

LIMITES D'EXPOSITION AUX INFRASONS ET AUX ULTRASONS

Étude bibliographique

Les sons dont le spectre est partiellement ou totalement en dehors de l'intervalle 20 Hz – 20 kHz sont classiquement qualifiés d'inaudibles. Pourtant, la sensibilité de l'oreille s'étend en dehors de cet intervalle, même si elle est beaucoup plus faible pour les infrasons (basse fréquence) comme pour les ultrasons (haute fréquence). De plus, l'être humain peut percevoir les infrasons comme les ultrasons par d'autres voies que le seul chemin auditif. En milieu industriel, les sources émettant des sons dont le spectre se situe en dehors de l'intervalle 20 Hz – 20 kHz sont nombreuses. L'existence d'effets nuisibles ou désagréables à l'homme de ces sons quasi-inaudibles est un fait prouvé dès lors que leurs niveaux sont suffisamment élevés. L'article propose, au moyen d'une revue bibliographique, de préciser la physique de la transmission des infrasons et des ultrasons, la sensibilité humaine aux fréquences associées, les effets physiologiques constatés lors d'une exposition à des niveaux élevés et les mesures de prévention possibles. Les valeurs limites d'exposition proposées par plusieurs pays sont discutées et, en l'absence de réglementation, des recommandations sont proposées.

Les bruits dont le spectre se situe totalement dans la bande des fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz sont considérés comme des bruits audibles. Les dangers pour l'audition d'une exposition sonore quotidienne à ces bruits audibles lorsqu'ils dépassent certains niveaux sont connus et la réglementation prévoit des seuils d'action bien définis [1] qui seront modifiés en 2006 par l'application en droit français de la nouvelle directive européenne sur le bruit au travail [2]. Le mesurage des niveaux d'exposition est normalisé [3] et utilise la pondération A afin de tenir compte de la courbe de sensibilité de l'oreille humaine.

Quand le spectre des bruits se situe partiellement ou totalement en deçà de 20 Hz, on parlera d'infrasons [4] tandis que s'il se situe au-delà de 20 kHz, on parlera d'ultrasons [5]. On admet généralement que ces bruits sont inaudibles,

alors qu'en réalité, la sensibilité de l'oreille humaine s'étend dans les gammes extérieures à l'intervalle 20 Hz - 20 kHz dès que les niveaux reçus sont suffisamment élevés. Les seuils de sensibilité sont très variables d'un individu à l'autre.

De plus, les bruits en général, mais aussi les ultrasons comme les infrasons, peuvent être ressentis par une transmission de l'énergie vibratoire à d'autres organes (peau, yeux, muscles, puis crâne et squelette ou organes internes). Cette transmission peut être directe (contact de la peau avec une source d'ultrasons par exemple) ou aérienne quand les vibrations de l'air atteignent l'oreille ou la peau.

Comme la sensibilité de l'oreille humaine s'étend de part et d'autre de la limite basse de 20 Hz, et avec une variabilité importante selon les sujets, la

- Bruit
- Infrason
- Ultrason
- Valeur limite

► Jacques CHATILLON,
INRS, Département Ingénierie
des équipements de travail

INFRASONIC AND ULTRASONIC NOISE EXPOSURE LIMITS - A BIBLIOGRAPHICAL STUDY

Sounds whose spectra fall partially or wholly outside the 20 Hz - 20 kHz range are traditionally termed inaudible. Yet, ear sensitivity extends beyond this range, even though it is much weaker for both infrasound (low frequency) and ultrasound (high frequency). Moreover, the human being can perceive both infrasound and ultrasound by means other than only the auditory path. In industrial environments, there are many sources emitting sounds with spectra falling outside the 20 Hz - 20 kHz range. Existence of effects harmful or unpleasant to man due to these virtually inaudible sounds is a proven fact, when their levels are sufficiently high. Based on a bibliographical review, this paper aims to clarify infrasound and ultrasound transmission physics, human sensitivity to the related frequencies, the physiological effects noted during exposure to high levels and possible prevention measures. Exposure limit values proposed by several countries are discussed and, in the absence of regulations, recommendations are proposed.

- Noise
- Infrasound
- Ultrasound
- Limit value

bande de fréquence de 20 Hz à 40 Hz représente une zone de transition entre les infrasons et les sons audibles [6]. Au-delà de 40 Hz et jusqu'à 100 Hz, on admet que l'on a affaire à des sons audibles basse fréquence.

De la même façon, la sensibilité de l'oreille aux sons de haute fréquence (gamme 8 kHz – 20 kHz) est très variable d'un individu à l'autre, avec, généralement, une diminution de l'acuité auditive avec l'âge, et plutôt dans cette gamme de haute fréquence, appelée presbyacousie. La zone de transition est, pour cette gamme, généralement considérée à partir de l'octave 16 kHz (première octave non mesurée lors des tests d'audiométrie [7]) qui s'étend d'environ 11,3 kHz à 22,6 kHz, et pour laquelle on parle alors de sons « très haute fréquence » ou d'ultrasons de « basse fréquence ».

La sensibilité de l'oreille humaine étant beaucoup plus faible en dehors de la gamme 20 Hz – 20 kHz, les bruits de la gamme infrasonore ou ceux de la gamme ultrasonore sont supposés moins dangereux pour l'audition que les bruits audibles de niveau équivalent. Pourtant, l'existence d'effets nuisibles ou désagréables à l'homme de ces bruits quasi-inaudibles est un fait prouvé et il est nécessaire de savoir les identifier, d'estimer les niveaux d'exposition et de prendre éventuellement les mesures adéquates pour diminuer leur influence sur les personnes exposées.

Cet article est divisé en deux parties, l'une consacrée aux infrasons, l'autre aux ultrasons, car leur génération, leur propagation, leurs effets physiologiques et leurs limites d'exposition obéissent à des problématiques relativement différentes.

En l'absence de toute réglementation sur l'exposition des travailleurs à ces bruits quasi-inaudibles, des recommandations sur les valeurs limites d'exposition sont proposées.

INFRASONS

GÉNÉRATION

Les sources infrasonores sont nombreuses, qu'elles soient naturelles ou artificielles.

Les sources naturelles sont les mouvements violents de l'air (vents, tempêtes, jusqu'à 135 dB à 100 km/h), les fluctuations rapides de la pression atmosphérique (< 1 Hz à 100 dB), les mouvements de l'eau (vagues océaniques, < 1 Hz) et les vibrations du sol provoquées par des éruptions volcaniques ou des tremblements de terre, qui comportent des composantes basse-fréquence à leur tour ré-émises dans l'air. De même, les sources émettant sur une large bande de fréquence (tonnerre, chutes d'eau) peuvent émettre des composantes de haute énergie se situant dans la partie infrasonore du spectre.

Tous les moyens de transport (automobiles, camions, hélicoptères, avions, bateaux, trains) sont des sources de bruit comportant souvent des composantes vibratoires basse-fréquence et infrasonores [8]. Les passagers d'une automobile ou d'un train peuvent être soumis à des niveaux de 120 dB entre les fréquences 1 Hz et 20 Hz et les niveaux peuvent atteindre de 115 à 150 dB, pour la même gamme de fréquence, dans une cabine d'hélicoptère.

En milieu industriel, ce sont principalement les machines tournantes lourdes qui sont connues pour leur émission infrasonore [9]. Les ventilateurs, pompes, compresseurs, machines à sécher, machines à air conditionné, broyeurs, centrifugeuses à béton, etc. produisent couramment des niveaux élevés d'infrasons.

Le développement des éoliennes comme source d'énergie électrique renouvelable a amené récemment des polémiques sur leur potentialité à produire des infrasons dangereux pour la santé. Les rares données provenant de mesurage [10] montrent que les niveaux émis sont de l'ordre de ceux des sources naturelles (vent).

Les sources impulsives (explosions, chocs) peuvent aussi émettre des composantes de haute énergie se situant dans la partie infrasonore du spectre. De plus, certaines sources cohérentes émettant

deux fréquences pures non-infrasonores assez proches peuvent provoquer l'apparition d'infrasons par des battements à la fréquence différence (différence entre les deux fréquences de départ) en raison des non-linéarités du milieu.

On peut citer aussi des sources d'infrasons moins répandues comme celles servant à des applications thérapeutiques (massages) ou militaires (armes non létales [11]). Les niveaux de ces dernières sources ne sont pas publiés.

PROPAGATION

Comme les bruits audibles, les infrasons sont des ondes sonores se propageant dans un milieu élastique fluide (air) ou dans les solides (sol, structures). Leur gamme de fréquence très basse fait que l'absorption par les milieux traversés est relativement faible. Par exemple, dans l'air, l'énergie d'une onde infrasonore de fréquence 10 Hz diminue seulement de l'ordre de 0,1 dB par kilomètre, à comparer avec une absorption de l'ordre de 10 dB par kilomètre pour un son de fréquence audible à 1 kHz.

L'atténuation due à la propagation en ondes sphériques (- 6 dB par doublement de la distance) s'applique aussi aux infrasons et représente souvent le seul terme significatif de diminution de l'énergie des ondes infrasonores avec la distance.

La localisation des sources infrasonores est rendue difficile par la faible absorption : les sources peuvent être très éloignées du lieu où la nuisance est mesurée (plusieurs centaines de mètres).

De plus, la gamme de fréquence implique de grandes longueurs d'onde, de l'ordre de 34 m, par exemple, à 10 Hz. La directivité d'une source étant liée à sa grandeur mesurée en longueur d'onde, beaucoup de sources industrielles sont petites devant la longueur d'onde. Elles émettent alors des infrasons dans toutes les directions de l'espace avec une énergie à peu près équivalente : les sources infrasonores sont généralement omnidirectionnelles.

Ces caractéristiques font qu'il sera souvent illusoire de vouloir se protéger des infrasons par des procédés classiques d'isolement et d'absorption acoustique.

Une réduction du niveau d'émission à la source sera souvent la seule solution possible pour diminuer les niveaux d'exposition.

PERCEPTION

Seuil d'audition en basse fréquence

De nombreuses expérimentations récentes ou plus anciennes font état de la sensibilité de l'oreille à des fréquences inférieures à 20 Hz [12]. Cette sensibilité existe pour tous les sujets en bonne santé, même si elle est très inférieure à celle connue aux fréquences moyennes du spectre qualifié d'audible. Cette constatation remet même en cause le concept usuel d'infrasons puisque des sons puissants de fréquence inférieure à 20 Hz ne sont pas inaudibles.

La *Figure 1*, adaptée de Møller [12], montre :

■ au-dessus de 20 Hz, les seuils d'audition décrits par la norme ISO 226 : 2003 [13].

■ dans la gamme de fréquence [1 Hz – 20 Hz], la moyenne de relevés de seuils d'audition pour des sujets variant en âge et en sexe, selon différents auteurs. Les écarts-types relevés lors de ces expérimentations sont de l'ordre de 3 à 8 dB, alors que le seuil d'audition des sujets les plus sensibles se trouve à plus de 10 dB en dessous de la moyenne,

Les deux parties de la courbe, de part et d'autre de 20 Hz, montrent une variation continue des seuils.

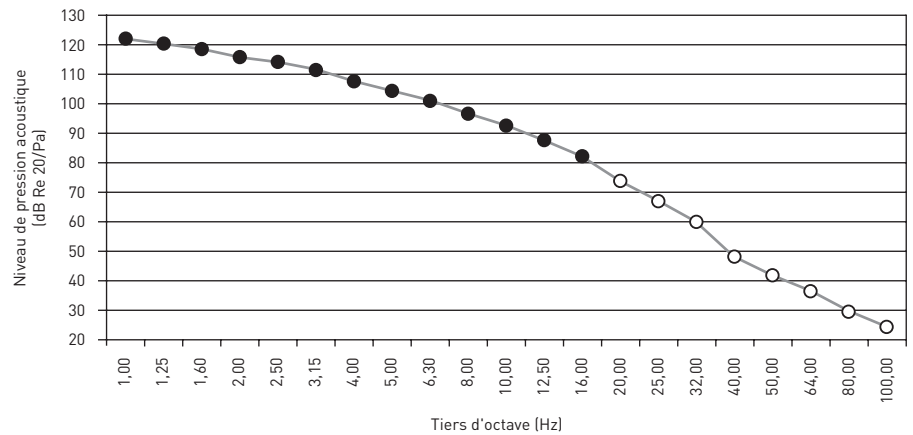
Accroissement de la sensibilité

Écoute binaurale : pour les infrasons, il a été montré qu'une écoute binaurale augmentait la sensibilité de 3 dB par rapport à une écoute monaurale, comme pour les fréquences classiquement qualifiées d'audibles [12].

Augmentation de la sensation sonore : les courbes isosoniques données par la norme ISO 226 : 2003 [13] montrent qu'en basse fréquence, la sensation sonore augmente plus vite quand le niveau de pression acoustique s'accroît, comparativement à ce qui se passe aux fréquences audibles. Par exemple, une augmentation du niveau de pression de 20 dB(Lin) provoque une augmentation de la sensation d'environ 40 phons à 20 Hz, contre 20 phons à 1 kHz (par définition).

FIGURE 1

Seuil d'audition en basses fréquences Hearing Threshold in low frequency



- Seuil d'audition normalisé au-dessus de 20 Hz (ISO 226 : 2003) et
- Moyenne des résultats de recherches récentes couvrant les fréquences jusqu'à 20 Hz [12]
- Standardized hearing threshold above 20 Hz (ISO 226 : 2003) and
- Average results from recent investigations covering frequencies up to 20 Hz [12]

Perception vibrotactile

Une étude conduite avec des sujets sourds [14] a montré que la perception pouvait exister pour des niveaux suffisamment élevés par d'autres moyens que celui de l'audition. Cette étude a précisé que cette perception qualifiée de « vibrotactile » apparaît pour des niveaux de l'ordre de 124 dB à 4 Hz (contre 107 dB pour l'audition) ou 116 dB à 16 Hz (contre 82 dB pour l'audition).

Une perception vibrotactile peut amener des confusions de sensation. Les personnes exposées aux infrasons peuvent se croire exposées à des vibrations issues d'une seule transmission solidienne. Il est donc important d'être capable d'identifier les couplages entre la nuisance physique ressentie et la source afin de différencier les problèmes purement vibratoires des problèmes d'ondes élastiques dans l'air (infrasons).

INADÉQUATION DE LA PONDÉRATION A – PONDÉRATION G

Il est courant d'utiliser la pondération A, adaptée à la réponse de l'oreille, pour estimer l'exposition sonore aux bruits audibles. Les sonomètres de classe 1 qui utilisent la pondération A ont des tolérances de mesures définies dans une bande de fréquence comprise entre 16 Hz et 16 kHz [15].

Pour les sons basse fréquence et les infrasons, certains auteurs ont montré

que l'utilisation de la pondération A pour estimer la nuisance de composantes basse fréquence conduit à les sous-estimer [16, 17]. D'autres auteurs mettent en évidence que les niveaux de gêne sont plus proches des seuils d'audition en basse qu'en haute fréquence [18].

Le normalisateur a tenu compte de ces difficultés et a défini une pondération fréquentielle spécifique pour le mesurage des infrasons, la pondération dite G [4]. La *Figure 2* montre l'allure de cette pondération pour les tiers d'octave de 1 Hz à 100 Hz.

L'utilisation de cette pondération sur les seuils d'audition montrés sur la *Figure 1* conduit à la courbe de la *Figure 3*.

Dans le domaine des fréquences comprises entre 1 Hz et 100 Hz, l'usage de cette pondération sur les seuils d'audition tirés de Møller [12] conduit à un niveau (intégré sur la bande de fréquence) de perception auditive de l'ordre de 102 dB(G). Si on réduit l'intervalle d'intégration aux fréquences comprises entre 1 Hz et 20 Hz, ce résultat reste identique car les valeurs des coefficients de la pondération G décroissent très rapidement de 20 Hz à 100 Hz. La norme ISO 7196 : 1995 [4] confirme ce résultat en affirmant que, dans le domaine des fréquences comprises entre 1 Hz et 20 Hz, des sons tout juste perceptibles par un auditeur moyen, donneront, après pondération,

FIGURE 2

Pondération G pour les tiers d'octave de 1 à 100 Hz
G weighting for one third octaves from 1 to 100 Hz

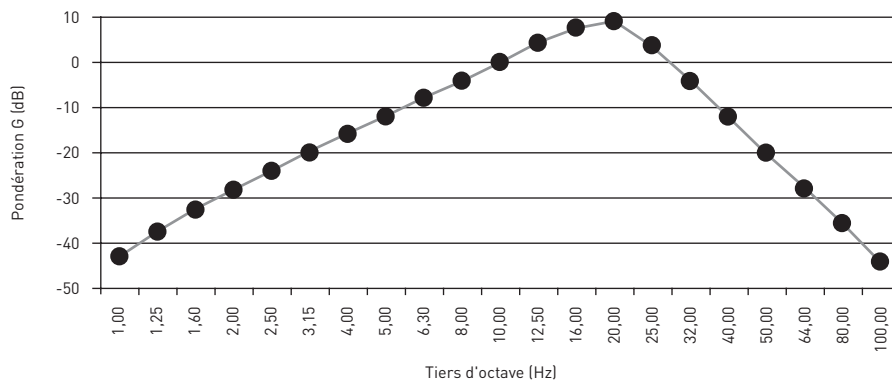
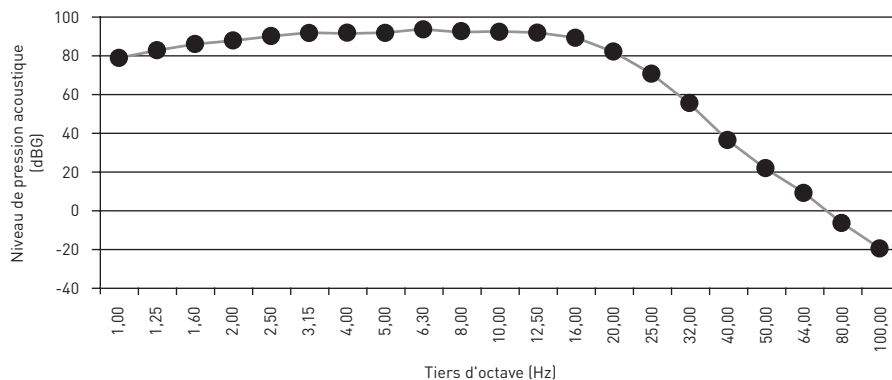


FIGURE 3

Seuils d'audition de la Figure 1 pondérés G
Figure 1 hearing thresholds with G weighting applied



des niveaux de pression acoustique proches de 100 dB(G).

EFFETS PHYSIOLOGIQUES

Les effets physiologiques des infrasons, comme ceux de tous les bruits, dépendent du niveau reçu.

À faible niveau, autour du seuil d'audition, des réactions de fatigue, de dépression, de stress, d'irritation, d'asthénie, de mal de tête, de troubles de la vigilance ou de l'équilibre et des nausées (« mal de mer ») ont été décrits [14, 19, 20]. Ces réactions peuvent être dues à la mise en vibration de certains organes digestifs, cardio-vasculaires, respiratoires ou des globes oculaires [21].

Au seuil d'audition, des expériences faites sur des sujets sourds et entendant ont montré que des changements de l'état de vigilance des sujets étaient bien dus à une stimulation cochléaire [22].

À des niveaux plus élevés, les symptômes précédents s'amplifient et peuvent devenir insupportables si les durées d'exposition sont trop importantes.

La rémanence des symptômes a été notée, alors que la source est supprimée, les sensations de malaise peuvent perdurer quelque temps. Cette constatation est expliquée par les expériences au cours desquelles la pression artérielle ou le rythme cardiaque des sujets ont été modifiés.

La sensibilité de chaque individu étant très variable, les sensations de gêne ou de désagrément peuvent apparaître, pour certains individus très sensibles, à des niveaux inférieurs aux seuils d'audition.

Certains auteurs notent un effet possible de masquage [14, 23]. Les symptômes dus à des infrasons de faible niveau sont atténués dès que le sujet est baigné dans un bruit audible de plus fort niveau.

Pour finir, l'hypothèse d'une sensibilisation aux infrasons a été émise par certains, mais elle est contestée [19].

LIMITES D'EXPOSITION

Recommandations dans différents pays étrangers

En l'absence de réglementation nationale ou européenne sur les limites d'exposition aux infrasons, plusieurs références donnent des indications sur les niveaux considérés comme étant pénibles ou dangereux [24, 25].

■ L'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) recommande, à l'exception des bruits impulsifs de durée inférieure à 2 s, que le niveau dans chaque tiers d'octave pour les fréquences de 1 à 80 Hz ne dépasse pas 145 dB(Lin), et que le niveau total ne dépasse pas 150 dB(Lin). Aucune indication de durée d'exposition n'est précisée.

■ Le New Zealand Occupational Safety and Health Service (NZOSHS) préconise que le niveau de pression infrasonore soit inférieur à 120 dB(Lin), niveau global intégré dans la bande de fréquence de 1 à 16 Hz, pour 24 heures d'exposition.

■ Le Danish Environmental Protection Agency (DEPA) [26] recommande, pour les infrasons environnementaux, que les niveaux d'exposition des citoyens soient inférieurs de 10 dB au seuil d'audibilité des infrasons. Dans cette publication, le seuil d'audition est réputé être égal, pour les sujets les plus sensibles, à environ 95 dB(G). Le DEPA recommande donc de ne pas dépasser une limite de 85 dB(G), niveau moyen pondéré G intégré jusqu'à 20 Hz.

■ Le « Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit » (EKAS - Suisse) écrit [27] « Au stade actuel des connaissances acquises, il n'y a pas de risque à redouter des infrasons tant que leur niveau acoustique pondéré¹, calculé sur une journée de travail de 8 h, ne dépasse pas 135 dB et lorsque la valeur maximale se situe en dessous de 150 dB. Des perturbations du bien-être peuvent se manifester lorsque le niveau moyen dépasse 120 dB. »

¹ En l'absence d'autre indication et vu les niveaux indiqués, il faut sans doute comprendre « pondéré A ».

■ La norme ISO 7196:1995 [4] affirme que, dans le domaine des fréquences comprises entre 1 Hz et 20 Hz, des sons tout juste perceptibles par un auditeur moyen donnent des niveaux de pression acoustique proches de 100 dB(G). Elle ajoute que les niveaux inférieurs à 90 dB(G) ne sont généralement pas significatifs du point de vue de la perception par l'homme.

■ L'INRS en 1992 [28] utilise une publication de Pimonow [29] pour classer les niveaux des bruits de fréquence inférieure à 20 Hz dans quatre zones différentes. Si L_p est le niveau de bruit intégré sans pondération pour les bandes de fréquence inférieure à 20 Hz, les quatre zones sont les suivantes :

■ $L_p \leq 120$ dB(Lin) : niveau pour lequel une exposition de quelques dizaines de minutes ne conduirait généralement pas à des effets nuisibles. On admet que l'on ne connaît ni les actions psychologiques de tels niveaux, ni les conséquences à des expositions prolongées ;

■ 120 dB(Lin) < $L_p \leq 140$ dB(Lin) : niveau pour lequel l'apparition de troubles psychologiques passagers est appréciable mais la fatigue supportable par des personnes en bonne condition physique, même dans le cas d'une exposition de plusieurs heures ;

■ 140 dB(Lin) < $L_p \leq 155$ dB(Lin) : niveau pour lequel l'apparition de troubles psychologiques est appréciable et la fatigue supportable par des personnes en bonne condition physique, dans le cas d'une exposition courte (2 minutes) ;

■ $L_p > 180$ ou 190 dB(Lin) : niveau léthal (déchirure des alvéoles pulmonaires).

Les chercheurs du « Centralny Instytut Ochrony Pracy » (CIOP, Pologne), dans une publication récente [25], font un point relativement complet sur les différentes recommandations internationales et sur la bibliographie disponible. Cette publication conclut qu'il est souhaitable que les niveaux d'exposition aux infrasons ne dépassent pas 102 dB(G) en niveau moyen pondéré G intégré sur la gamme de 2 Hz à 50 Hz, pour 8 heures de travail. Pour les bruits impulsionnels dans ces gammes de fréquences infrasonores, cette publication recommande une limite de 145 dB(Lin).

Discussion et conclusion

Les indications du paragraphe précédent ne sont pas immédiatement

comparables entre elles à cause de l'usage de différentes pondérations, des bornes d'intégration en fréquence ou de la diversité de la prise en compte de la durée d'exposition.

Pourtant, quand les niveaux sont donnés en dB(Lin), l'INRS, l'ACGIH ou le NZOSHS donnent des recommandations relativement proches : il est indiqué que les expositions de plusieurs heures à des niveaux inférieurs aux seuils de 120 à 150 dB(Lin) ne conduiraient qu'à des troubles passagers.

Quand les niveaux sont donnés en dB(G), la norme ISO 7196 : 1995 ou le DEPA indiquent que des valeurs inférieures à 85 ou 90 dB(G) seraient toujours en deçà des seuils de sensation ou de gêne. Sur toute la gamme de fréquence de 2 à 50 Hz, le CIOP recommande un niveau moyen maximal de 102 dB(G).

On a montré que la pondération G était bien adaptée aux seuils d'audition des sujets moyens dans la gamme de fréquence de 1 à 20 Hz et que ce seuil était de l'ordre de 102 dB(G) (il reste identique de 1 à 100 Hz).

La valeur maximale d'une exposition à des bruits infrasonores (de 1 Hz à 20 Hz) et basse fréquence (de 1 Hz à 100 Hz) continus pendant 8 heures peut donc être estimée à la limite du seuil d'audition pour la plupart des sujets, c'est-à-dire 102 dB(G).

L'exposition à des bruits impulsionnels inférieurs à 145 dB(Lin) semble aussi être une limite prudente.

Pour les bruits continus, une diminution de la durée de l'exposition permettrait d'augmenter ces seuils de 3 dB par diminution de la durée par un facteur 2, comme les principes d'énergie équivalente le permettent pour le bruit audible.

Le *Tableau I* résume les valeurs limites proposées.

MESURAGE

Le mesurage des infrasons doit s'effectuer conformément à la norme ISO 7196:1995 qui définit la pondération G et donne des indications sur les prescriptions générales relatives à l'appareillage utilisé. En particulier :

TABLEAU I

Valeurs limites proposées pour l'exposition aux infrasons aériens
Suggested limit values for exposure to airborne infrasound

INFRASONS CONTINUS	
Calcul de l'exposition	<ul style="list-style-type: none"> Utilisation de la pondération G Sommation des énergies reçues entre les tiers d'octave compris entre 1 Hz et 100 Hz
Valeur limite d'exposition en dB(G) sur une durée de 8 heures	102 dB(G)
Si la durée d'exposition est diminuée par un facteur 2	Augmentation de la valeur limite de + 3 dB
INFRASONS IMPULSIONNELS	
Calcul de l'exposition	Pas de pondération
Valeur limite d'exposition	145 dB(Lin)

■ la réponse fréquentielle du microphone utilisé doit être constante ou bien définie sur l'intervalle des fréquences allant de 0,25 Hz à 160 Hz ;

■ le reste de la chaîne de mesure doit avoir une réponse fréquentielle ayant au moins les mêmes spécifications que le microphone, le facteur précision étant par ailleurs réputé être crucial, une tolérance de ± 1 dB est demandée ;

■ le temps d'intégration devrait être de 10 secondes pour des bruits continus, jusqu'à une minute pour des bruits fluctuants.

Le mesurage doit s'effectuer en plusieurs points du local dans lequel les infrasons sont soupçonnés ou ressentis. En particulier, à cause des ondes stationnaires pouvant exister dans un local de géométrie relativement régulière, il est nécessaire de considérer des points de mesure proches des cloisons, plancher ou plafond, là où des ventres de pression seraient susceptibles d'exister. D'autres points de mesure sont nécessaires dans le local, à 1 mètre ou 1,5 mètre du sol, puisqu'il n'est pas rare que des ondes stationnaires provoquent des variations de niveau, d'un point à l'autre d'un local, de plus de 30 dB.

Le niveau infrasonore est calculé par sommation des niveaux pondérés G dans les différents tiers d'octave. Cette

sommation pondérée G est alors comparée aux valeurs limites recommandées dans le paragraphe précédent.

MESURES DE PROTECTION

Les mesures de protection contre les infrasons sont peu efficaces puisque ces ondes sont très peu atténuées durant leur trajet dans l'air ou les matériaux isolants acoustiques classiques [30]. Les propriétés acoustiques des matériaux isolants ou absorbants ne sont généralement pas définies en deçà de l'octave 125 Hz. Pour la plupart d'entre eux, ils sont très probablement beaucoup moins efficaces pour la gamme des fréquences inférieures à cette octave. Les équipements de protection individuelle ne sont pas qualifiés en deçà de l'octave 63 Hz et des essais sur des bouchons d'oreille [31] ont prouvé leur inefficacité pour des fréquences en deçà de 50 Hz. De toute façon, les autres sensations corporelles transmises par les vibrations du corps ne peuvent pas être atténuées par ces protecteurs.

Par la diminution du niveau à la source (changement des composants, augmentation des vitesses de rotation des machines tournantes, etc.), on offrira probablement une protection plus efficace que par l'isolation des personnes exposées.

ULTRASONS

GÉNÉRATION

Si l'on exclut les sources biologiques qui sont de faible puissance et représentées par les chauve-souris, mammifères marins et, plus rarement, des insectes, oiseaux ou mammifères terrestres, les sources ultrasonores sont rarement des sources naturelles. Par contre, les sources artificielles sont nombreuses tout comme les applications industrielles ou médicales des ultrasons. Les gammes de fréquence utilisées sont très variées, allant de quelques kilohertz à quelques gigahertz. Les gammes de puissance sont aussi très larges mais on peut distinguer deux types d'applications, en fonction des puissances émises.

■ Des ultrasons de puissance assez faible sont utilisés pour des applications similaires au sonar de la chauve-souris telles que le contrôle, la détection ou le diagnostic, comme par exemple :

- le contrôle non-destructif dans l'industrie,
- l'échographie médicale,
- la détection d'objets ou de personnes (alarmes, capteurs de présence),
- en acoustique sous-marine (sonars civils ou militaires).

■ Des ultrasons de puissance élevée sont utilisés, entre autres, pour des applications échauffant ou transformant des matériaux :

- le soudage par ultrasons (soudage des matières plastiques mais aussi des métaux),
- l'usinage par ultrasons (tournage, perçage, tronçonnage...),
- la sonochimie (extraction, atomisation, émulsification, dégazage, séchage...),
- le nettoyage et le dégraissage dans des cuves à ultrasons,
- les ultrasons thérapeutiques (destructions de tumeurs ou de calculs par échauffement local des tissus).

Cette grande gamme d'applications, liée aux larges gammes de fréquence et de puissance, fait que de très nombreux travailleurs sont exposés aux ultrasons. Mais il faudra bien distinguer, pour un problème posé, quelles fréquences et quelles puissances sont en cause avant d'en déduire les éventuels dangers et les mesures de protection à prendre.

À titre d'exemple, les appareils de soudage ou de nettoyage les plus répandus fonctionnent généralement avec des fréquences centrales comprises entre 15 et 40 kHz et génèrent des niveaux variant de 90 à 130 dB(Lin) à proximité des postes de travail.

PROPAGATION

Les ultrasons se propagent dans les solides et les milieux fluides (air, liquides) mais leur atténuation durant la propagation est plus importante que celle des sons qualifiés d'audibles car l'absorption dans les milieux traversés est proportionnelle à la fréquence. Dans l'air, à 15°C et 37 % d'humidité, l'absorption d'une onde ultrasonore de fréquence 30 kHz est environ de 7 dB pour 10 m parcourus alors qu'elle n'est que de 0,7 dB pour 10 m parcourus par une onde audible de fréquence 4 kHz [32].

Les ultrasons de haute fréquence (de 100 kHz à 1 GHz) sont donc très vite atténués dans l'air, et par n'importe quel matériau. Les mesures d'isolement des sources ultrasonores sont donc assez faciles à prendre pour les champs directs.

Par contre, dans les liquides (eau de mer, liquides physiologiques), les ultrasons se propagent mieux, l'absorption n'étant par exemple que de 4 à 6 dB par kilomètre parcouru dans de l'eau de mer par des ondes de fréquence 30 kHz.

À ces absorptions, il convient de rajouter l'atténuation due à la divergence sphérique, comme pour toutes les ondes acoustiques provenant d'une source proche et de petite dimension, qui diminue les niveaux de 6 dB par doublement de la distance (en champ libre).

Les fréquences élevées des ultrasons rendent souvent les sources, même les sources de petite taille, directives sur les faibles longueurs d'onde (1 cm à 34 kHz ou 3,4 mm à 100 kHz ; dans l'air). Mais, au cours de leur propagation, les ultrasons :

- se réfléchissent sur les parois qu'ils rencontrent comme les ondes sonores audibles,
- se diffractent sur les bords des obstacles rencontrés,
- sont facilement diffusés par les rugosités des parois à cause de leur longueur d'onde.

Dans un local industriel, ces phénomènes physiques peuvent provoquer un champ diffus de niveau non négligeable à proximité d'une machine à ultrasons, malgré les fortes absorptions durant la propagation directe évoquées plus haut.

La transmission à l'homme peut s'effectuer par deux voies, la transmission par contact direct (peau) ou la transmission aérienne (oreilles). Les effets physiologiques et les limites d'exposition sont alors très différents.

TRANSMISSION À L'HOMME PAR CONTACT DIRECT – LIMITES D'EXPOSITION

Effets physiologiques

La transmission directe à l'homme peut s'effectuer par contact d'un émetteur avec la peau ou par immersion d'une partie du corps dans un bain excité

par des ultrasons (la faible atténuation des ultrasons dans les liquides permet de considérer ce contact comme direct). Pour ces cas, l'énergie des ultrasons ne sera pas définie en décibel, mais directement en watt par unité de surface, soit parce qu'il n'y a pas propagation dans l'air (cas du contact direct avec la peau), soit parce que la définition des décibels est très différente dans l'eau ou les liquides et pourrait porter à confusion (cas du contact par immersion).

Pour les contacts avec la peau, les dangers les plus importants sont évidemment les brûlures dues à des émetteurs capables d'échauffer localement des matières plastiques ou métalliques à quelques centaines de degrés (soudage) [33]. Ces brûlures peuvent être immédiates ou différées, rester localisées en surface (épiderme) ou atteindre les tissus plus en profondeur, et, dans ce dernier cas, provoquer des lésions graves après une exposition prolongée.

Les contacts par immersion ont souvent lieu dans un contexte de nettoyage ou dégraissage par ultrasons. Les parois de la cuve vibrent pour transmettre les ultrasons au liquide mais transmettent aussi des ultrasons dans l'air. La présence des solvants et la transmission aérienne résiduelle font que certains effets du contact direct par immersion observés sur l'homme ont été plus ou moins contestés à cause de cette triple exposition (ultrasons touchant l'oreille, solvants, ultrasons touchant la peau). Il est pourtant certain que l'immersion d'une partie du corps humain dans un bain (eau ou solvant) excité par des ultrasons peut être dangereuse, vu les fortes puissances employées qui provoquent localement la cavitation du liquide afin d'arracher les particules polluant la pièce à nettoyer.

Les applications industrielles des ultrasons sont conçues de telle manière que les opérateurs ne soient pas en contact direct avec les émetteurs. Pourtant, à la suite d'un accident ou d'une négligence, le contact direct est possible et potentiellement dangereux, vu les puissances utilisées dans les applications de soudage, d'usinage ou de nettoyage. Le contact direct doit donc être formellement évité.

Les applications de diagnostic médical (échographie) ou industriel (contrôle non-destructif) et les détecteurs (alarmes) utilisent des fréquences plus élevées (de

l'ordre du mégahertz) et des puissances beaucoup plus faibles que les applications industrielles ou les applications médicales thérapeutiques. En échographie médicale, un contact direct entre l'émetteur et la peau est assuré par un couplant gras. A ce jour, aucun effet biologique imputable à de tels ultrasons n'a été mis en évidence en application diagnostique [34], dans la mesure où les expositions sont rares et de faible durée pour les patients. Aucune donnée n'a été trouvée concernant les opérateurs mettant en œuvre ces appareils. Ces derniers pourraient être beaucoup moins exposés que les patients grâce à la directivité des antennes émettrices et un couplage majoritairement aérien.

Limites d'exposition au contact direct

Les intensités d'exposition directe au-dessous desquelles aucun effet biologique important n'a été observé dans les tissus des mammifères sont représentées *Figure 4*. Ce graphique est tiré d'un rapport canadien [33]. Les fréquences ultrasonores se situent dans la gamme 1 à 10 mégahertz et les intensités de crête sont mesurées dans l'eau.

À titre d'exemple, le *Tableau II* tiré du même rapport canadien [33] montre les ordres de grandeur de quelques valeurs de puissance mesurées sur des appareils industriels émettant des ultrasons de forte intensité.

Si l'on extrapole à l'homme les résultats obtenus sur les tissus d'autres mammifères, la courbe de la *Figure 4* peut servir de valeur guide pour définir une limite d'exposition au contact direct à puissance ultrasonore et durée d'exposition données.

TRANSMISSION PAR VOIE AÉRIENNE – LIMITES D'EXPOSITION

Lorsque la transmission est purement aérienne, les effets des ultrasons sur l'homme peuvent être de trois ordres :

- malgré l'atténuation dans l'air, des ultrasons de haute puissance peuvent être transmis à la peau puis aux tissus ou aux organes internes provoquant un réchauffement,
- lorsque le spectre des ultrasons contient aussi des composantes plus basses en fréquence et de faible niveau, on a signalé des effets de gêne,
- les effets généraux sur l'audition sont à discuter puisque ces sons haute

FIGURE 4

Limite du niveau d'exposition au contact direct des ultrasons, adapté de [33]
Limit level of direct contact exposure to ultrasound, adapted from [33]

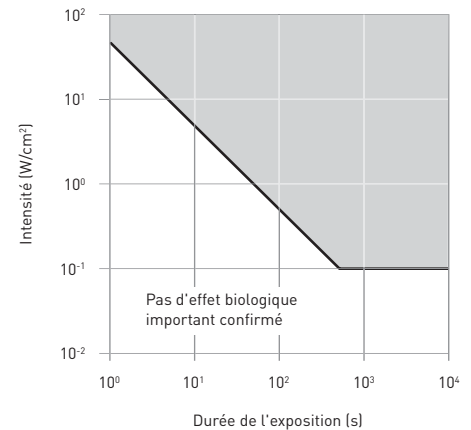


TABLEAU II

Exemples d'intensités mesurées pour des ultrasons industriels
Examples of measured industrial ultrasound intensities

Application	Intensités mesurées
Nettoyage et dégraissage (bains)	Environ 1 à 6 W/cm ² de surface exposée
Soudage et brasage	1 à 50 W/cm ²
Soudage des plastiques	Environ 100 W/cm ² sur la surface à souder
Soudage des métaux	Environ 2 000 W/cm ² à la buse
Extraction d'essences et de produits chimiques (sonochimie)	Environ 100 à 500 W/cm ²

fréquence arrivent naturellement, par voie aérienne, sur le capteur qu'est l'oreille.

Réchauffement

De nombreuses études d'exposition de molécules, de cellules, d'œufs, de larves, d'animaux ont été effectuées depuis les années 40. Un réchauffement important des tissus, jusqu'à la cavitation du sang entraînant la mort, a été observé sur des souris exposées à des niveaux de pression acoustique de l'ordre de 145 à 160 dB(Lin) à la fréquence de 20 kHz et pour des expositions de quelques minutes [33]. Ces niveaux provoqueraient une élévation de la température rapide et nocive chez les êtres humains, pour

lesquels le niveau légal est supposé être égal à environ 180 dB.

Finalement, l'exposition à des niveaux supérieurs à 145 dB provoquerait des effets nocifs aigus chez l'être humain dus au réchauffement des tissus. Cependant, de tels niveaux n'ont jamais été observés dans l'air à proximité (quelques dizaines de centimètres) des appareils industriels courants.

Gêne

On a signalé un certain nombre d'effets (qualifiés de « subjectifs ») des ultrasons transmis dans l'air. Des sensations de fatigue, des nausées, des maux de tête, des acouphènes, des perturbations de l'équilibre ont été rapportés. Ces observations sont parfois effectuées sur des personnes travaillant à proximité de cuves de nettoyage où l'exposition conjointe aux vapeurs de solvants a pu laisser des doutes sur la véritable cause de la gêne.

De plus, l'exposition conjointe à des composantes audibles haute fréquence est commune à proximité des appareils industriels à ultrasons, soit parce que ces composantes sont provoquées par d'autres appareils voisins, soit parce que des émissions secondaires plus basse-fréquence sont provoquées par l'appareillage à ultrasons. En effet, les émissions puissantes des appareils à ultrasons peuvent provoquer, grâce à des phénomènes de non-linéarité, des battements à la fréquence moitié de la fréquence fondamentale. Ces battements, qualifiés de sous-harmoniques dans la littérature, sont audibles si les fréquences principales d'émission des ultrasons sont inférieures à 40 kHz, ce qui est le cas pour beaucoup d'appareils de soudage ou de nettoyage.

Il faudra donc bien identifier les causes réelles (exposition conjointe à des solvants et/ou des composantes audibles haute fréquence 10-20 kHz) dans le cas d'un problème de gêne à proximité d'un appareil à ultrasons. Les personnes ayant une bonne acuité auditive en haute fréquence peuvent de toute façon être gênées par des composantes comprises entre 16 et 22 kHz.

Effets sur l'audition

Les principaux effets des ultrasons émis par les appareils industriels et transmis dans l'air sont ceux associés à la réception des ondes par l'oreille. De

nombreuses études ont été effectuées depuis les années 40 et de nombreux organismes internationaux ont multiplié les études de synthèse [33, 35, 36] qui confrontent à la fois les observations éventuelles sur les lésions auditives et sur les limites d'exposition recommandées par différents pays.

Comme pour les problèmes de gêne déjà évoqués, l'observation des effets des ultrasons sur l'audition est parfois limitée par une exposition conjointe à des solvants, dont on sait qu'elle peut entraîner des maux de tête ou des nausées mais aussi qu'elle peut amplifier les pertes auditives [37] ou par une exposition conjointe à des hautes fréquences audibles. Dans ce dernier cas, les pertes auditives résultantes peuvent être subies dans la gamme des fréquences reçues ou à des fréquences beaucoup plus basses que celles reçues. Les pertes auditives à des fréquences supérieures à l'octave centrée sur 8 kHz ne sont d'ailleurs pas mesurées dans les tests d'audiométrie [7].

Effets temporaires

Des observations de pertes d'audition temporaires à des fréquences inférieures aux fréquences ultrasonores ont été rapportées, à la suite d'une exposition à des ultrasons transmis dans l'air à des niveaux de pression élevés [33]. Par exemple, des réductions temporaires de la sensibilité auditive à des fréquences de 4, 10, 14 et 15 kHz ont été observées sur des sujets soumis à des ultrasons, pour une exposition à des niveaux de 120 dB(Lin) et une fréquence ultrasonore de 20,6 kHz. Aucun effet important n'a été remarqué, lors de la même expérience, si les niveaux sont de 100 dB(Lin).

Ces niveaux et ces fréquences ultrasonores sont proches de ceux habituellement émis par les appareils de soudage ou de nettoyage (90 à 130 dB(Lin) ; 15 – 40 kHz) [38].

Effets permanents

On ne possède pas de preuves que l'exposition à des ultrasons seuls, de niveaux inférieurs à 120 dB, pour des fréquences supérieures à 20 kHz, peut entraîner des pertes d'audition. De nombreuses études et expérimentations effectuées dès les années 60 et rapportées dans [33, 35] font observer toutefois des pertes d'audition permanentes dans des populations de travailleurs soumis quelques années à des ultrasons. Ces

pertes d'audition sont plutôt observées en dehors de la plage audiométrique, pour des fréquences de 10 à 15 kHz. La presbycusis naturelle et les éventuelles expositions multiples (bruits audibles, solvants), font que les interprétations de ces pertes d'audition sont quelquefois discutées.

Limites d'exposition

Les études sur les effets des ultrasons sur l'audition ont conduit à des interprétations légèrement différentes. Cependant, plusieurs pays sont arrivés à des recommandations similaires pour l'exposition des travailleurs aux fréquences audibles supérieures et aux ultrasons, dans le domaine des fréquences couramment rencontrées en milieu industriel (15 - 50 kHz).

Le *Tableau III* résume ces différentes recommandations tirées de [33, 35, 36].

Ces données sont à interpréter de la manière suivante :

- dans chaque tiers d'octave, la valeur limite doit être respectée,
- les valeurs limites sont celles d'une exposition pendant 8 heures à des bruits haute-fréquence ou ultrasonores continus. Dans le cas de bruits impulsionnels (soudage), l'exposition équivalente est calculée par une moyenne temporelle.

Si l'exposition journalière est plus courte que 8 heures, les valeurs limites peuvent être relevées selon les principes d'énergie équivalente reçue.

Le Bureau International du Travail (1977) permet une augmentation de ces limites d'exposition :

- de + 6 dB (pour 1 à 4 heures d'exposition),
- de + 12 dB (pour 15 minutes à 1 heure),
- de + 18 dB (pour 5 à 15 minutes),
- de + 24 dB (pour 1 à 5 minutes).

Une proposition plus prudente de l'International Non-Ionizing Radiation Committee (INIRC, 1984) et reprise par Damongoet [36] préconise une augmentation de ces limites d'exposition :

- de + 3 dB (pour 2 à 4 heures d'exposition),
- de + 6 dB (pour 1 à 2 heures),
- de + 9 dB (pour moins d'une heure).

L'actualisation de la bibliographie ne remet pas en cause les limites

TABLEAU III

Limites d'exposition professionnelle exprimées en niveaux de pression acoustique dB(Lin) pour différents pays ou auteurs

Occupational exposure limits expressed as acoustic pressure levels dB(Lin) for different countries or authors

Tiers d'octave centré à la fréquence (kHz)	Pression acoustique en dB(Lin)							
	1 ^(*)	2 ^(*)	3 ^(*)	4 ^(*)	5 ^(*)	6 ^(*)	7 ^(*)	8 ^(*)
8	90	75	-	-	-	-	-	-
10	90	75	-	-	80	-	-	75
12,5	90	75	75	-	80	-	-	75
16	90	75	85	-	80	-	75	75
20	110	110	110	105	105	75	75	75
25	110	110	110	110	110	110	110	110
31,5	110	110	110	115	115	110	110	110
40	110	110	110	115	115	110	110	110
50	110	-	110	115	115	110	110	110

[*] 1 : Japon [1971]. 2 : Acton [1975]. 3 : URSS [1975]. 4 : Suède [1978].

5 : American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH 1989).

6 : Association Internationale de Radioprotection (AIRP 1984).

7 : Canada [1991]. 8 : France [1985].

TABLEAU IV

Valeurs limites proposées pour l'exposition aux ultrasons aériens

Proposed limit values for exposure to airborne ultrasound

Fréquence centrale du tiers d'octave en kHz	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50
Valeurs limites en dB(Lin) pour 8 heures d'exposition	75	75	75	75	75	110	110	110	110
Durée d'exposition	Entre 2 et 4 heures		Entre 1 et 2 heures			Moins de 1 heure			
Augmentation possible de la valeur limite	+3 dB		+6 dB			+9 dB			

d'exposition proposées par Damongeot en 1985, pour la zone qu'il appelle « zone de présomption de danger ».

Il est finalement recommandé de limiter l'exposition des travailleurs aux bruits audibles de haute fréquence (8 - 20 kHz) et aux ultrasons de basse fréquence (20 - 50 kHz) aux valeurs données dans le *Tableau IV* (par tiers d'octave et pour 8 heures d'exposition à des bruits continus). Dans le cas d'une exposition plus courte que 8 heures, une tolérance comme celle préconisée par l'INIRC peut être envisagée.

MESURAGE – MOYENS DE PRÉVENTION

Le mesurage de l'exposition aux ultrasons doit s'effectuer à l'aide d'un appareillage ayant une bande passante

suffisante. En particulier, l'emploi d'un sonomètre utilisant la pondération A est à proscrire, puisque tous les niveaux discutés précédemment sont en dB linéaires. L'analyse doit s'effectuer en tiers d'octave afin de comparer les spectres aux valeurs limites préconisées ci-dessus. Le microphone associé au sonomètre ou à la chaîne de mesure doit avoir une bande passante suffisamment large, sa réponse en fréquence doit être connue pour corriger éventuellement les niveaux reçus aux fréquences les plus hautes.

Comme on l'a vu, la directivité des sources ultrasonores peut être importante. On pourra multiplier les points de mesure et changer l'orientation du capteur, afin de se prévenir d'une sous-évaluation de la nuisance. L'enregistrement du signal temporel sur un système d'acquisition compatible en fréquence et

relié à un micro-ordinateur permet de vérifier la stabilité des émissions ou de connaître les séquences d'impulsion dans le cas du soudage.

Les moyens de prévention agissant à la source sont :

- le choix d'appareils utilisant des fréquences les plus hautes possibles, au regard de l'efficacité du processus de fabrication,

- un bon accord d'impédance entre l'émetteur proprement dit et la sonotrode, dans le cas du soudage, afin que l'énergie vibratoire soit plutôt émise vers la pièce à souder.

Les moyens de prévention par isolement les plus efficaces sont le capotage ou l'encoffrement partiel ou complet des machines bruyantes ou leur isolement dans une pièce séparée. Les ultrasons sont très vite atténués par des parois même par celles qui ont un faible isolement acoustique aux fréquences audibles. Par exemple, une plaque de plexiglas de 4 mm d'épaisseur atténue d'environ 40 dB à 25 kHz. Par contre, les fuites par des ouvertures des capotages ou des écrans sont, à ces fréquences, des problèmes très critiques. Par exemple, une petite ouverture dans un écran provoquera, par diffraction, une source secondaire d'ultrasons importante qui pourra rendre l'écran de départ complètement inefficace.

Les mesures d'éloignement des travailleurs des machines à ultrasons sont également efficaces, les niveaux ultrasonores décroissant assez rapidement dans l'air.

En dernier lieu, les équipements de protection individuelle (serre-tête anti-bruit, bouchons d'oreille), permettent généralement une isolation au moins aussi bonne que celle notifiée pour les fréquences audibles les plus hautes (8 kHz) [31].

CAS PARTICULIER DE LA FEMME ENCEINTE

Le cas particulier de la femme enceinte travaillant sur un appareil générant des ultrasons de puissance doit être examiné à part. Des études ont montré que l'isolation phonique apportée par la paroi abdominale de la mère était de l'ordre de 25 dB aux fréquences de la parole. Même si cette isolation peut être plus importante aux fréquences des

ultrasons, le fœtus est exposé ce qui pourrait être plus préjudiciable pendant le dernier trimestre de grossesse. Un équipement de protection individuelle de la mère (bouchons d'oreille) ne prévient évidemment pas l'exposition du fœtus. Une étude épidémiologique a mis en évidence des pertes auditives chez des enfants dont les mères travaillaient dans des ambiances bruyantes pendant

la grossesse [39]. Des études indiquent une légère augmentation du risque de prématurité et de retard de croissance intra-utérin voire de fausse couche précoce [40, 41]. La Communauté Européenne signale ces dangers éventuels dans une communication sur les lignes directrices de l'application de la Directive 92/85/CEE concernant les femmes enceintes [42].

Dans le cas de la travailleuse enceinte, les mesures de prévention habituelles doivent être prises pour réduire au mieux l'exposition aux ultrasons :

- isolement des générateurs (encoffrement, capotage, cabine, écrans, etc.),
- éloignement ou rotation du personnel,
- port d'équipements de protection individuelle.

Reçu le : 07/10/2005

Accepté le : 06/04/2006

BIBLIOGRAPHIE

Générale

[1] Code du Travail. Article R232-8. République Française.

[2] Directive 2003/10/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 février 2003 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (bruit).

[3] Norme NF S31-084 Octobre 2002. Acoustique - Méthode de mesurage des niveaux d'exposition au bruit en milieu de travail.

[4] Norme ISO 7196 :1995 - Acoustique. Pondération fréquentielle pour le mesurage des infrasons. Mars 1995.

[5] Norme NF S30-101 Septembre 1973 Vocabulaire de l'acoustique - Définitions générales.

[6] VERCAMMEN M.L.S. - Setting limits to Low Frequency Noise. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1989, 8, 4, pp. 105-109.

[7] Norme NF EN 26189 Février 1992. Acoustique - Audiométrie liminaire tonale en conduction aérienne pour les besoins de la préservation de l'ouïe.

[31] BERGER E.H. - Protection for Infrasonic and Ultrasonic Noise Exposure. Monographie Technique disponible sur l'Internet <http://www.e-a-r.com>. 2 pages.

Infrasons

[8] IWAHASHI K. AND OCHIAI H. - Infrasound Pressure Meter and Examples of Measuring Data. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2001, 20, 1, pp. 15-19.

[9] PAWLACZYK-LUSZCZYNSKA M. - Occupational Exposure to infrasonic noise in Poland. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1998, 17, 2, pp. 71-83.

[10] British Wind Energy Association. Low Frequency Noise and Wind Turbines. Technical Annex. February 2005. 10 pages. <http://www.bwea.com/pdf/lfn-annex.pdf>

[11] VINOKUR R. - Acoustic Noise as a Non-Lethal Weapon. Sound and Vibration. October 2004. p. 19-23.

[12] MØLLER H. et PEDERSEN C.S. - Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. Noise and Health, 2004, 6, 23, pp. 37-57.

[13] ISO 226:2003 Août 2003 - Acoustique - Lignes isosoniques normales.

[14] LANDSTRÖM U. - Laboratory and Field studies on infrasound and its effects on Humans. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1987, 6, 1, pp 29-33.

[15] Norme NF EN 61672-1 Juin 2003 - Électroacoustique - Sonomètres - Partie 1 : spécifications

[16] GUEST H. - Inadequate standards currently applied by local authorities to determine statutory nuisance from LF and infrasound, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 1 March 2003, 22, 1, pp. 1-7.

[17] CAMPO P. et DAMONGEOT A. - La pondération « A » est-elle un indicateur pertinent de la nocivité des bruits basse fréquence ? Étude bibliographique. Cahiers de Notes Documentaires n°144, 3^{ème} trimestre 1991, pp. 485-492.

[18] LUNDQUIST P., HOLMBERG K. et LANDSTRÖM U. - Low Frequency Noise and Annoyance in Classroom, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2000, 19, 4, pp. 175-182.

[19] World Health Organization. Environmental Health Criteria 12 - Noise Infrasound. Brief Review of Toxicological Literature. November 2001. 51 pages. http://ntp-server.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/Chem_Background/ExSumPdf/Infrasound.pdf

[20] Department for Environment, Food and Rural Affairs (Royaume-Uni). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. Report for Defra by Dr Geoff Leventhall Assisted by Dr Peter Pelmar and Dr Stephen Benton. 2003. 88 pages. <http://www.defra.gov.uk/environment/noise/lowfrequency/pdf/lowfreqnoise.pdf>

[21] HUANG QIBAY C.Y. and SHI H. - An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. March 2004. 23(1). p. 71-76.

[22] LANDSTRÖM U., LANDSTRÖM R. et BYSTRÖM M. - Exposure to infrasound - Perception and changes in wakefulness. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1983, 2, 1, pp. 1-11.

[23] GAVREAU V., CONDAT R. et SAUL H. - Infra-sons : Générateurs, Détecteurs, Propriétés Physiques, Effets Biologiques. *Acustica*. 1966. 17(1) p. 1-10.

[24] HANEKE K.E. et al. - Infrasound : brief review of toxicological literature. Integrated Laboratory Systems Inc. Rapport préparé pour le National Institute of Environmental Health Sciences (USA). Novembre 2001. 51 pages.

[25] PAWLACZYK-LUSZCZYNSKA M., KACZMARSKATA-KOZLOWSKA A., AUGUSTYNSKA D., et KAMEDULA M. - Proposal of New Limit Values for Occupational Exposure to Infrasonic Noise in Poland. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2000, 19, 4, pp. 183-193.

[26] JAKOBSEN J. - Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1 September 2001, (20)3, p. 141-148.

[27] Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit. EKAS. <http://www.ekas.ch>. Recueil systématique du droit fédéral - RS 832.30 Ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles - Titre 1 Prescriptions sur la prévention des accidents et maladies professionnels (sécurité au travail) - Chapitre 3 Exigences de sécurité - Section 3 Milieu de travail - Art. 34 Bruit et vibrations (2002).

[28] HEE G., BARBARA J.J., et GROS P. - Valeurs limites d'exposition aux agents physiques en ambiance de travail. *Cahiers de Notes Documentaires n°148*, 3^{ème} trimestre 1992. Mise à jour mai 1993. Référence INRS : ND 1886-148-92, p. 297-318.

[29] PIMONOW L. - Les bruits. Étude documentaire relative aux effets des vibrations acoustiques sur l'organisme. Secrétariat général de l'aviation civile. 1972.

[30] KACZMARSKA A. et AUGUSTYNSKA D. - Study of sound insulation of control cabins in industry in the low frequency range. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 1992, 11, 2, pp. 42-46.

Ultrasons

[32] BAAS H.E. and SHIELDS F.D. - Absorption of sound in air : High-frequency measurements. *Journal of Acoustical Society of America*. Sept. 1977. 62(3) p. 571-576.

[33] Principes d'utilisation des ultrasons : partie II – applications industrielles et commerciales. Rapport DHM-RT-158 publié par la Direction de l'hygiène du milieu. Direction générale de la protection de la santé (Canada). 1991. 44 pages.

[34] ARBEILLE P., HERAULT S. - Généralités sur les mécanismes physiques des effets biologiques des ultrasons. *Journal d'échographie et de médecine ultra-sonore*. 1997, vol. 18, no 5, pp. 306 - 314

[35] Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency. Rapport préparé par l'Institute of Sound and Vibration Research (Royaume-Uni) pour le compte du Health and Safety Executive. 2001. 77 pages.

[36] DAMONGEOT A. et ANDRE G. - Limites d'exposition aux sons aigus (8 à 16 kHz) et aux ultrasons de basse fréquence (1 à 100 kHz). *Revue bibliographique et interprétation. Cahiers de Notes Documentaires*. N°120. 1985. Référence INRS : ND 1537-120-85, p. 317-324.

[37] CAMPO P., LATAYE R. - Toluene-induced hearing loss : a mid-frequency location of the cochlear lesions. *Neurotox. And Teratol*. 19 (2), 129-140. 1997

[38] ANDRE G. et DAMONGEOT A. - Émissions sonores et ultrasonores lors du soudage par ultrasons. *Cahiers de Notes Documentaires*. N°123. 1986. p. 151-166.

[39] LALANDE NM, HETU R, LAMBERT J. - Is occupational noise exposure during pregnancy a risk factor of damage to the auditory system of the fetus? *Am J Ind Med*. 1986;10(4):427-35.

[40] NURMINEN T. - Female noise exposure, shift work, and reproduction. *J. Occup. Environ. Med*. 1995 August. 37(8):945-50. Review.

[41] BREZINKA C, LECHNER T, STEPHAN K. - The fetus and noise, *Gynakol Geburtshilfliche Rundsch*. 1997 ; 37(3):119-29.

[42] Commission des Communautés Européennes. Communication de la Commission sur les lignes directrices concernant l'évaluation des agents chimiques, physiques et biologiques ainsi que des procédés industriels considéré comme comportant un risque pour la sécurité ou la santé des travailleuses enceintes, accouchées ou allaitantes (Directive 92/85/CEE). Bruxelles le 20.11.2000. COM(2000) 466 final/2. Page 20.