision et technique de super finition
- ♦ instruments médicaux, en particulier chirurgicaux
- ♦ appareils d'écriture à encre de Chine et appareils enregistreurs à plume
- ♦ lentilles optiques, en particulier avant le traitement antireflet
- ♦ verres et montures de lunettes
- ♦ récipients en verre
- ♦ prothèses dentaires
- ♦ bijoux (métaux et pierres précieuses) et couverts
- ♦ chambres noires d'appareils photo
- ♦ tubes cathodiques, en particulier avant le revêtement
- ♦ blocs électriques
- ♦ matériaux et pièces à galvaniser
- ♦ objets contaminés de toute sorte

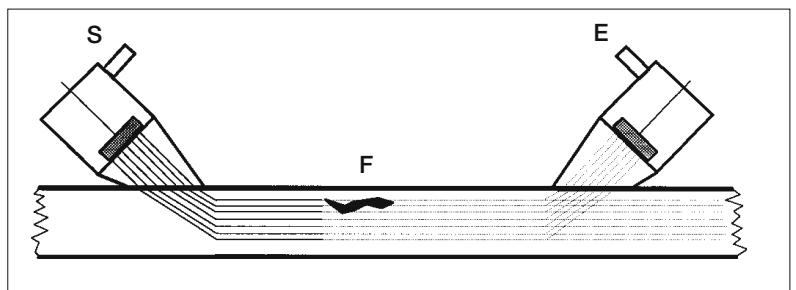


Figure 10  
Procédé par transmission

S Emetteur  
E Récepteur  
F Défaut

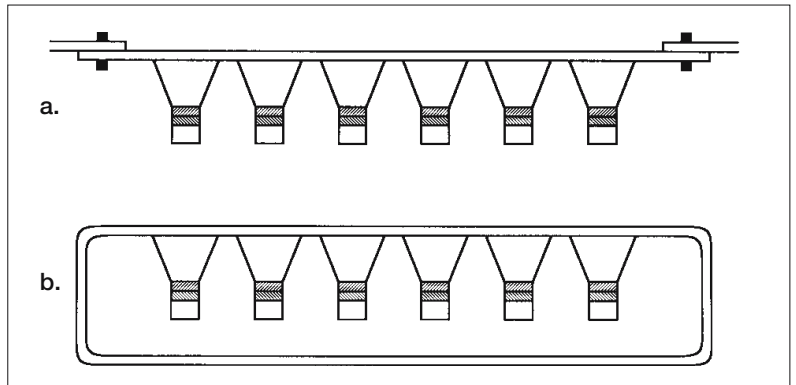


Figure 11  
Disposition des résonateurs composites piézo-électriques dans les cuves de nettoyage

a. Résonateur en forme de plaque  
b. Résonateur immergé

L'objet à nettoyer est plongé dans une cuve remplie de détergent. La plupart du temps, plusieurs transducteurs ultrasonores arrimés à une cuve métallique produisent, dans un fluide, un puissant champ ultrasonore. Pour des grandes cuves, on utilise également des résonateurs en forme de plaque, plongés dans le détergent ou directement mis en place dans la paroi de la cuve (figure 11).

Lorsque l'intensité acoustique des ultrasons dans un fluide est suffisante, on observe de la **cavitation** le long des surfaces limites solides. C'est le mot clé pour expliquer le processus de nettoyage. Pour des vitesses de particules localement élevées, il se produit une dépression dynamique qui suffit à déclencher un processus d'évaporation dans les surfaces limites. Les bulles de vapeur ainsi créées ne sont pas stables, mais disparaissent peu après leur création. Des pressions de quelques kbars et des températures de plusieurs centaines de Kelvin (jusqu'à 2500 K) apparaissent pendant l'implosion des bulles (figure 12). C'est ainsi que se produit le «bruit de cavitation». Une température

élevée du milieu facilite la cavitation. Les impuretés sont arrachées de la pièce par l'implosion des bulles, ce processus pouvant être accéléré par des ultrasons pulsants.

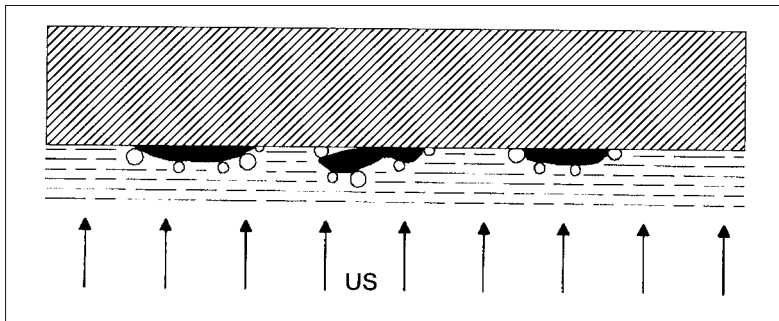


Figure 12  
Fonctionnement du nettoyage par ultrasons  
US = Rayonnement ultrasonore

On utilise principalement des fréquences de 20–40 kHz pour le nettoyage par ultrasons. En effet, des fréquences moins élevées produiraient une exposition au bruit très importante dans la gamme des fréquences audibles, tandis que des fréquences plus élevées réduiraient l'effet d'épuration. Pour des pièces très fragiles ou très petites, on utilise des cuves avec des fréquences de 50 à 100 kHz.

L'intensité acoustique requise varie de 0,5 à 5 W/cm<sup>2</sup> selon le degré de salissure et le détergent. Pour des grandes cuves, la puissance spécifique (exprimée en Watt par litre) est d'environ 10 W/l. Les petites cuves nécessitent une puissance spécifique plus importante.

Les temps de nettoyage vont de quelques secondes à quelques minutes au plus. Sur le marché, on trouve toute une gamme d'appareils allant de la petite cuve de moins d'un litre aux grandes installations de plusieurs centaines de litres (figure 13).



Figure 13  
Bain de nettoyage par ultrasons

### 3.4 Soudage par ultrasons

Outre le nettoyage, le soudage représente l'application la plus courante des ultrasons. Le soudage par ultrasons n'est utilisé que dans le domaine des matières synthétiques. On peut également intégrer des pièces de métal dans les matières synthétiques grâce aux ultrasons. Pour cela, on utilise toujours du thermoplastique.

Le soudage par ultrasons est employé dans les domaines suivants pour fabriquer en série des pièces à partir de matières synthétiques:

- ♦ industrie électrique (prises de courant, interrupteurs, boîtiers, etc.)
- ♦ construction automobile (boîtes à gants, tableaux de bord, réservoirs d'essence, feux arrière)
- ♦ industrie photographique (cadre-caches, viseurs, chambres noires d'appareils photo)
- ♦ industrie électronique
- ♦ emballages (canettes, bouteilles, tubes, ampoules)
- ♦ électroménager (boîtiers)
- ♦ électronique grand public (boîtiers, écouteurs)
- ♦ horlogerie (boîtiers de montres bon marché)
- ♦ bureautique (du stylo-bille au bureau en plastique en passant par l'ordinateur)
- ♦ articles de sport

Pour le soudage par ultrasons, on utilise des résonateurs composites, dont la résonance se situe entre 20 et 70 kHz. La puissance nécessaire pour une installation habituelle, posée sur un établi, est de quelques kilowatts. Il existe également des soudeuses portables, ainsi que des grands robots de soudage, constitués de plusieurs unités.

Le cristal agit – souvent en plus d'un transformateur rapide – sur l'outil de soudage proprement dit, appelé sonotrode (figure 14). Celle-ci doit être réglée exactement sur la fréquence de fonctionnement.

Le soudage de pièces en matière synthétique est un procédé thermique. Sous l'action des ultrasons, la partie à souder est chauffée à une température supérieure à son point de ramollissement; elle devient alors visqueuse, voire liquide, et le soudage peut être effectué. L'absorption des ultrasons génère de la





Figure 14  
Exemples de sonotrodes

chaleur. Avantage du procédé: la chaleur ne doit pas être alimentée de l'extérieur. En effet, les matières synthétiques ont une mauvaise conductibilité thermique et subiraient, dans la plupart des cas, des dommages, si elles étaient chauffées. Grâce aux ultrasons, le processus de soudage peut être déclenché à l'endroit même de la soudure.

Le processus de soudage génère du bruit, suite aux frottements. Dans des cas extrêmes, on peut atteindre des niveaux de 140 dB (linéaires).

En plus d'une soudure parfaite et durable, il faut mentionner comme avantage la rationalisation et la possibilité d'automatiser. La consommation d'énergie est faible et les temps de travail sont courts (0,05 à 0,5 s). Il en résulte un faible dégagement de chaleur, ce qui protège le matériau. Souvent, il ne serait même pas possible de fabriquer certaines pièces ou produits intermédiaires sans soudage par ultrasons.

Une soudeuse à ultrasons comporte essentiellement les pièces suivantes (figures 15 et 16):

- ♦ un générateur d'ultrasons,
- ♦ un convertisseur transformant les oscillations électriques en oscillations mécaniques (transducteur),
- ♦ une section de transformation (booster),
- ♦ une sonotrode transmettant les oscillations à la pièce à souder,
- ♦ une presse pneumatique appliquant l'ensemble convertisseur-sonotrode contre la pièce à souder.

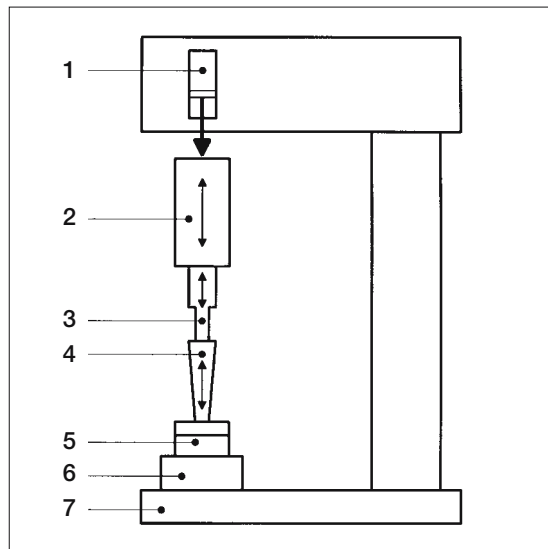


Figure 15  
Représentation schématique d'une soudeuse à ultrasons

- 1 Presse
- 2 Transducteur
- 3 Section de transformation
- 4 Sonotrode
- 5 Pièce à souder
- 6 Enclume
- 7 Socle



Figure 16  
Exemple de soudeuse à ultrasons

Dans la pratique, on ne peut réaliser, avec une soudeuse à ultrasons, que les procédés suivants (figure 17):

- ♦ soudure
- ♦ intégration
- ♦ rivetage

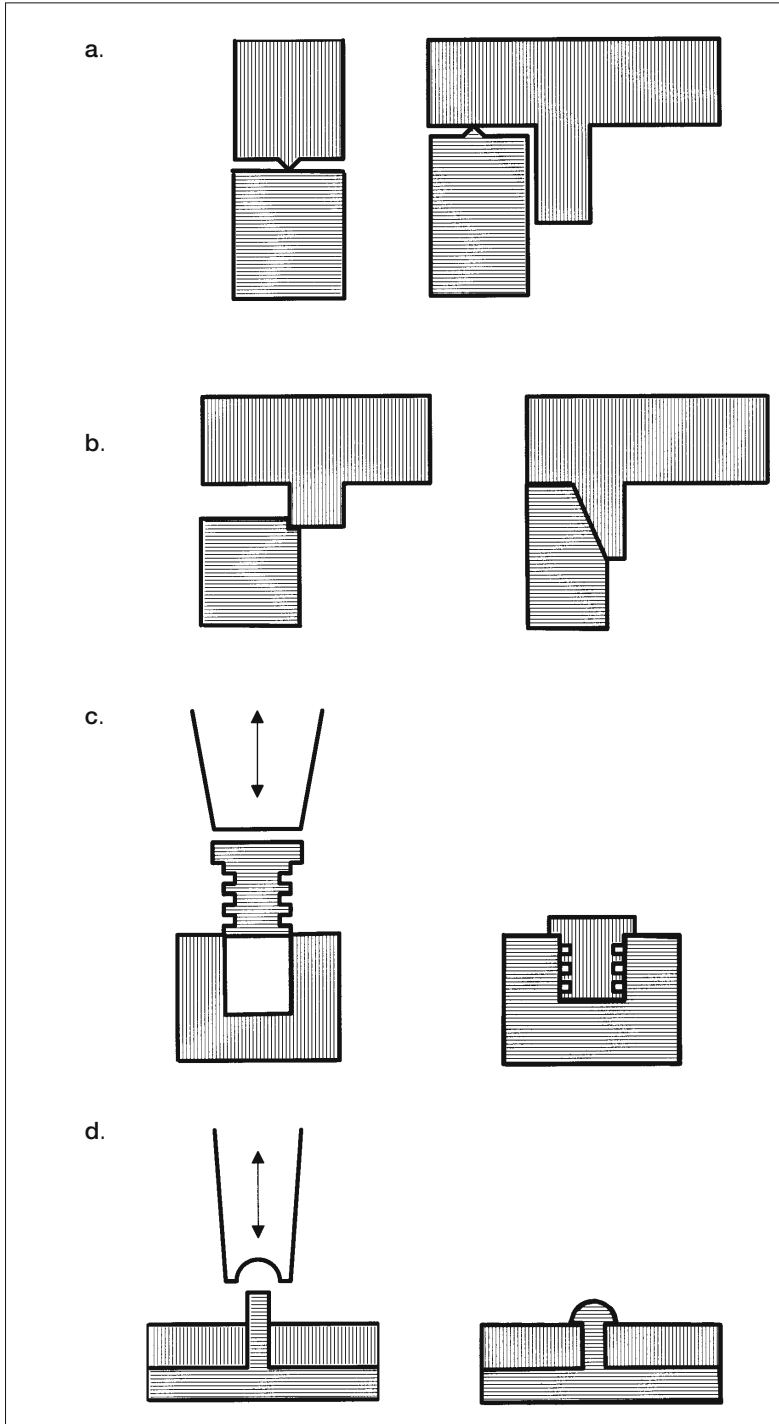


Figure 17  
Procédés d'usinage possibles avec une soudeuse à ultrasons

- a. soudage de matières synthétiques avec arête de soudure
- b. soudage de matières synthétiques par écrasement (à gauche, avant le soudage; à droite, après)
- c. intégration de pièces métalliques dans des matières synthétiques
- d. rivetage par ultrasons

### 3.5 Perçage par ultrasons

Le perçage peut être considéré comme l'un des plus anciens procédés des techniques ultrasonores industrielles. Toutefois, le qualificatif de perçage n'est pas tout à fait exact, puisque, dans la plupart des cas, il s'agit de meulage ou d'usinage.

Les machines utilisées ressemblent beaucoup aux soudeuses à ultrasons. Les vibrations sont engendrées par un transducteur magnétostrictif ou piézo-électrique dans la bande de 20 kHz, ou supérieure. Avec un abrasif approprié (généralement du carbure de silicium), les outils en vibration peuvent creuser ou graver dans des matériaux durs et cassants (verre, céramique, pierre précieuse, etc.). Les temps de travail varient de quelques minutes à plusieurs heures selon le matériau et le volume de matière à enlever. Par exemple, pour le verre, l'enlèvement de matière (environ 1000 mm<sup>3</sup>/min à une puissance de 400 Watt) est mille fois plus élevé que pour le diamant. Le travail effectué est extrêmement précis (figure 18).

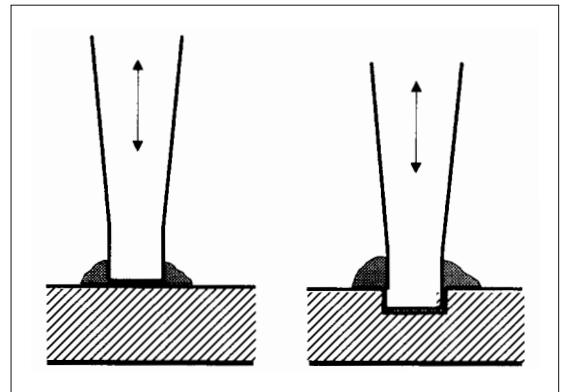


Figure 18  
Perçage par ultrasons

### 3.6 Usinage mécanique

On trouve sur le marché des appareils appelés machines à roder, pouvant être utilisées dans la fabrication d'outils ou de machines de précision. A l'aide d'un tuyau flexible, contenant un câble de transmission, on communique des mouvements axiaux d'une amplitude de quelques  $\mu\text{m}$  à un outil ressemblant à un crayon. On peut ainsi usiner des pièces de précision (par exemple, outils à poinçonner ou gicleurs), en ajoutant des abrasifs.



### 3.7 Génie sous-marin

L'acoustique, et avec elle – comme indiqué en introduction – les ultrasons, sont utilisés depuis longtemps déjà dans le génie sous-marin. Les sonars ont donné leurs lettres de noblesse aux ultrasons, en particulier pour la détection d'obstacles immergés et la mesure des profondeurs des mers. L'acronyme SONAR (**S**ound **N**avigation **A**nd **R**anging) est apparu durant la seconde guerre mondiale. C'est le pendant du RADAR, autre acronyme existant déjà à l'époque (**R**adio **D**etecting **A**nd **R**anging).

Les cloches sous-marines utilisées au début du siècle étaient les prédécesseurs des sonars et devaient signaler aux bateaux la présence de hauts-fonds dangereux (figure 19). Cent trente-cinq phares côtiers de par le monde étaient équipés de tels appareils. Un mécanisme entouré d'une carcasse métallique produisait des oscillations se propageant dans l'eau et atteignant les bateaux par tous les temps, jusqu'à 24 km de distance. Les signaux pouvaient être captés à l'aide d'un microphone.

De nos jours, on utilise également les sonars pour mesurer la profondeur des océans (détection acoustique verticale). Ce procédé est connu sous le nom de sondage acoustique par écho (figure 20).

Les conditions de propagation des ultrasons en mer ont été étudiées de très près et servent aujourd'hui de base à des mesures précises. Par exemple, la température de l'eau, la salinité et les zones de température sont très importantes pour la célérité. De plus, on doit connaître la capacité d'absorption en fonction de ces paramètres.

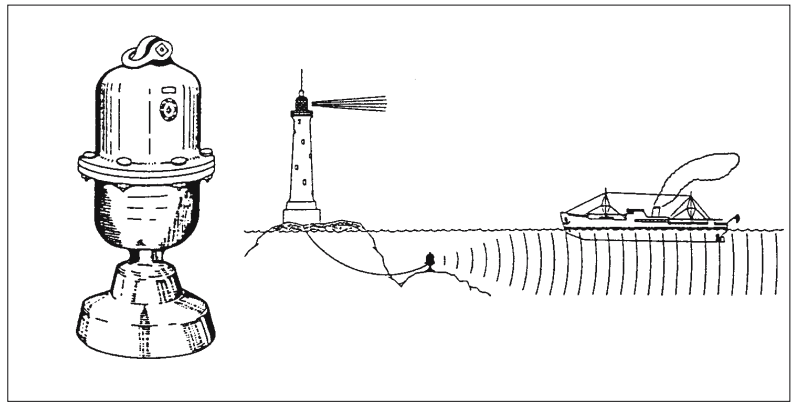


Figure 19  
Cloches sous-marines, prédécesseurs de l'écho-sondeur

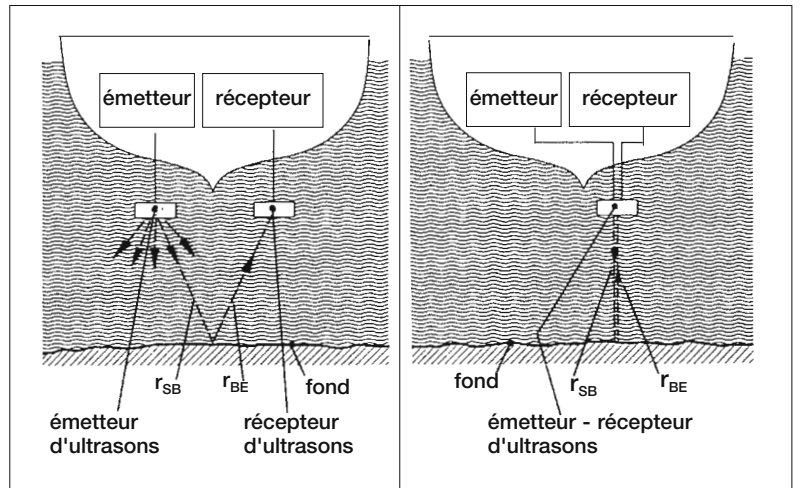


Figure 20  
Principe du sondage acoustique par écho.  
à gauche: système bistatique  
à droite: système monostatique (émetteur et récepteur au même endroit)  
 $r_{SB}$ : rayon de l'écho émis (distance émetteur-fond)  
 $r_{BE}$ : rayon de l'écho renvoyé par le fond (distance fond-récepteur)

### 3.8 Autres domaines d'application

Pour terminer, mentionnons brièvement quelques domaines d'application supplémentaires, dont certains sont plutôt fantaisistes:

- ◆ émulsification, dispersion et homogénéisation de peintures, d'émulsions photosensibles, du lait, etc.
- ◆ sonochimie (réactions chimiques sous l'effet des ultrasons)
- ◆ tamisage ultrasonore des particules les plus fines
- ◆ affinage lors de la solidification de métal en fusion
- ◆ fabrication de dispersions (mélanges)
- ◆ brasage et étamage d'aluminium
- ◆ placage et polissage électriques
- ◆ fourbissage de métaux
- ◆ maturation artificielle du vin
- ◆ sonorisation des bains de développement en photographie pour affiner le grain
- ◆ détartrage des dents (fréquence de travail d'environ 40 kHz)
- ◆ dégazage de liquides (par exemple, lors de la fonte du verre et de métaux)
- ◆ «épouvantails acoustiques» pour éloigner les oiseaux (gares, ports, agriculture)
- ◆ idem pour les souris et les rats dans les caves
- ◆ essais en acoustique des salles sur modèles
- ◆ appareils de surveillance (également en plein air), détecteurs de mouvements fondés sur l'effet Doppler
- ◆ holographie par ultrasons (semblable aux hologrammes présents sur la plupart des cartes de crédit)
- ◆ microscopie ultrasonore (résolution égale ou supérieure à celle obtenue avec un microscope optique)
- ◆ tomographie par ultrasons (radiographie d'une couche du corps humain ou de parties du corps)

## 4 Effets des ultrasons sur la santé, valeurs limites

### 4.1 Généralités

Dans cette section, nous tenterons, sur la base des connaissances actuelles en la matière, de répondre aux questions suivantes: les ultrasons peuvent-ils nuire à notre santé et où se situent les valeurs limites? Nous nous intéresserons non seulement aux patients qui sont examinés ou traités médicalement avec des ultrasons, mais également aux personnes qui travaillent à proximité d'installations ultrasonores industrielles.

En principe, les dommages liés aux ultrasons dépendent de la pression sonore et de son intensité. Il est important de savoir comment les ultrasons sont transmis, c'est-à-dire directement au corps par voie solide ou s'ils agressent l'ouïe par voie aérienne. C'est pourquoi nous devons établir des valeurs limites parfaitement distinctes.

### 4.2 Effets physiologiques des ultrasons

Il existe peu de travaux scientifiques traitant de ce sujet. W.I. Acton a mené l'une des rares études sur le sujet en 1974 (figure 21).

Les mécanismes possibles pour les effets biologiques des ultrasons sont la cavitation, qui engendre des modifications chimiques, le déchirement de molécules très longues par les hautes fréquences et l'augmentation de la température par absorption dans les tissus. Lorsque l'intensité est suffisante, les ultrasons peuvent réchauffer des parties de tissus. Cet effet intervient seulement si les ultrasons sont couplés directement aux tissus.

Pour évaluer les risques de lésions dues aux ultrasons lors d'un diagnostic, il convient de considérer le fait suivant: la majorité des procédés de sonographie utilisent des impulsions ultrasonores courtes et répétitives de quelques microsecondes, ainsi qu'une suite d'impulsions d'un millième de seconde. On

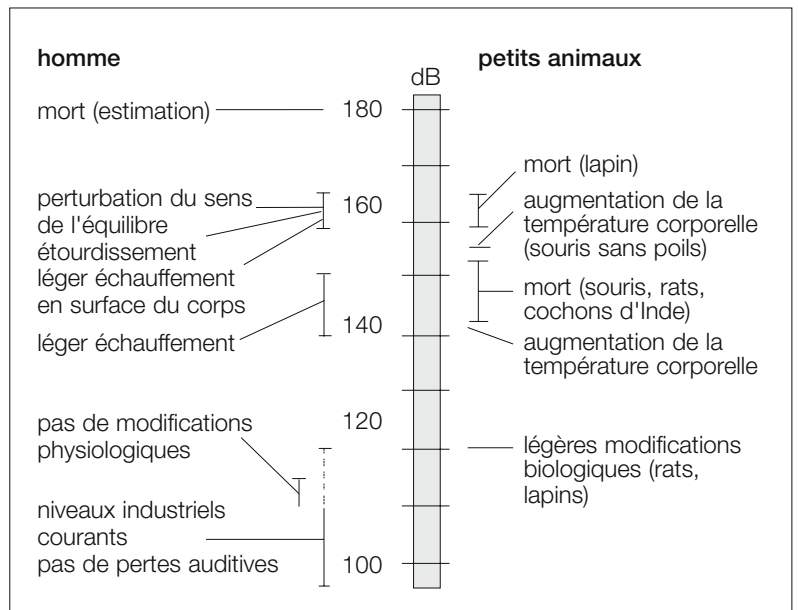


Figure 21  
Effets physiologiques des ultrasons

doit donc différencier l'intensité ultrasonore temporelle et locale moyenne et l'intensité maximale, temporelle et locale, intervenant au cours d'une impulsion.

Avec un transducteur utilisé dans le traitement par ultrasons, on remarque que la température des tissus faiblement irrigués augmente de 1° C après 10 min., à une puissance de 50 mW. Compte tenu du refroidissement entraîné par la circulation sanguine, la température n'augmente pas, même pour des traitements plus longs.

De manière générale, les ultrasons sont considérés comme inoffensifs pour la santé, si on ne dépasse pas une **intensité moyenne de 0,1 W/cm<sup>2</sup>** (ceci vaut pour la sonographie et la thérapie). Cette valeur limite, établie en 1976 par l'American Institute of Ultrasound in Medicine (AIUM), est toujours valable aujourd'hui. Pour des temps d'exposition compris entre 500 s et 1 s, des intensités plus élevées dans les tissus sont autorisées, si le produit [intensité x temps d'exposition] est inférieur à 50 Ws/cm<sup>2</sup>. Par la suite, ces recommandations ont été reprises par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.). Comme, dans le traitement par ultrasons,

des effets biologiques sont recherchés pour des zones délimitées, l'OMS recommande une moyenne temporelle du maximum spatial de  $3 \text{ W/cm}^2$  au plus dans les tissus. En ordre de grandeur, cette valeur est supérieure à la limite. Toutefois, des vérifications étendues, menées par les fabricants des appareils, ont montré que, en pratique, ces valeurs n'étaient jamais approchées dans la sonographie. Le seuil de  $0,1 \text{ W/cm}^2$  a été fixé d'après des études prenant non seulement en compte le réchauffement des tissus, mais également les réactions mécaniques et les effets de la cavitation sur les tissus lors d'une introduction ultrasonore directe.

De multiples études internationales ont prouvé que le diagnostic et la thérapie par ultrasons, tels qu'ils sont utilisés aujourd'hui, n'ont aucun effet secondaire préjudiciable.

Les ultrasons sous forme de son aérien n'ont aucune conséquence physiologique, à des intensités normales. En effet, lors du passage de l'air au corps humain, seul  $0,05 \%$  de la pression acoustique initiale est transmis; les intensités résultantes sont donc très faibles. De plus, on estime que, à une distance de  $0,3 \text{ m}$ , un niveau de  $120 \text{ dB}$  dans l'air, en champ libre et avec une propagation sphérique, correspond à une intensité de  $1 \text{ W/m}^2$ , ou  $0,1 \text{ mW/cm}^2$ , soit une valeur mille fois inférieure à la limite suggérée.

## 4.3 Effets des ultrasons sur l'ouïe

### 4.3.1 Généralités

Alors que l'on se préoccupe depuis longtemps déjà des effets physiologiques des ultrasons, leur influence sur l'ouïe n'a été étudiée que relativement tard. Les effets des ultrasons sur l'ouïe peuvent être classés en trois groupes:

- ❶ Ultrasons non modulés rayonnés par voie aérienne
  - ♦ Dans ce cas, on peut percevoir un son dont la hauteur varie avec la fréquence de l'ultrason.
  - ♦ Les sons perçus correspondent en fait à des oscillations sous-harmoniques du signal ultrasonore. Avec des niveaux de l'ordre de  $150 \text{ dB}$ , on a constaté expérimentalement des décalages temporaires du seuil d'audibilité (TTS, temporary threshold shift) à la fréquence du sous-harmonique. Bien que nombre d'études confirment l'apparition de maux de têtes, de malaises, de bourdonnements d'oreilles, voire de nausées, on ne recense à ce jour aucun cas de lésion irréversible de l'ouïe.
- ❷ Ultrasons modulés par un signal basse fréquence, transmis par voie aérienne ou osseuse
  - ♦ Dans ce cas, le signal peut devenir audible, c'est-à-dire qu'il y a démodulation.
  - ♦ A l'aide d'ultrasons fortement focalisés et modulés en amplitude, on peut transmettre de l'information directement à l'oreille interne. Le volume du son basse fréquence perçu croît avec le degré de modulation, ce qui est concevable en théorie.
- ❸ Ultrasons non modulés, transmis par voie solidienne
  - ♦ Il peut y avoir une perception auditive pour des fréquences allant jusqu'à  $200 \text{ kHz}$ . Cette sensation correspond à celle d'un son aigu et généralement gênant. La hauteur perçue est presque indépendante de la fréquence de l'ultrason transmis.
  - ♦ Les recherches effectuées sur la transmission par voie osseuse montrent que des ultrasons d'une fréquence maximale de  $200 \text{ kHz}$  peuvent provoquer des sensations semblables aux sensations auditi-

ves, pour autant qu'ils soient transmis par voie osseuse. Ces observations sont intéressantes car, chez l'homme, les os crâniens jouent un rôle non négligeable pour l'audition.

La figure 22 montre la courbe du seuil d'audibilité par voie osseuse dans le domaine des sons audibles et des ultrasons. Il est intéressant de noter la pente raide entre 14 et 20 kHz, qui indique – probablement – le passage à un autre mécanisme de fonctionnement encore inconnu. On suppose qu'il s'agit d'un effet hydrodynamique dans la cochlée, à proximité de la fenêtre ovale, accompagné d'une excitation de l'organe de Corti, ou alors d'une excitation inadéquate et directe du nerf auditif par vibrations mécaniques des parois osseuses qui l'entourent, surtout à l'endroit où il quitte le labyrinthe. On sait uniquement avec certitude que les sensations dues aux sons transmis par voie osseuse ne sont pas très fortes. Par contre, elles sont très désagréables. De plus, ces sons provoquent souvent des effets ultérieurs sous forme de bourdonnements d'oreilles.

Les développements exposés montrent clairement la complexité du problème des ultrasons en relation avec l'audition chez l'homme. Jusqu'à ce que l'on ait de nouveaux résultats, il faut partir de l'hypothèse que les ultrasons de forte intensité sont en mesure de porter atteinte, voire de léser l'organe de Corti, et même les cellules auditives.

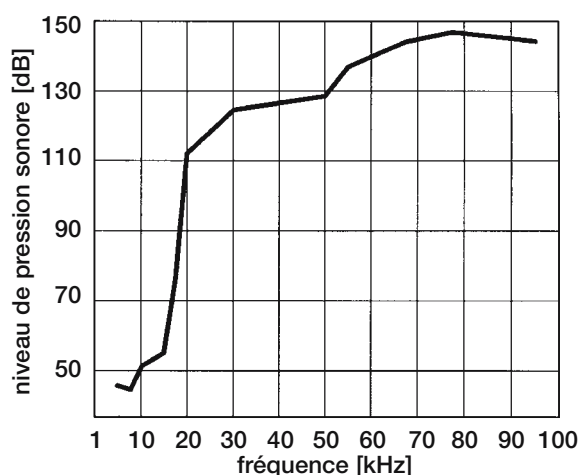


Figure 22  
Seuil d'audibilité par voie osseuse dans le domaine des sons audibles et des ultrasons (mesuré par Corso sur 38 hommes et 37 femmes entendants)

Pour ce qui est des applications médicales, on peut exclure les composantes du bruit dans le domaine audible. En revanche, pour les applications industrielles, les conditions sont radicalement différentes. Les explications suivantes vous aideront à apprécier ce problème.

La plupart des procédés industriels ont une fréquence de travail supérieure à 20 kHz, se situant donc dans le domaine inaudible. Cependant, des sons sous-harmoniques élevés, généralement situés à la moitié de la fréquence de travail, surviennent souvent. On a même observé, dans certains cas, des sous-harmoniques à  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{5}$ ,  $\frac{1}{6}$ ,  $\frac{1}{8}$  ou  $\frac{1}{10}$  de la fréquence de travail. Ils représentent un risque pour l'ouïe ou sont considérés comme nocifs.

On sait depuis longtemps que l'on peut percevoir les ultrasons, même si on ne les entend pas vraiment. On ne reçoit pas un son, mais plutôt une pression dans l'oreille ou la tête. Les personnes exposées longtemps aux ultrasons se plaignent souvent de maux de tête, de malaises et de vertiges. On a observé les mêmes phénomènes après une exposition intensive aux infrasons (sons dont la fréquence est très basse, c'est-à-dire inférieure à 20 Hz).

#### 4.3.2 Valeurs limites

D'après les connaissances actuelles, les **ultrasons** sont inoffensifs, pour un niveau maximum inférieur à 140 dB et un niveau équivalent de pression acoustique (base 8 h/jour) inférieur à 110 dB.

Comme cette valeur limite se réfère exclusivement à des composantes de signaux avec des fréquences supérieures à 20 kHz, on peut utiliser un filtre lors de la mesure, afin de contenir ces composantes en dessous de 20 kHz. Vous trouverez des indications précises à l'alinéa 5.3.3.

Les composantes acoustiques dans le **champ d'audition normale** sont considérées comme nuisibles pour l'ouïe, si le niveau de pression acoustique continu équivalent  $L_{eq}$  atteint 88 dB(A) et plus (par rapport à un temps de travail de 8 h/jour, maximum 2000 h/an).

Des niveaux de pression acoustique continus équivalents  $L_{eq}$  de 85 à 87 dB(A) par jour ou par semaine, ou un bruit impulsif maximum  $L_{peak}$  supérieur à 140 dB(C) sont considérés comme plage limite de mise en danger de l'ouïe. Les pondérations de fréquence A et C (CEI 651) sont représentées figure 23.

Dans certaines publications, la combinaison de filtres AU est proposée pour évaluer les signaux acoustiques jusque dans le domaine des ultrasons. Elle se compose du filtre passe-bas «U», décrit dans la norme CEI 1012-1990, et du filtre de pondération «A». Selon ce concept, un niveau de pression acoustique continu de 120 dB, pour une fréquence de 20 kHz, et un niveau de 135 dB, à 25 kHz, seraient autorisés.

Cependant, d'après la norme CEI 1012, le filtre U ne doit pas être considéré comme un filtre de pondération, mais comme une aide, afin d'éviter que les résultats pour le champ d'audition normale ne soient faussés par des signaux ultrasonores simultanés.

Des incertitudes demeurent sur les conséquences de signaux acoustiques (de son pur) intenses dans la gamme audible la plus élevée. Par conséquent, la Suva a décidé de répertorier toutes les composantes acoustiques jusqu'à 20 kHz et de n'utiliser que le

filtre de pondération A pour les mesures. (Diverses méthodes pour contenir les composantes ultrasonores sont présentées à l'alinéa 5.2.3).

On tente ainsi de prévenir au mieux les risques liés au bruit (pertes auditives et graves nuisances) pour le personnel travaillant sur des installations à ultrasons – en particulier les jeunes et les femmes. On a constaté dans la pratique que beaucoup de personnes exposées à des domaines extrêmes utilisent des moyens de protection de l'ouïe contre les nuisances.

## 4.4 Règles de comportement face aux installations à ultrasons

### 4.4.1 Femmes enceintes

Selon l'hypothèse justifiée que la transmission se fait exclusivement par voie aérienne, les intensités créées par les appareils à ultrasons sont tellement faibles qu'on peut pratiquement exclure la mise en danger de la mère et de l'enfant. Cet avis est partagé par des experts travaillant pour des institutions renommées (par exemple, l'Institut de technique biomédicale, EPFZ; l'Institut pour l'hygiène et la psychologie du travail, EPFZ; l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP; l'Office fédéral de la santé publique OFSP; le Bundesanstalt für Unfallforschung, BAU, Dortmund).

### 4.4.2 Travaux avec des appareils médicaux

Les têtes ultrasonores des appareils thérapeutiques et chirurgicaux, qui doivent être manipulées par les opérateurs pendant le fonctionnement, sont à isoler suffisamment contre la transmission par voie solide. Les thérapeutes qui travaillent dans l'eau avec des ultrasons peuvent se protéger avec des vêtements appropriés, confectionnés dans un matériau chargé en gaz (par exemple, mousse néoprène à cellules fermées).

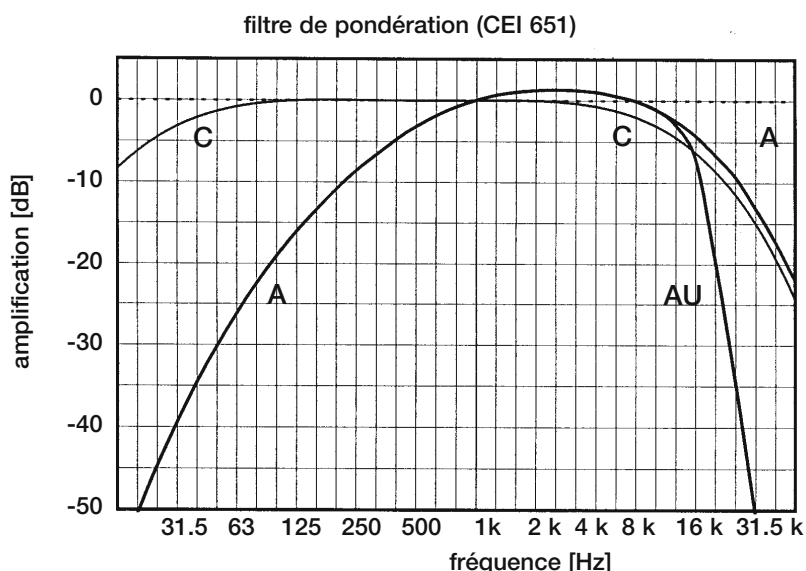


Figure 23

- A Filtre de pondération A (jusqu'à 20 kHz: d'après la norme CEI 651; au-dessus de 20 kHz: tracé normal)
- C Filtre de pondération C (jusqu'à 20 kHz: d'après la norme CEI 651; au-dessus de 20 kHz: tracé normal)
- AU Combinaison de filtres AU (CEI 1012-1990)



#### 4.4.3 Travaux avec des installations à ultrasons

On peut établir les règles de comportement suivantes:

- ♦ De manière générale, il ne faut pas pénétrer dans les baignoires de nettoyage. S'il est toutefois indispensable de travailler dans de tels baignoires, il faut utiliser des gants imperméables doublés de filets.
- ♦ Si les valeurs limites indiquées à l'alinéa 4.3.2 sont dépassées, il faut utiliser des moyens de protection de l'ouïe (ouates spéciales, tampons ou coquilles).
- ♦ Les transducteurs actifs ne doivent pas être touchés (par exemple, sonotrode d'une soudeuse).
- ♦ Les protections existantes contre le bruit sont à utiliser strictement (par exemple, couvercle des baignoires, enceintes acoustiques, etc.).



## 5 Mesure du bruit des installations à ultrasons

### 5.1 Principes de base

Pour mesurer le bruit des installations à ultrasons, on utilise des appareils de mesure habituels, hors de leur domaine d'application usuel. On peut observer de gros écarts pour des signaux acoustiques supérieurs à 16 kHz, même avec des sonomètres de haute qualité répondant aux exigences de la classe 1 (norme CEI 804/651). Il est donc indispensable de connaître les caractéristiques des instruments de mesure utilisés pour des installations à ultrasons, en particulier celles du microphone.

Second problème: certes, la pondération A n'est définie que jusqu'à 20 kHz; toutefois, elle ne s'arrête nullement après 20 kHz, mais faiblit de plus en plus (figure 23). Il faut donc prendre des mesures complémentaires afin de contenir les composantes ultrasonores.

Dans tous les cas, avant de mesurer le bruit, il est utile de déterminer, d'après les indications du constructeur, où se situe la fréquence de travail de l'installation à ultrasons et à quelles fréquences sont les sous-harmoniques.

### 5.2 Mesure et pondération dans le domaine audible

#### 5.2.1 Objectif

Afin de connaître le bruit à un poste de travail selon les valeurs limites de la Suva pour la gamme des fréquences audibles (alinéa 4.3.2), tous les signaux acoustiques importants jusqu'à 20 kHz doivent être répertoriés et évalués avec le filtre de pondération A. Une mesure complémentaire avec le filtre C est nécessaire, en ce qui concerne les pointes de niveau supérieures à 140 dB. Si l'énergie acoustique principale se situe dans la gamme des fréquences supérieures à 1 kHz, le filtre de pondération A indique pratiquement le même niveau que le filtre de pondération C.

#### 5.2.2 Exigences concernant la gamme de fréquences

Vu la grande tolérance des sonomètres de la classe 1 (norme CEI 651) dans la gamme supérieure à 12 kHz, il ne faut utiliser, dans un environnement de sources ultrasonores, que des microphones dont la courbe de fréquences est constamment comprise dans la tolérance – très faible (à 20 kHz, moins de 3 dB de déclivité par rapport à 1 kHz) – de la classe 0 (norme CEI 651). Cela s'applique aux microphones à condensateur Brüel&Kjær (B&K) 4155, Norsonic 1220, aux modèles équivalents d'autres fabricants, aux microphones adaptés aux ultrasons, mentionnés à l'alinéa 5.3.2, mais pas à tous les microphones 1/2" (figure 24 a).

Les appareils électroniques de mesure haute qualité ne présentent aucune perte de valeur jusqu'à 20 kHz.

#### 5.2.3 Contenir les composantes ultrasonores

Il est utile de contenir les signaux supérieurs à 20 kHz, afin qu'ils ne faussent pas le résultat de la mesure dans le domaine audible. A cet effet, nous vous proposons plusieurs méthodes:

- ♦ Les composants au-dessus de 20 kHz sont coupés avec un filtre passe-bas ayant une forte pente.
- ♦ Lorsque, d'après les données concernant l'installation à ultrasons, on peut prévoir qu'aucun sous-harmonique ne se situe entre 14 et 20 kHz, un filtre de pondération U peut être utilisé. Le signal au-dessus de 12 kHz est supprimé de plus en plus (figure 24 b). Dans ce cas, la valeur mesurée est à indiquer en dB(AU).
- ♦ En enregistrant et en retransmettant le tracé sur un appareil DAT avec une fréquence d'échantillonnage de 44 kHz, on obtient une limite extrêmement nette entre 21 et 22 kHz (voir la courbe de fréquence à la figure 24 b).

- ♦ Sur un analyseur de fréquences digital, le niveau acoustique évalué avec un filtre A constitue une somme pondérée, issue d'une analyse de bande par tiers jusqu'à 20 kHz (fréquence centrale). Ceci correspond à une limite située à environ 22 kHz.
- ♦ On choisira un microphone dont la courbe de fréquences s'étend jusqu'à 20 kHz, puis diminue ensuite, si possible, de façon

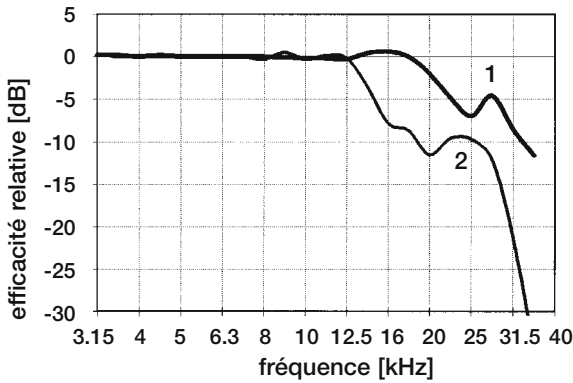


Figure 24 a  
Courbes de fréquences  
1 Microphone 1/2" de haute qualité  
2 Microphone 1/2" (classe 1, norme CEI 651)

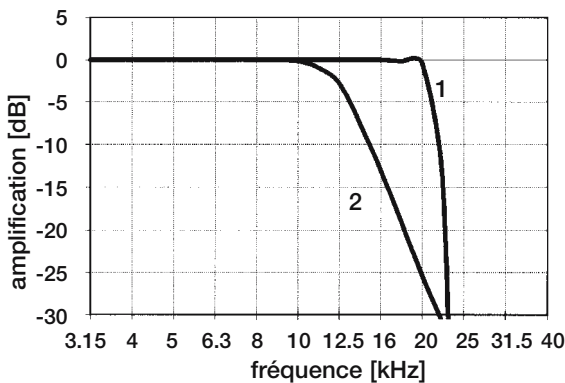


Figure 24 b  
Courbes de fréquences  
1 Enregistreur DAT avec fréquence d'échantillonnage de 44 kHz  
2 Filtre passe-bas U (CEI 1012-1990)

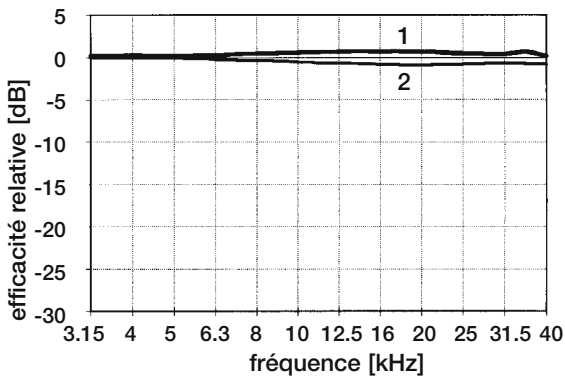


Figure 24 c  
Courbes de fréquences  
1 Microphone 1/2" à large bande  
2 Microphone 1/4" (de type champ libre)

abrupte (par exemple, B&K 4155, Norsonic 1220 ou équivalent). Cette méthode est toutefois peu fiable, car ces microphones présentent fréquemment une résonance aux environs de 26 kHz et peuvent donc agir sur les signaux ultrasonores dans cette bande (voir figure 24 a). La courbe de fréquences jointe par le fabricant du microphone indique, certes, une chute brutale à partir de 20 kHz; en fait, seule la mesure s'arrête à cette fréquence.

### 5.3 Mesure et pondération dans le domaine ultrasonore

#### 5.3.1 Objectif

Le but de cette mesure est double. Il s'agit, d'une part, de répertorier toutes les sources de signaux rayonnés dans la gamme des ultrasons et, d'autre part, d'éviter que le résultat ne soit faussé par des composantes acoustiques en dessous de 20 kHz.

#### 5.3.2 Exigences concernant la gamme de fréquences

La gamme de fréquences de la chaîne de mesure doit s'étendre au-delà de la fréquence de travail de la source ultrasonore. On peut déduire des données du fabricant la courbe de fréquence de la partie électrique de l'appareil de mesure ou la contrôler avec le signal électrique d'entrée d'un générateur de signaux.

Il faut choisir un microphone qui, d'après les informations du fabricant, remplit les exigences mentionnées ci-dessus. C'est le cas de certains (anciens) microphones 1/2" (par exemple, B&K 4133) et des microphones à condensateur d'un diamètre de 1/4" (B&K 4135 ou Microtech Gefell MK 301) ou 1/8" (B&K 4138). La figure 24 c représente la courbe de fréquences d'un microphone 1/2" à large bande et celle d'un microphone 1/4". Tous ces microphones ne sont pas pré-polarisés et nécessitent donc que le sonomètre, l'analyseur ou le préamplificateur prépare la tension de polarisation de 200 Volt.

L'enregistrement de fréquences au-dessus de 50 kHz n'est réalisable qu'avec des appareils spéciaux – ceci est cependant rarement nécessaire pour des sources ultrasonores industrielles.

### 5.3.3 Contenir des composantes ultrasonores dans le domaine audible

Il existe plusieurs méthodes pour s'assurer que les composantes acoustiques dans la gamme des fréquences audibles ne faussent pas le résultat:

- ♦ Dans la mesure où on ne rencontre aucune composante acoustique essentielle dans la bande entre 12 et 20 kHz, on peut utiliser le filtre Ultra (par exemple, dans le filtre encastré B&K 1627). Des signaux inférieurs à 20 kHz sont alors supprimés de plus en plus.
- ♦ Sinon, un filtre passe-haut doit être utilisé à 20 kHz.
- ♦ Le niveau ultrasonore est calculé à partir d'une analyse spectrale (paragraphe 5.5).

## 5.4 Pondération temporelle

### 5.4.1 Déterminer le niveau de pression acoustique équivalent

On utilise des sonomètres intégrateurs afin de déterminer le niveau de pression acoustique continu ou équivalent. La plupart des analyseurs acoustiques professionnels offrent cette possibilité. Le niveau acoustique continu peut également être calculé à partir du niveau de pression acoustique équivalent momentané et du temps d'exposition. Ce procédé est décrit en détail dans la publication de la Suva 44057.f «Dangers du bruit pour l'ouïe à l'emplacement de travail».

### 5.4.2 Déterminer le niveau maximum

Afin d'enregistrer le niveau maximum du signal ultrasonore, le sonomètre ou l'analyseur doit disposer de la constante de temps «Fast» (125 ms) et assimiler des pointes de niveau jusqu'à environ 140 dB.

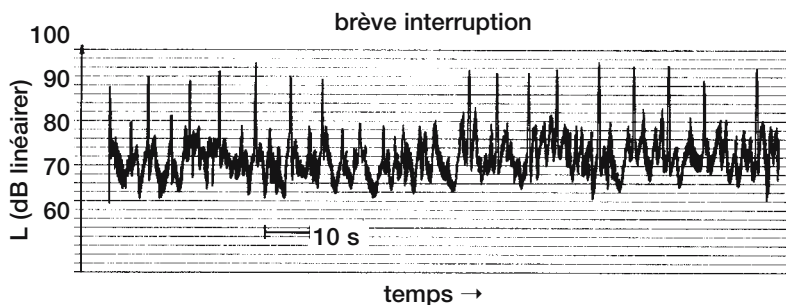


Figure 25  
Niveau de pression acoustique d'une soudeuse à ultrasons en fonction du temps

C'est le cas de presque tous les sonomètres professionnels.

### 5.4.3 Diagramme du niveau de pression acoustique

Un diagramme du niveau de pression acoustique en fonction du temps (figure 25) donne rarement des informations utiles à l'interprétation du bruit. Une telle représentation indique toutefois, pour les soudeuses à ultrasons, la chronologie du signal. En revanche, le niveau de pression acoustique plus ou moins constant des installations de nettoyage par ultrasons a une valeur significative limitée. Par conséquent, on peut généralement se passer de ce type de représentation.

## 5.5 Analyses spectrales

On peut utiliser des filtres commutables, ainsi que des analyseurs parallèles [analyseurs en bandes d'octave/par tiers ou à bande étroite/analyse de Fourier (FFT)], dans la gamme des fréquences inférieures à 20 kHz.

Pour les analyses spectrales dans le domaine des ultrasons, il existe des cartouches filtrantes, qui englobent également les bandes de fréquences jusqu'à 40 kHz, ainsi que certains analyseurs FFT avec une gamme de fréquences étendue.

Les analyseurs acoustiques modernes se limitent cependant en majorité à la gamme de fréquences inférieures à 22 kHz. Par conséquent, il faut, avant l'analyse, transformer de moitié ou de  $1/10$  la fréquence initiale du signal ultrasonore, ce qui est réalisable avec des enregistreurs spéciaux (voir paragraphe 5.6).

On utilise des analyseurs FFT avec la fonction zoom, afin de déterminer la fréquence des principaux composants. On peut également connecter un compteur électronique à un filtre analogique par tiers d'octave et mesurer ainsi très précisément la fréquence de ce signal préfiltré.

## 5.6 Enregistrement des signaux ultrasonores

Vu la fréquence d'échantillonnage de 44 ou 48 kHz, la gamme de fréquences des appareils DAT ne s'étend, pour des raisons inhérentes au système, que jusqu'à 21 ou 22 kHz. Depuis 1995, des appareils DAT «high sampling» avec une fréquence d'échantillonnage de 96 kHz sont disponibles, dont un modèle portable. Ces appareils peuvent enregistrer des signaux jusqu'à 40 kHz, avec une qualité haute fidélité. Il est en partie possible de lire des enregistrements «high sampling» à une vitesse et une fréquence réduites de moitié, afin qu'ils soient exploitables avec les analyseurs acoustiques actuels. Dans ce cas, il faut tenir compte de la transformation de l'échelle des fréquences et, en plus, affecter un facteur 2 aux constantes de temps («Fast» par exemple) pour les ajuster de façon plus lente.

La figure 26 montre l'enregistrement d'une telle mesure dans un bain à ultrasons. On reconnaît nettement la fréquence de travail à environ 26 kHz et le sous-harmonique à environ 13 kHz.

Les magnétophones analogiques portables (Stellavox, Kudelski Nagra) sont certes en mesure d'enregistrer des fréquences jusqu'à 28 kHz, avec une vitesse de défilement de bande de 38 cm/s (15"). Il faut toutefois compenser la perte de la courbe de fréquences lors de l'exploitation de l'enregistrement.

Les enregistreurs magnétiques analogiques de mesure peuvent enregistrer en partie des fréquences jusqu'à 40 kHz, mais avec une plage dynamique limitée de 40 dB, par exemple, ce qui rend la modulation relativement critique.

## 5.7 Sons dans les liquides

Afin de mesurer directement le son dans les liquides, il faut des microphones de mesure spéciaux, appelés **hydrophones**. Par rapport aux microphones habituels, les hydrophones disposent d'une gamme de mesure nettement plus importante, comme le montre la courbe de fréquences figure 27. Les hydrophones sont généralement testés dans l'air, avec des sources d'étalonnage ou de calibrage.

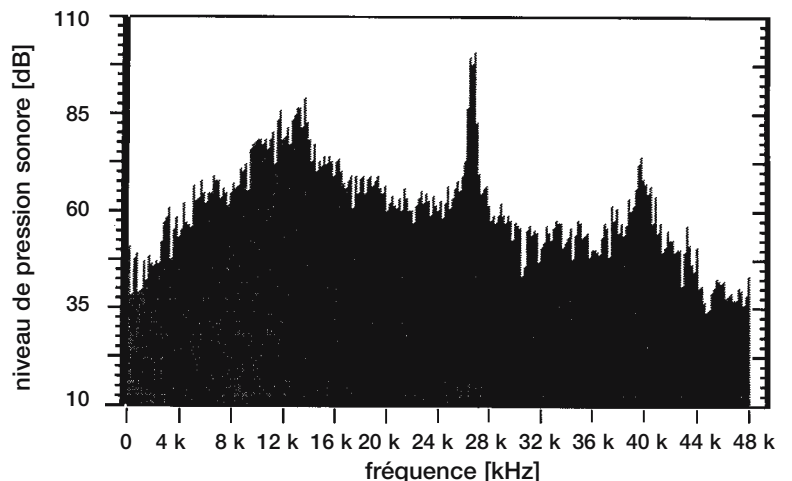
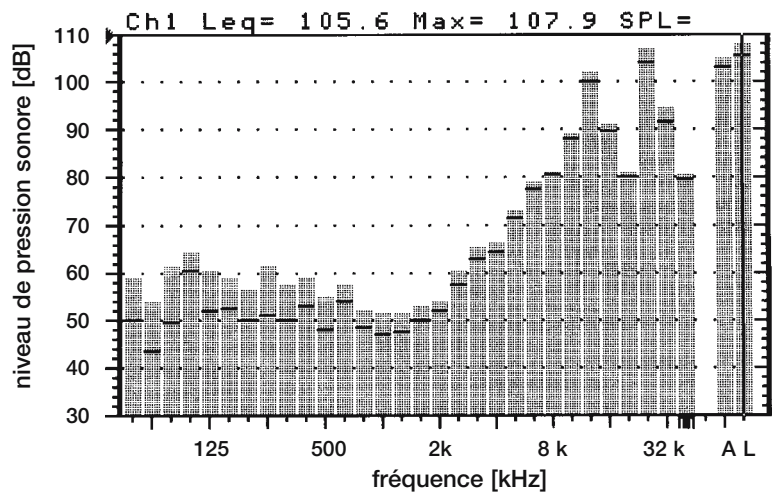


Figure 26 a et 26 b  
Mesure par voie aérienne dans un bain à ultrasons (à 1 m de distance).  
a. Analyse en bandes par tiers  
b. Analyse en bande étroite

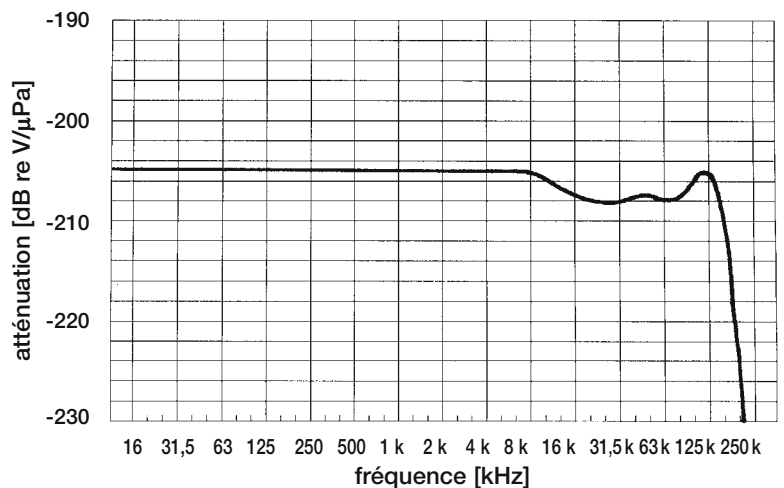


Figure 27  
Courbe de fréquences d'un hydrophone (source: Brüel&Kjær)

Il est intéressant de noter que, par définition, le niveau de pression acoustique en milieu aquatique est supérieur de 36 dB à celui en milieu atmosphérique. Nous ne nous attarderons cependant pas sur cette différence.

## 5.8 Procédure de mesure

### 5.8.1 Point de mesure

Le point de mesure faisant foi est l'emplacement de travail, en particulier l'endroit où se trouve la tête, voire les oreilles.

Comme les ultrasons ne se propagent pratiquement qu'en ligne droite (c'est-à-dire sans diffraction), il faut adapter la position du microphone à la direction d'incidence du son. Dans le cadre d'un poste de travail, il faut encore déterminer l'endroit où le niveau est le plus élevé.

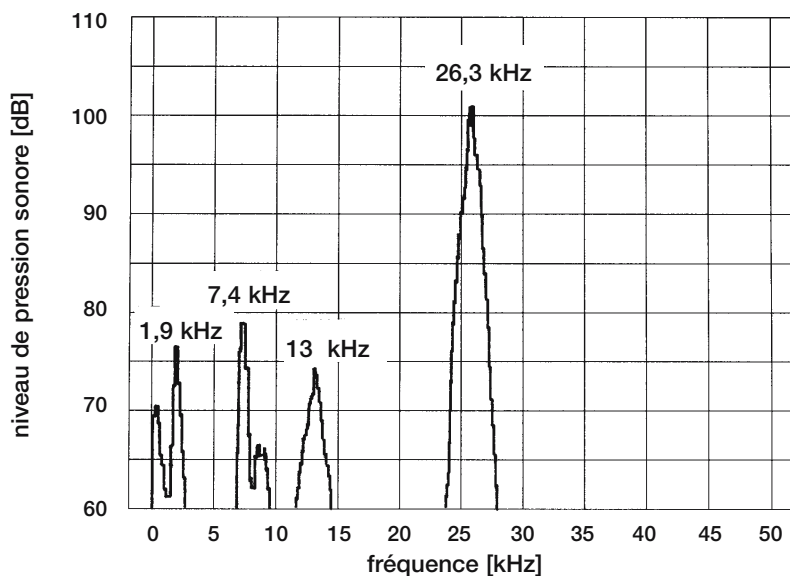


Figure 28  
Bain de nettoyage par ultrasons (analyse en bande étroite, largeur de bande du filtre 125 Hz)  
L'analyse a déterminé une fréquence de travail à 26 300 Hz. Le premier sous-harmonique (à 13 000 Hz) est nettement visible, tandis qu'une oscillation harmonique à 52 kHz n'a pu être décelée lors de la mesure. Le niveau acoustique total s'élève à  $L = 101 \text{ dB}(\text{lin})$  et  $89 \text{ dB}(\text{A})$ .

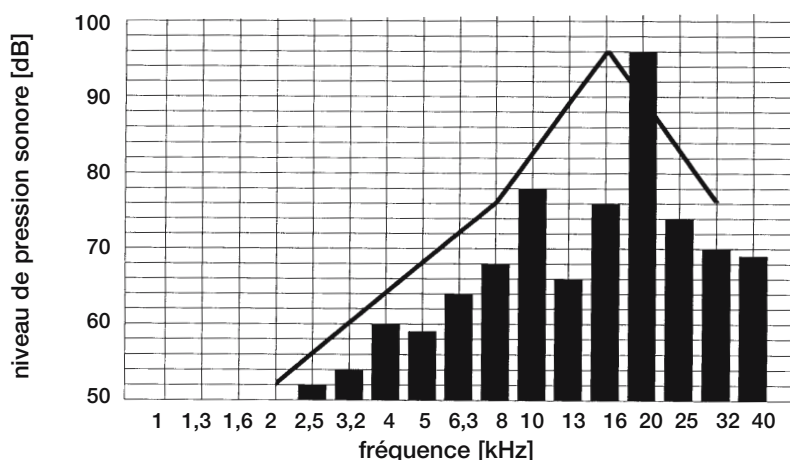


Figure 29  
Bain de nettoyage par ultrasons, comparaison analyse en bandes d'octave et par tiers d'octave  
Analyse en bandes d'octave: ligne  
Analyse en bandes par tiers: barres

### 5.8.2 Analyses spectrales

Pour déterminer le niveau sonore le plus élevé, on utilise une analyse en bande étroite avec des filtres à largeur de bande constante (analyse de Fourier). La fréquence de travail, ainsi que les oscillations harmoniques et sous-harmoniques (fraction entière ou multiple entier de la fréquence de travail) ne peuvent pas être décelées précisément avec des analyses en bandes d'octave ou par tiers d'octave.

La figure 28 représente une analyse en bande étroite dans un bain à ultrasons d'un volume d'environ 40 l. Point de mesure: à l'emplacement de travail (à proximité des oreilles).

L'analyse en bandes d'octave et l'analyse en bandes par tiers d'octave sont comparées figure 29. On remarque immédiatement que l'analyse en bandes par tiers est nettement plus explicite. La fréquence de travail du bain se situe à 20 kHz, alors que, dans l'analyse en bandes d'octave, elle se situe dans la bande de 16 kHz, du fait de la grande largeur de bande du filtre. De plus, le premier sous-harmonique n'est décelable qu'avec l'analyse en bandes par tiers (10 kHz).

### 5.8.3 Données à enregistrer

Selon l'installation et le problème, on se contentera d'enregistrer le niveau acoustique total, pondéré et linéaire, ou, si la réalisation de mesures de protection acoustique doit être vérifiée, d'exécuter des analyses spectrales.

### 5.8.4 Protocole de mesure

En principe, un protocole de mesure doit contenir les informations suivantes:

- ♦ Description de l'installation ou de la machine, fréquence de travail, année de fabrication, numéro de série, état de service, matériaux travaillés
- ♦ Point de mesure (distance, hauteur)
- ♦ Instruments de mesure et source de calibration utilisés
- ♦ Résultats de mesure
- ♦ Appréciation du résultat par rapport aux risques pour l'ouïe
- ♦ Dans tous les cas, propositions de réduction du bruit



# 6 Mesures de protection contre le bruit causé par les installations à ultrasons

## 6.1 Aperçu

Comme pour les autres procédés bruyants, on peut faire la distinction entre les groupes de mesures suivants:

- ♦ mesures de protection d'ordre technique
- ♦ mesures de protection au niveau des locaux
- ♦ mesures de protection individuelle
- ♦ mesures de protection relevant de l'organisation.

Du point de vue de la protection des salariés, il est justifié de mettre l'accent sur les mesures de protection d'ordre technique ou concernant les machines.

## 6.2 Mesures de protection d'ordre technique

Elles peuvent être classées en deux groupes principaux:

- ♦ les mesures primaires sur l'installation, relatives au procédé de fabrication, c'est-à-dire lutter contre le bruit à la source
- ♦ les mesures secondaires, pour prévenir la propagation du bruit produit par le processus de fabrication (par exemple, pose d'une enceinte acoustique)

### 6.2.1 Mesures primaires

#### 6.2.1.1 Aperçu

Il faut s'assurer que les mesures de protection techniques sont réalisables sur des installations à ultrasons. On vérifie en premier lieu qu'il est possible d'intervenir sur de telles installations, afin d'influer sur

- ♦ l'origine du bruit,
- ♦ la transmission acoustique ou
- ♦ le rayonnement sonore.

La répartition des mesures dans ces trois domaines facilite non seulement le travail du fabricant, mais fournit également plusieurs approches pour la réduction du bruit causé par des installations à ultrasons. Ces trois

Domaine	Soudeuses à ultrasons	Bains à ultrasons
Origine du bruit	Transducteur (convertisseur)	Oscillateur, objet à nettoyer
Transmission acoustique	Section de transformation, sonotrode, pièce à souder	Détergent, cuve, bâti de la cuve
Rayonnement sonore	Section de transformation, sonotrode, pièce à souder	Détergent, bâti de la cuve (revêtement)

Tableau 4  
Critères pour lutter contre le bruit causé par les installations à ultrasons

critères sont exposés au tableau 4, pour ce qui est des soudeuses et des bains à ultrasons.

#### 6.2.1.2 Origine du bruit

Les mesures influant sur l'origine du bruit dans les installations à ultrasons sont peu nombreuses. Bien que techniquement compliquée, l'augmentation de la fréquence de travail, par exemple de 20 kHz à 30–70 kHz, est la solution la plus efficace. On peut souvent remplacer les outils lourds travaillant à 20 kHz par des sonotrodes multiples à fréquence plus élevée, plus simples et moins coûteuses. Lorsque l'on opte pour cette solution, qui offre fréquemment plus de sécurité de fonctionnement, on peut renoncer, dans certains cas, à une cabine de protection. L'augmentation de la fréquence de travail provoque un déplacement de l'excitation dans le domaine inaudible; seuls les sous-harmoniques en dessous de 20 kHz étant éventuellement audibles.

On peut également réduire la puissance et augmenter le temps de traitement. Cette possibilité est néanmoins limitée, pour des raisons de rationalisation de la production.

#### 6.2.1.3 Transmission acoustique

D'un point de vue acoustique, on ne peut agir sur la transmission du bruit, tant pour le soudage que pour le nettoyage, car un bon facteur de transmission assure un niveau d'efficacité avantageux pour toute l'installation.

### 6.2.1.4 Rayonnement sonore

On ne peut influer sur le rayonnement sonore proprement dit que pour les bains à ultrasons. Le bâti de la cuve doit être techniquement indépendant de la cuve elle-même, afin d'éviter un rayonnement par voie solidienne. Il se limite ainsi à la surface du détergent. Il est également possible de diminuer le rayonnement à l'aide d'un couvercle. Dans la pratique, on équipera la cuve d'un dispositif de verrouillage électrique, afin d'empêcher le fonctionnement du bain avec le couvercle ouvert.

### 6.2.2 Mesures secondaires

#### 6.2.2.1 Capotages

Vu leur compacité, les machines de production à ultrasons se prêtent bien à un capotage (enceinte). Il n'y a pas de gros problème acoustique, du fait que le bruit n'a pratiquement que des composantes haute fréquence. La réduction du niveau sonore obtenue est très importante, comme le montrent les figures 30 et 31. De manière générale, lors du choix ou de la construction d'une enceinte acoustique, il faut veiller à quelques points importants, sur lesquels nous revien-

Figure 30  
Niveau sonore d'une grande installation de nettoyage par ultrasons, avec ou sans enceinte acoustique

$\Delta L$  = respectivement  
18 dB(lin) et 13 dB(A)

■ sans enceinte  
■ avec enceinte

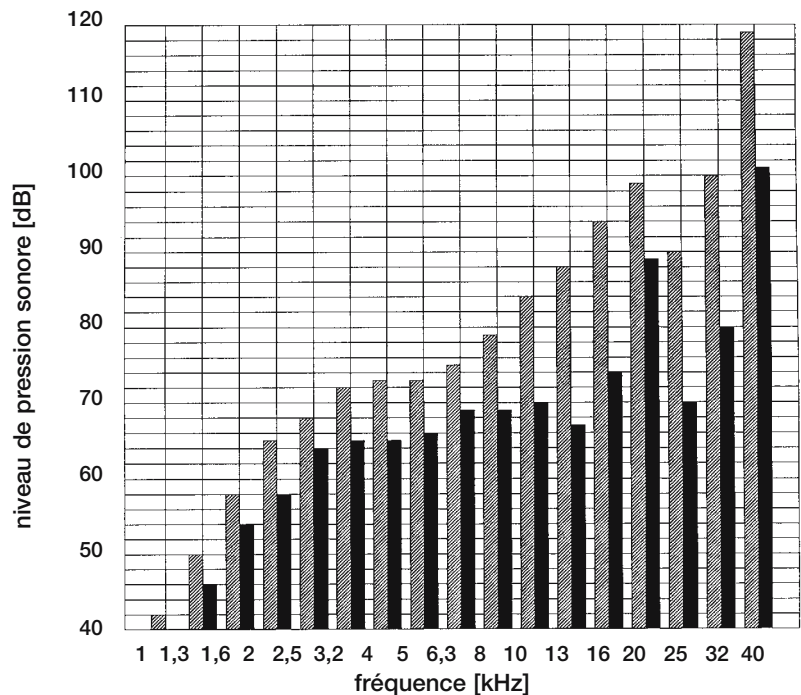
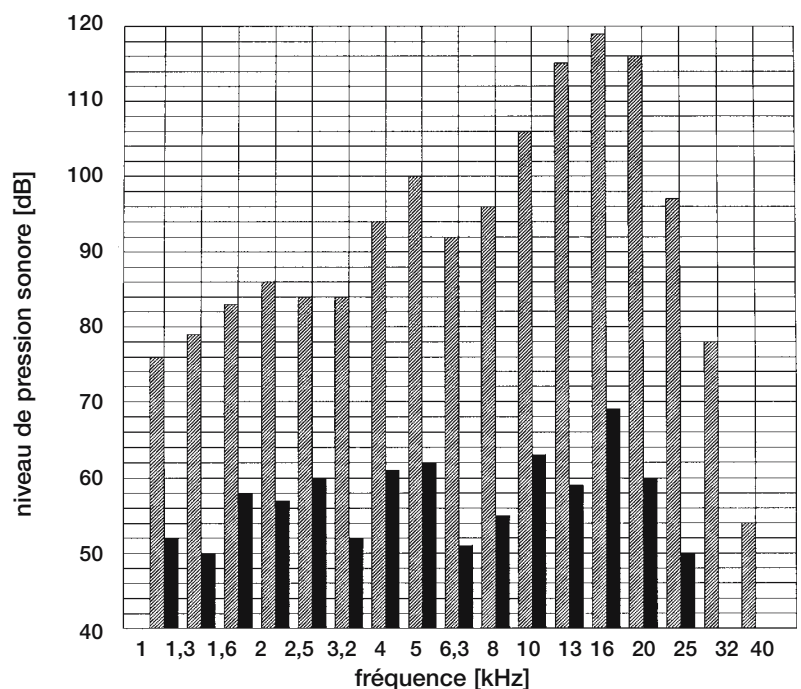


Figure 31  
Niveau sonore d'une soudeuse à ultrasons, avec ou sans enceinte acoustique

$\Delta L$  = respectivement  
48 dB(lin) et 43 dB(A)

■ sans enceinte  
■ avec enceinte





drons brièvement. Ces problèmes sont exposés en détail dans la publication de la Suva n° 66026 «Des enceintes pour lutter contre le bruit».

On ne peut ignorer le fait que le coût d'une telle réalisation est relativement élevé par rapport au prix d'une machine. On a donc tenté, à plusieurs reprises, de ne capoter que la sonotrode rayonnant le bruit. Il est évident que la réduction du niveau sonore obtenue est nettement moindre. De plus, cette solution n'est réellement efficace que si la pièce à souder elle-même ne rayonne pas la principale composante du bruit.

#### Construction acoustiquement étanche

C'est à son point faible que se juge la qualité d'une enceinte (figures 32, 33). Les pièces mobiles doivent être munies de joints (caoutchouc). Les fermetures doivent être parfaites.

#### Parois

Les parois doivent comporter une isolation aux sons aériens ( $R'w$ ) d'au moins 30 dB pour les hautes fréquences, ce qui est facile à réaliser (p. ex. une plaque de fixation de 24 mm, une tôle d'aluminium de 1,5 mm, une tôle d'acier de 1 mm).

#### Absorption interne

Un revêtement acoustique absorbant doit avoir une épaisseur d'au moins 20 mm ( $\lambda = 17$  mm à 20 kHz, selon le paragraphe 2.1, tableau 3) et posséder une absorption maximale, surtout dans le domaine des hautes fréquences. Les matériaux utilisés doivent être ignifugés.

#### Evacuation de la chaleur

Pour évaluer approximativement la chaleur à évacuer, on peut partir du principe que toute la puissance électrique de l'installation à ultrasons est transformée en chaleur. N'oubliez pas l'éclairage de l'enceinte.

#### Ergonomie

Il faut tenir compte de l'ergonomie (hauteur du plan de travail, position assise). De plus, la surveillance de l'emplacement de travail nécessite un éclairage puissant (p. ex. lampes halogènes, tubes néon).

#### Sécurité

Plusieurs points doivent être considérés. Par exemple, il faut veiller à ce que le processus à ultrasons ne puisse être enclenché qu'une fois toutes les ouvertures de manipulation complètement fermées. Pour les soudeuses, il faut respecter les prescriptions concernant les presses de table (règles relatives à la construction et à la position des dispositifs de commande, form. Suva 1594). Avec une bonne enceinte, on peut facilement abaisser le niveau sonore de 20 dB(A). Il faut toutefois investir plusieurs milliers de francs. En outre, les performances de la machine peuvent diminuer notablement (pour les soudeuses à ultrasons, il faut compter avec une perte pouvant atteindre 20 %).

Dans l'intérêt de l'humanisation des postes de travail, ces inconvénients devraient être acceptés. Plusieurs sociétés proposent actuellement des enceintes ou cabines finies; il n'est donc que rarement rentable de les construire soi-même (figures 32 à 34).

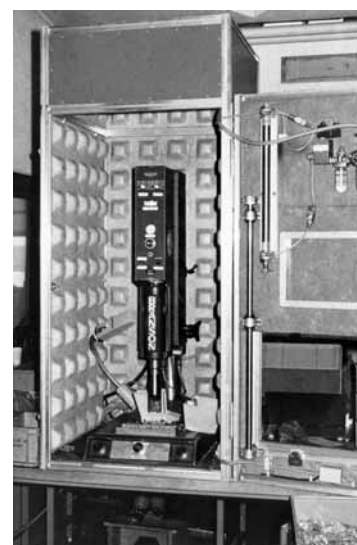


Figure 32 a et 32 b

Soudeuse à ultrasons équipée d'une enceinte acoustique

a. Fermée, prête à fonctionner  
(le verrou est manoeuvré de façon pneumatique)

b. Ouverte (on remarque le revêtement absorbant et la commande du verrou, à droite sur la figure)



Figure 33 a et 33 b  
Soudeuse à ultrasons avec enceinte acoustique intégrée

- Abaissée (la partie inférieure est en plexiglas), prête à fonctionner
- Relevée

#### Capotages partiels

En général, un capotage partiel sur une soudeuse à ultrasons ne permet qu'une faible réduction du niveau sonore. Par exemple, en enveloppant la sonotrode – comme sur la figure 34, le niveau de pression acoustique passe de 93 à 89 dB(A), à 1 m de distance. Ceci indique donc clairement que si la sonotrode produit du bruit, elle n'est toutefois pas

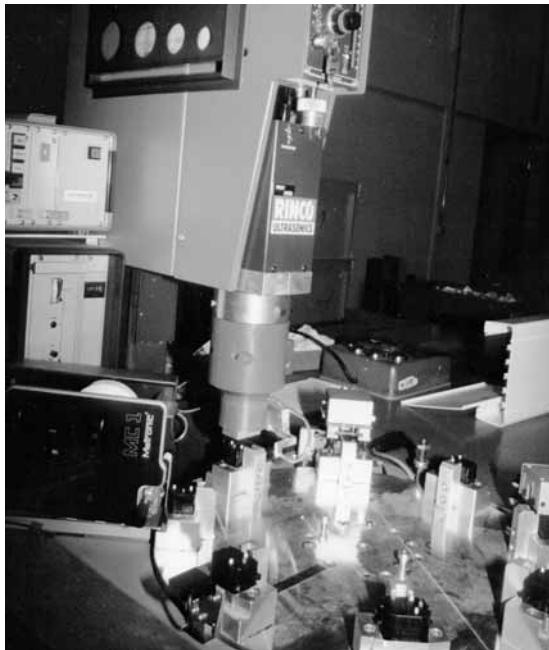


Figure 34  
Enveloppe de sonotrode dans une soudeuse à ultrasons

seule à le rayonner. La structure de la machine et la pièce à souder contribuent également de façon considérable au niveau sonore total. Dans ce cas précis, une protection supplémentaire réduit encore le bruit de 3 dB(A), à proximité de la machine.

#### Capotages combinés

Pour des soudeuses à ultrasons complexes, on peut combiner le coffrage de sécurité requis et une enceinte techniquement efficace. Certes, le résultat n'est souvent pas aussi important qu'avec une simple enceinte acoustique, mais cela suffit généralement à protéger le poste de travail (figure 35). La figure 36 montre une autre solution possible: une table rotative (carrousel).

#### 6.2.2.2 Recouvrement des baigns à ultrasons

Il est souvent utile de munir les baigns à ultrasons de couvercles rabattus pendant le fonctionnement de l'installation. Le niveau sonore peut être réduit de 20 dB(A), si l'on respecte les points suivants:

- ♦ Le bâti de la cuve ne doit pas être en contact direct avec la cuve proprement dite, pour éviter qu'une partie importante du bruit ne soit rayonnée par la carrosserie de la machine (suspensions en néoprène).
- ♦ L'espace entre la carrosserie et la cuve doit être rembourré avec des matériaux absorbants (laine de verre ou laine minérale).
- ♦ Le couvercle du bain doit être aussi simple que possible à manipuler (par exemple, rabattable en arrière) et être éventuellement équipé d'un contacteur relié au générateur d'ultrasons, afin que le processus de nettoyage ne puisse être enclenché que si le couvercle est fermé. Le mécanisme de fermeture peut être automatisé sur les grandes cuves.
- ♦ Le couvercle, qui peut être en tôle d'aluminium ou d'acier, doit parfaitement adhérer à la carrosserie (prévoir des joints en caoutchouc). On peut également mettre une couche d'absorbant côté bain, mais ce n'est pas indispensable (feuilles antisoniques, par exemple).



Figure 35  
Coffrage de sécurité sur une soudeuse à ultrasons complexe



Figure 36  
Coffrage sur une soudeuse équipée d'une table rotative

### 6.3 Mesures de protection au niveau des locaux

De toutes les mesures de protection, celles qui ont trait à la correction acoustique des locaux figurent au premier plan. Par là, on entend la mise en oeuvre de tous les moyens permettant de réduire la réflexion d'un local à un autre et la propagation directe du bruit. Une réduction du temps de réflexion entraîne celle du niveau sonore. Ces problèmes sont exposés en détail dans la publication de la Suva n° 66008 «Acoustique des locaux industriels». Vous pouvez vérifier concrètement la faisabilité des mesures suivantes (figure 37):

- ♦ Construction d'un plafond acoustique (plafond absorbant) à proximité des installations à ultrasons, afin de diminuer la réflexion sonore au niveau du plafond
- ♦ Mise en place de cloisons amovibles et absorbantes à proximité des installations à ultrasons (protection des postes de travail avoisinants)

Nous conseillons également de placer les installations à ultrasons dans des locaux séparés.

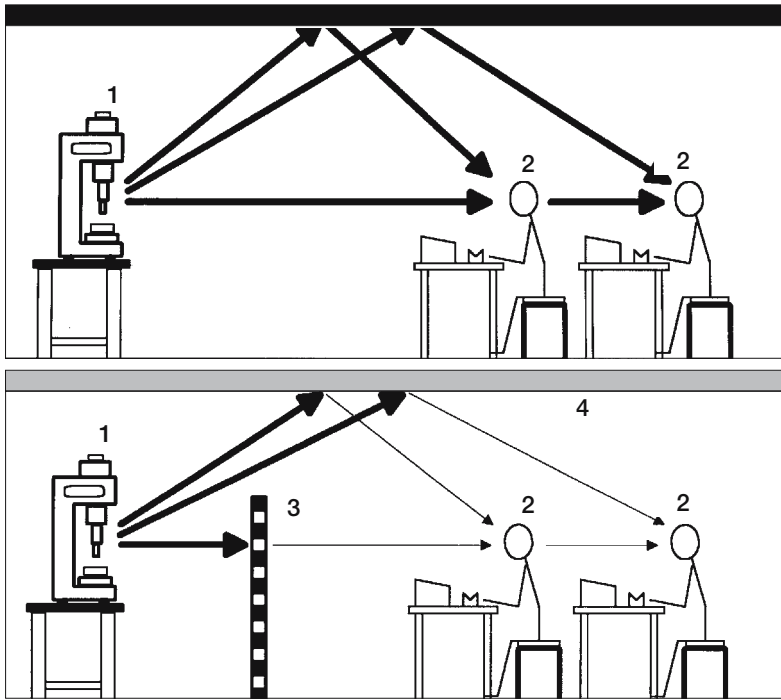


Figure 37 a et 37 b  
 Mesures de protection au niveau des locaux pour réduire la transmission acoustique aux postes de travail avoisinants

a Sans protection. Le bruit se propage librement de l'installation à ultrasons (1) jusqu'aux postes de montage (2).

b Avec protection. La propagation du bruit [de l'installation à ultrasons] est nettement diminuée grâce à la cloison amovible (3) et au plafond acoustique (4).

## 6.4 Mesures de protection individuelle

Des mesures de protection individuelle sont nécessaires si la valeur limite indiquée au paragraphe 4.3.2 est dépassée. Peu importe le moyen utilisé (ouates de protection, tampons auriculaires ou coquilles de protection), du moment qu'il est porté. Pour des raisons pratiques, le choix dépend du temps d'exposition (exemple: lors de travaux ininterrompus pendant plusieurs heures, il est judicieux de se protéger avec de la ouate ou des tampons auriculaires. Pour les travaux de courte durée effectués à intervalles espacés, il faut porter des coquilles de protection).

## 6.5 Mesures de protection relevant de l'organisation

La réduction du temps d'exposition au bruit du personnel concerné (rotation) est une mesure de protection relevant de l'organisation.

## 6.6 Organisation des postes de travail

### 6.6.1 Postes de travail des installations à ultrasons

Outre les mesures primaires et secondaires concernant la machine elle-même, en fonction du niveau sonore, seules les protections individuelles s'avèrent efficaces, les mesures au niveau des locaux ne réduisant pas le niveau sonore à l'emplacement de travail. Du point de vue de la lutte contre le bruit, on ne peut prodiguer aucun autre conseil. Exception: lorsque plusieurs machines à ultrasons se trouvent l'une à côté de l'autre, il est recommandé d'installer des cloisons absorbantes, afin de réduire au maximum les effets cumulatifs.

### 6.6.2 Postes de travail à proximité d'installations à ultrasons

Souvent, des emplacements de travail calmes (montage p. ex.) sont gênés par le bruit d'installations à ultrasons. Les causes en sont le manque de mesures de protection sur l'installation elle-même et la libre propagation du son, aussi bien directement qu'indirectement (réflexion au niveau des parois et du plafond). Dans de tels cas de figure, il est possible d'obtenir des résultats significatifs par des mesures de protection au niveau des locaux. Une cloison amovible absorbante peut parfois apporter des améliorations sensibles. En effet, les ondes courtes que sont les ultrasons présentent l'avantage de n'être pratiquement pas diffractées.

En résumé, si les installations à ultrasons ne peuvent pas être installées dans des locaux séparés, il faut les isoler par des cloisons amovibles.

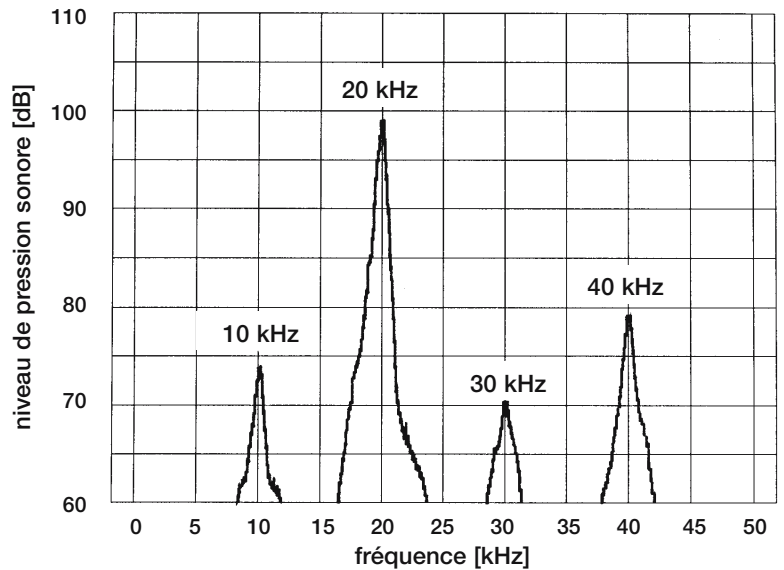
# 7 Bruit causé par les installations à ultrasons: exemples

## 7.1 Bains à ultrasons

Le niveau de pression acoustique d'un bain à ultrasons de 120 l a été mesuré à une distance de 1,5 m (sur le côté). La fréquence de travail est de 20 kHz. La figure 38 représente l'analyse en bande étroite.

Figure 38 ►  
Analyse en bande étroite des immissions sonores d'un bain à ultrasons. Largeur de bande du filtre 125 Hz.  
 $L_m$  = respectivement 81 dB(A) et 83 dB(lin),  
valeur maximale 98 dB(lin)

Interprétation:  
Outre la fréquence de travail de 20 kHz, on remarque très nettement deux oscillations harmoniques (à 30 et 40 kHz) et un sous-harmonique (10 kHz).



## 7.2 Soudeuses à ultrasons

La figure 39 montre un exemple intéressant d'une soudeuse à ultrasons. La fréquence de travail se situe à 36 kHz. Le processus de soudage produit un sous-harmonique d'intensité plus grande que celle de la fréquence de travail. Ce phénomène est normal, si l'on tient compte du fait que le son aérien est un «sous-produit» d'un processus d'usinage. Selon les capacités auditives, on peut entendre partiellement le sous-harmonique (15–18 kHz). Cependant, il ne faut pas généraliser cette constatation, car le niveau dépend fortement de la géométrie des pièces à souder et de la sonotrode.

L'analyse d'une autre application donne une image analogue: figure 40. Ici, une douille en laiton est encastrée dans une matière synthétique. Le sifflement audible (15–18 kHz) est un sous-harmonique de la fréquence de travail, qui est de 37,1 kHz.

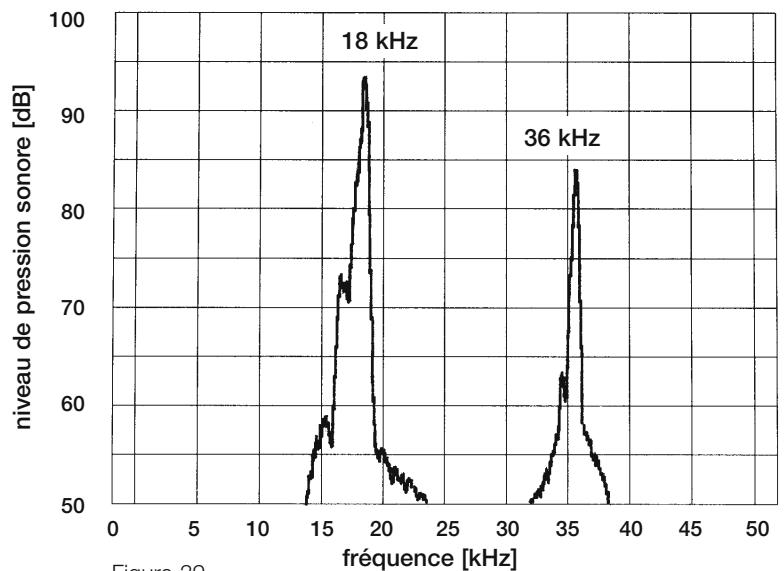


Figure 39  
Soudeuse à ultrasons, analyse en bande étroite, fréquence de travail: 36 kHz

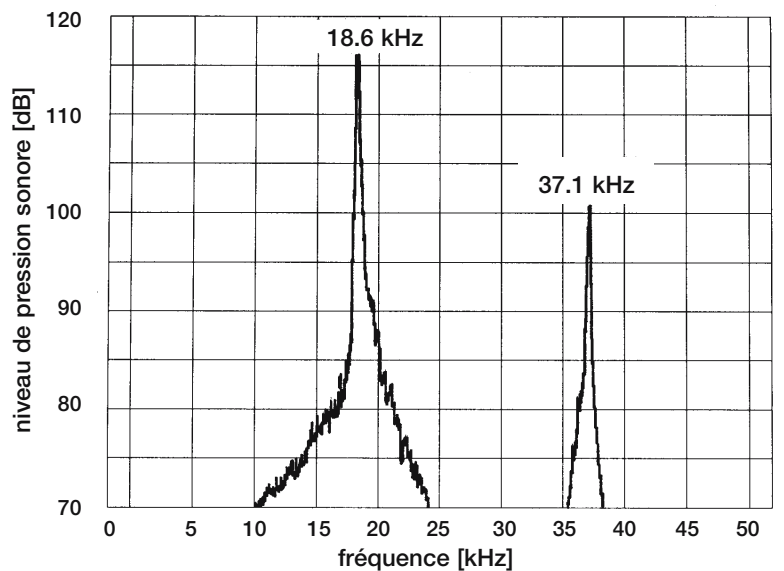


Figure 40 ►  
Soudeuse à ultrasons, encastrement, analyse en bande étroite, fréquence de travail: 37,1 kHz



## 7.3 Machines et installations spéciales

### 7.3.1 Machine à roder et à polir

La figure 41 représente une mesure effectuée sur une machine à roder et à polir actionnée à la main (lime grossière moyenne pour le secteur le plus élevé). Selon l'outil, le niveau de pression acoustique à l'oreille de l'utilisateur se situe entre 80 et 95 dB(A), respectivement 91 et 107 dB(lin).

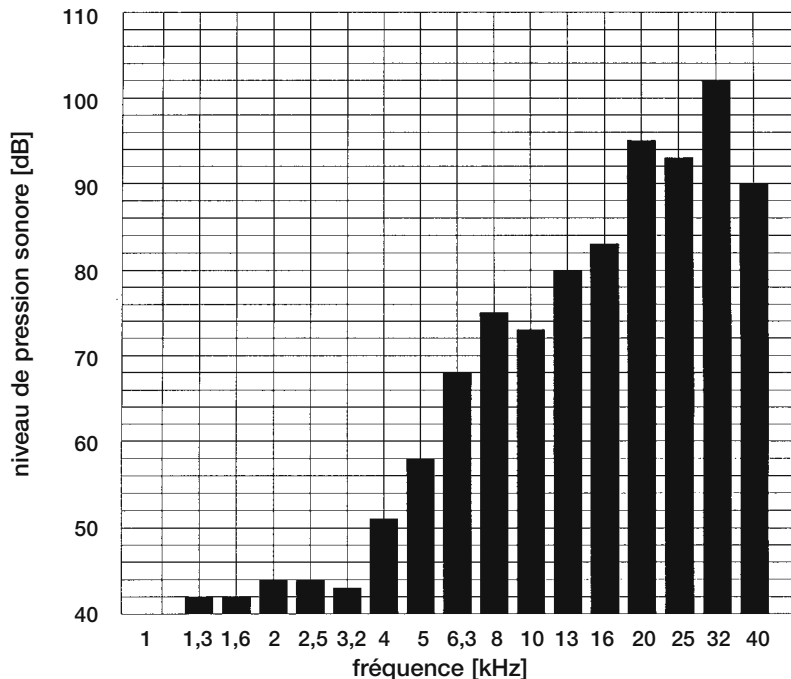


Figure 41  
Analyse en bandes par tiers d'une machine à roder et à polir

### 7.3.2 Machine à découper les bandes

On a mesuré le son d'une machine à découper les bandes, utilisée pour des étiquettes et qui fonctionne avec un système de coupe par ultrasons à 20 kHz. Les mesures ( $L_m$ ) se situent à 108–111 dB(A), respectivement 117–120 dB(lin). La valeur limite autorisée est largement dépassée. Il faut porter des équipements individuels de protection de l'ouïe. Cette analyse en bande étroite est représentée figure 42.

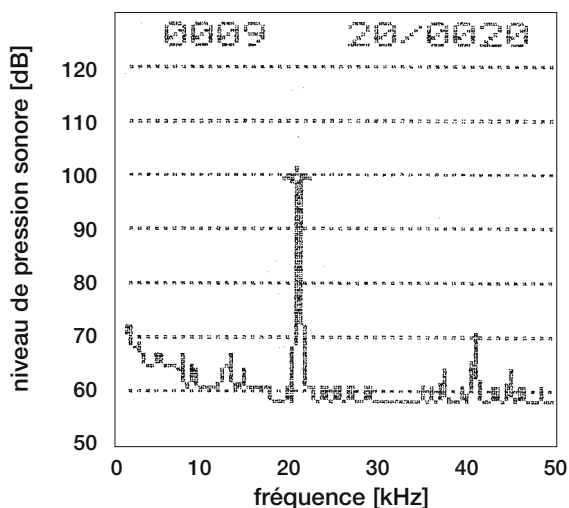
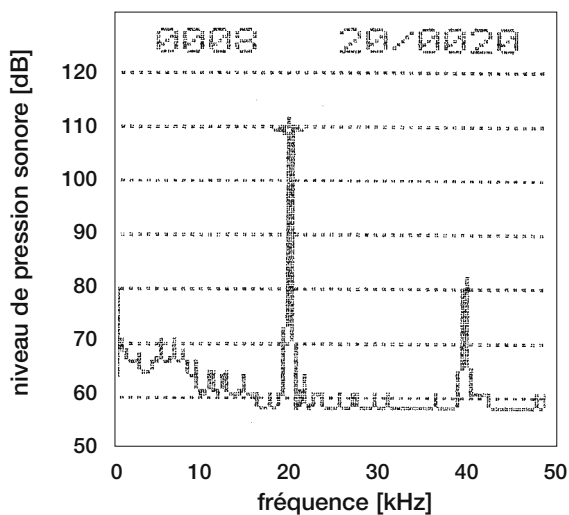


Figure 42  
Analyse en bande étroite sur une machine à découper les bandes

- avec couvercle de protection acoustique ouvert
- avec couvercle de protection acoustique fermé

Interprétation:

La fréquence de travail (20 kHz) est nettement visible, ainsi que la première fréquence harmonique de 40 kHz.

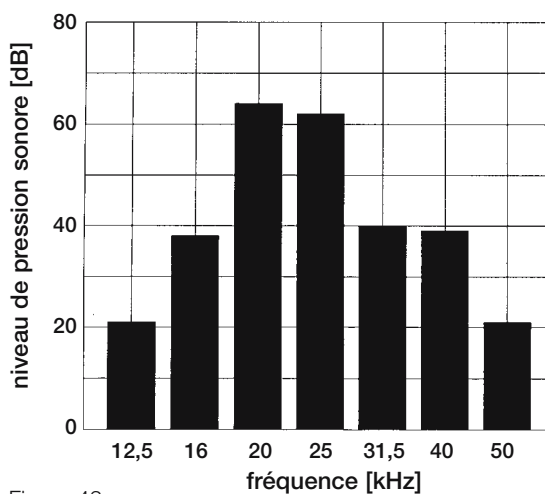


Figure 43  
Analyse en bande par tiers d'un appareil à ultrasons contre les pigeons



### 7.3.3 Appareil à ultrasons contre les pigeons

Dans les grandes gares, on utilise deux appareils à ultrasons placés à une hauteur de 16 m environ pour éloigner les pigeons. Ces appareils couvrent toute la superficie de la gare. Les niveaux de pression acoustique représentés figure 43 ont pu être mesurés dans un angle de 45°, pendant un court laps de temps. Compte tenu du bruit de fond, une valeur moyenne ( $L_m$ ) n'a pu être mesurée.

### 7.3.4 Appareil de surveillance à ultrasons

Le niveau de pression acoustique d'un appareil de surveillance à ultrasons a été mesuré à différentes distances. La fréquence de travail se situe à 25 kHz; aucune fréquence harmonique ou sous-harmonique n'a pu être décelée. A 25 kHz, le niveau de pression acoustique en bande par tiers indiquait 110 dB(lin) à 0,3 m de distance, 98 dB(lin) à 1 m de distance et encore 93 dB(lin) à 2 m.

#### Remerciements

Nous remercions

- ◆ monsieur le Professeur Hans-Jörg Zweifel, Interstaatliche Ingenieurschule Neu-Technikum Buchs et
- ◆ monsieur Karl Frei, Telsonic AG, Bronschhofen/SG

pour la révision de cette nouvelle version et pour leurs suggestions très intéressantes.

## 8 Bibliographie

- [ 1 ] Stevens, S.S. et Warshofsky, F.: Sound and Hearing, Time-Life-Books, Time Inc., New York, 1970.
- [ 2 ] Heckl, M. et Müller, H.A.: Taschenbuch der technischen Akustik, Springer-Verlag, Berlin, 1994.
- [ 3 ] Schmidt, H.: Schalltechnisches Taschenbuch, VDI-Verlag, 1989.
- [ 4 ] Lips, W.: Strömungsakustik in Theorie und Praxis, expert-verlag, Renningen-Malsheim, 1995.
- [ 5 ] Kuttruff, H.: Physik und Technik des Ultraschalls, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1988.
- [ 6 ] Hill, C.R.: Manual on Aspects of Non-Ionizing Radiation, Chapter on Ultrasound, WHO Europa.
- [ 7 ] Edmonds, P.D.: Effects of Ultrasound on Biological Structures, 1979.
- [ 8 ] Veit, I.: Wirkung von Ultraschall auf das Gehör, BAU Dortmund, Forschungsbericht Nr. 231, 1980.
- [ 9 ] Publication de la Suva n° 44057 «Dangers du bruit pour l'ouïe à l'emplacement de travail» (remplace CSST n° 146).
- [10] Publication de la Suva n° 66008 «Acoustique des locaux industriels».
- [11] Publication de la Suva n° 66026 «Des enceintes pour lutter contre le bruit».
- [12] Publication de la Suva n° 66027 «Puissance acoustique et mesurage d'homologation».
- [13] Rieländer, M.M.: Reallexikon der Akustik, Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt, 1982.
- [14] Brendel, K.: Stand und Entwicklungstendenzen der Ultraschallmesstechnik, PTB, Braunschweig, 1987.
- [15] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 4. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.

## Normes et propositions de normes internationales

Beaucoup de normes et propositions de normes, au niveau national et international, traitent des ultrasons. Le résumé suivant vous indique dans quels domaines elles sont les plus fréquentes (tableau 1.1):

Domaine d'application	EN	CEI	ISO	DIN / VDI (pour comparaison)
Essai de matériaux	11	0	16	30
Médecine	6	11	0	10
Hydrophones, sons dans les liquides	4	6	1	3
Soudeuses à ultrasons	0	0	0	2
Nettoyage par ultrasons	0	2	0	6
Systèmes d'alarme	0	1	0	1
Ultrasons en général	0	3	1	2
Total	21	23	18	54

Tableau 1.1  
Nombre de normes internationales pour les différents domaines d'application des ultrasons (état: juillet 1995)

## Recueil des normes et propositions de normes

IEC/DIS 87(Central Office)15\*CEI/DIS 87 (Central Office)15, 1991-02-00  
Méthode normalisée pour le mesurage et le marquage des détecteurs de coeur foetal à ultrasons.

IEC 150\*CEI 150, 1963-00-00  
Essai et étalonnage de générateurs d'ultrasons à usage thérapeutique.

IEC 500\*CEI 500, 1974-00-00  
Hydrophone étalon CEI.

IEC 565\*CEI 565, 1977-00-00  
Etalonnage des hydrophones.

IEC 565A\*CEI 565A, 1980-00-00  
Etalonnage des hydrophones.

IEC 601-2-5\*CEI 601-2-5, 1984-00-00  
Appareils électromédicaux. Deuxième partie: règles particulières pour accélérateurs médicaux d'électrons dans la gamme 1 MeV à 50 MeV. Section cinq: règles particulières de sécurité pour appareils à ultrasons pour thérapie.

IEC/TR 653\*CEI/TR 653, 1979-00-00  
Considérations générales sur le nettoyage aux ultrasons.

IEC/TR 782\*CEI/TR 782, 1984-00-00  
Mesures des transducteurs magnétostrictifs ultrasoniques, Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 3.

IEC 839-2-4\*CEI 839-2-4, 1990-07-00  
Systèmes d'alarme; partie 2: prescriptions pour les systèmes d'alarme anti-intrusion; section 4: détecteurs à ultrasons à effet doppler-fizeau utilisés dans les bâtiments.

- IEC/TR 854\*CEI/TR 854, 1986-00-00  
Méthodes de mesure des caractéristiques des appareils à impulsions ultrasonores utilisés pour le diagnostic.
- IEC 866\*CEI 866, 1987-00-00  
Caractéristiques et étalonnage des hydrophones fonctionnant dans la gamme des fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.
- IEC/TR 886\*CEI/TR 886, 1987-00-00  
Recherches sur les méthodes d'essai des appareils pour le nettoyage aux ultrasons.
- IEC 1012\*CEI 1012, 1990-01-00  
Filtres pour la mesure des sons audibles en présence d'ultrasons.
- IEC/TR 1088\*CEI/TR 1088, 1991-09-00  
Caractéristiques et mesures des transducteurs piézo-céramiques ultrasonores.
- IEC 1101\*CEI 1101, 1991-11-00  
L'étalonnage absolu des hydrophones par la technique du balayage planaire dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.
- IEC 1102\*CEI 1102, 1991-11-00  
Mesurage et caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz.
- Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 4  
IEC 1102 AMD 1\*CEI 1102 AMD 1, 1993-09-00  
Mesurage et caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz; amendement 1.
- IEC 1157\*CEI 1157, 1992-07-00  
Critères pour la déclaration des émissions acoustiques des appareils de diagnostic médical à ultrasons.
- IEC 1161\*CEI 1161, 1992-07-00  
Mesurage de puissance ultrasonore dans les liquides dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz.
- IEC 1205\*CEI 1205, 1993-12-00  
Ultrasons; systèmes de détartreurs dentaires; mesure et déclaration des caractéristiques de sortie.
- IEC/TR 1206\*CEI/TR 1206, 1993-05-00  
Ultrasons; ensembles à effet Doppler à ondes entretenues; méthodes d'essai.
- IEC/TR 1220\*CEI/TR 1220, 1993-05-00  
Ultrasons-champs; guide pour les mesures et caractéristiques des champs ultrasonores produits par des appareils médicaux à ultrasons utilisant des hydrophones dans la gamme de fréquence de 0,5 MHz à 15 MHz.
- IEC 1266\*CEI 1266, 1994-12-00  
Ultrasons - Détecteurs des battements de coeur foetal à effet Doppler avec sonde à main - Prescriptions de performance et méthodes de mesure et de signalement  
Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 5.
- ISO 2400, 1972-06-00  
Soudures sur acier; bloc de référence pour l'étalonnage des appareils pour l'examen par ultrasons.
- ISO 4386-1, 1992-02-00  
Paliers lisses; paliers lisses métalliques multicouches; partie 1: contrôle non destructif aux ultrasons des défauts d'adhérence.
- ISO/DIS 4992, 1991-09-00  
Pièces moulées en acier; contrôle par ultrasons.
- ISO 5948, 1994-06-00  
Matériel roulant de chemin de fer - Essai de réception aux ultrasons.
- ISO 6416, 1992-09-00  
Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts; mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique).
- ISO 7963, 1985-09-00  
Soudures sur acier; bloc d'étalonnage no 2 pour l'examen par ultrasons des soudures.

ISO/DIS 8047, 1982-12-00

Béton durci; détermination de la vitesse de propagation du son; valable à partir de 1982-12-23.

ISO 9303, 1989-08-00

Tubes en acier sans soudure et soudés (sauf a Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 3 l'arc immergé) pour service sous pression; contrôle par ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections longitudinales; valable à partir de 1989-07-15.

ISO 9305, 1989-07-00

Tubes en acier sans soudure pour service sous pression; contrôle aux ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections transversales; valable à partir de 1989-07-01.

ISO 9764, 1989-08-00

Tubes en acier soudés par résistance électrique ou induction pour service sous pression; contrôle par ultrasons du cordon de soudure pour la détection des imperfections longitudinales; valable à partir de 1989-08-01.

ISO 9765, 1990-12-00

Tubes en acier soudés à l'arc submergé pour service sous pression; contrôle par ultrasons du cordon de soudure pour la détection des imperfections longitudinales et/ou transversales; valable à partir de 1990-12-01.

ISO 10124, 1994-12-00

Tubes en acier sans soudure et soudés (sauf soudés à l'arc sous flux) pour service sous pression – Contrôle par ultrasons pour la détection des dédoubleures.

ISO 10332, 1994-02-00

Tubes en acier sans soudure et soudés (sauf à l'arc immergé) pour service sous pression; contrôle par ultrasons pour la vérification de l'étanchéité.

ISO/DIS 10375, 1993-03-00

Essais non destructifs; contrôle par ultrasons; caractérisation des transducteurs et des champs acoustiques.

ISO 10543, 1993-11-00

Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 4  
Tubes en acier sans soudure et soudés issus d'un laminoir étireur-réducteur pour service sous pression; contrôle de l'épaisseur par ultrasons sur toute la circonférence.

ISO 11496, 1993-11-00

Tubes en acier soudés et sans soudure pour service sous pression; contrôle aux ultrasons des extrémités de tube pour la détection des dédoubleures de laminage.

ISO 12094, 1994-12-00

Tubes en acier soudés pour service sous pression – Contrôle par ultrasons pour la détection des imperfections de laminage des feuillards/plaques utilisés pour la fabrication de tubes soudés.

EN 61101, 1993-11-00

L'étalonnage absolu des hydrophones par la technique du balayage dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz (CEI 1101:1991).

EN 61102, 1993-11-00

Mesurage et caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans la gamme de fréquence de 0,5 MHz à 15 MHz (CEI 1102:1991).

EN 61102/A1, 1994-01-00

Mesurage et caractérisation des champs ultrasonores à l'aide d'hydrophones dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz (CEI 1102:1991/A1:1993).

EN 61157, 1994-08-00

Critères pour la déclaration des émissions, acoustiques des appareils de diagnostic médical à ultrasons (CEI 1157:1992).

EN 61161, 1994-08-00

Mesurage de puissance ultrasonore dans les liquides dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 25 MHz (CEI 1161:1992).

EN 61205, 1994-01-00

Ultrasons; systèmes de détartreurs dentaires; mesure et déclaration des caractéristiques de sortie (CEI 1205:1993)  
Copyright 1996 by AFNOR, BSI, DIN, page 3.

EN 61206, 1995-02-00

Ultrasons - Ensembles à effet Doppler à ondes entretenues – Méthodes d'essai (CEI 1206:1993).

EN 61220, 1995-02-00

Ultrasons – Champs – Guide pour les mesures et caractéristiques des champs ultrasonores produits par des appareils médicaux à ultrasons utilisant des hydrophones dans la gamme de fréquences de 0,5 MHz à 15 MHz (CEI 1220:1993).

prEN 583-1, 1991-11-00

Contrôle par ultrasons; partie 1: principes généraux.

prEN 583-3, 1994-07-00

Contrôle par ultrasons – Partie 3: techniques de transmission.

prEN 1712, 1994-10-00

Contrôles non destructifs des assemblages soudés – Critères d'acceptation pour le contrôle par ultrasons des assemblages soudés.

prEN 1713, 1994-10-00

Contrôles non destructifs des assemblages soudés – Contrôle par ultrasons – Caractérisation des défauts de soudures.

prEN 1714, 1994-10-00

Essais non destructifs des assemblages soudés – Examen aux ultrasons des assemblages soudés.

prEN 2004-2, 1976-04-00

Méthodes d'essais applicables aux produits en aluminium et alliages d'aluminium; partie 2: contrôle par ultrasons des tôles épaisses, pièces forgées et produits filés; série aérospatiale.

DIN EN 10228-3, 1995-02-00

Inspection non-destructrice des pièces forgées en acier – Partie 3: contrôle par ultrasons des pièces forgées en acier ferritic et martensitic; version allemande prEN 10228-3:1994.

prEN 29303, 1991-02-00

Tubes en acier sans soudure et soudés (sauf à l'arc immergé) pour service sous pression; contrôle par ultrasons sur toute la circonférence pour la détection des imperfections longitudinales.

prEN 61025, 1993-03-00

Ultrasons; systèmes de détecteurs dentaires; mesure et déclaration des caractéristiques de sortie.

**Suva**

Case postale, 6002 Lucerne  
Tél. 041 419 58 51  
[www.suva.ch](http://www.suva.ch)

Edition: mars 1997

**Référence**

66077.f