



Techniques de réduction du bruit en entreprise

Quelles solutions, comment choisir

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAMTS, les CRAM-CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, CHSCT, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressants l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, site Internet... Les publications de l'INRS sont distribuées par les CRAM. Pour les obtenir, adressez-vous au service prévention de la Caisse régionale ou de la Caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAMTS et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

Les Caisses régionales d'assurance maladie (CRAM) et Caisses générales de sécurité sociale (CGSS)

Les Caisses régionales d'assurance maladie et les Caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service prévention composé d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ils sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, CHSCT, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite.

Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle).

La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de deux ans et d'une amende de 150 000 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2006. Conception graphique et réalisation Catherine Picard. Illustrations Brigitte Laude.

Techniques de réduction du bruit en entreprise

Quelles solutions, comment choisir

Pierre Canetto

En collaboration avec les Centres de mesures physiques
des CRAM Auvergne, Bretagne, Centre, Ile-de-France,
Languedoc-Roussillon et Nord-Est

Sommaire

Avant-propos	5
Partie 1. Aspect physique : génération, propagation et réception du bruit	7
Introduction	9
1. Du bruit émis au bruit reçu	10
1.1. Émission, propagation, réception	10
1.2. Bruit aérien, bruit solidien	12
1.3. Source primaire, source apparente	13
1.4. Qualification du bruit : fréquence et décibel	15
2. Génération du bruit	19
2.1. Source aérienne	19
2.2. Source solidienne	19
2.3. Source liquidienne	22
3. Propagation du bruit	23
3.1. Propagation aérienne	23
3.2. Influence du local	24
3.3. Isolation et absorption	26
3.4. Propagation solidienne	27
4. Réception et exposition	28
Bruit au travail : du « chemin du bruit » à la « carte des solutions »	31
Partie 2. Les actions de réduction du bruit en entreprise	33
1. Une classification des actions de réduction du bruit	35
2. Les actions amont	37
2.1. Réparation et/ou remplacement de source	37
2.2. Modification de procédé	38
2.3. Aménagement des locaux et/ou de l'organisation du travail	39
3. Les actions sur les sources fluides	40
3.1. Actions sur l'écoulement primaire	40
3.2. Les silencieux	42
3.3. Contrôle actif	44
3.4. Cas de la cavitation	45
4. Les actions sur les sources solidiennes	46
4.1. Actions sur la force	46
4.2. Actions sur la structure	48

5. Les actions sur la propagation aérienne	50
5.1. Isolation (aux bruits aériens)	50
5.2. Obstacles : écrans	53
5.3. Absorption du local	54
5.4. Cas des silencieux	56
6. Les actions sur la propagation solidienne	57
7. Les actions sur la réception	59
7.1. Cabines	59
7.2. Protecteurs individuels contre le bruit (PICB)	60
Partie 3. Méthodologie. Choix des solutions	63
Introduction	65
1. Diagnostic et préanalyse	66
1.1. Conditions d'activité de l'entreprise	66
1.2. Évaluation des expositions	66
1.3. Qualification du local	67
1.4. Identification des sources de bruit	68
1.5. Croisement sources/récepteurs	69
1.6. Résultats de la préanalyse	70
2. Choix des actions de réduction du bruit	72
2.1. Les actions amont et à la source : des solutions génériques	72
2.2. Les actions liées à la réception	74
2.3. Les actions liées au type de propagation	75
2.4. Une synthèse	80
Partie 4. Compléments et développements techniques	81
Introduction	83
1. Notions physiques générales d'acoustique	84
1.1. Pression acoustique, signal temporel	84
1.2. Puissance acoustique	86
1.3. Célérité, longueur d'onde	87
1.4. Exposition	89
1.5. Analyse spectrale. Octaves	90
1.6. Critères spectraux de gêne	92
1.7. Vibrations	93
1.8. Rayonnement	97
2. Compléments techniques sur les performances des solutions	99
2.1. Caractérisation acoustique de local	99
2.2. Isolation aux bruits aériens	101
3. Méthodes de mesure et d'analyse	104
3.1. Méthodes d'expertise de mesure acoustique	104
3.2. Le diagnostic vibratoire de machines	107
4. Méthodes de simulation acoustique des locaux	108
Annexes	111
Glossaire	113
Liste des institutions et organismes	122

Avant-propos

À qui est destiné ce guide ?

L'industriel confronté à un problème de bruit dispose de nombreuses références. Cependant, il est rarement spécialiste, a peu de temps et a besoin d'être guidé.

À l'abondance de littérature s'ajoute la multiplicité des interlocuteurs susceptibles de traiter un problème de bruit : les interlocuteurs avertis (bureaux d'étude, organismes de contrôle, fournisseurs de matériaux...) mais aussi les intervenants, pas forcément spécialistes du domaine, qui vont cependant agir pour le traiter : ingénieries ou bureaux des méthodes, fournisseurs d'équipements, assembleurs, services maintenance, travaux neufs, acteurs du bâtiment ou de la mécanique...

Il s'ensuit des avis divers puisque fondés sur des points de vue différents. Ils sont pertinents, parfois divergents et, en tout état de cause, il est difficile pour l'industriel concerné par le problème de choisir la « bonne solution ».

À ceci s'ajoutent les difficultés amenées, paradoxalement, par le fait que le bruit est une préoccupation largement répandue dans le public. Les discours sur le bruit sont communs et leur diffusion, par un public non spécialiste, véhicule de nombreuses ambiguïtés, voire des idées fausses sur certaines notions :

- confusions (entre isolation et correction, raideur et amortissement...);
- a priori sur des solutions (efficacité d'un traitement de local...);
- impasses (sur les fuites, les transmissions vibratoires...).

Dans ce contexte, il nous est apparu souhaitable d'éditer un guide qui réponde aux besoins suivants :

- proposer une **vision technique d'ensemble** du problème du bruit dans l'entreprise. Par rapport à ce choix, la partie traitant de la **génération du bruit par les machines** a été plus particulièrement développée : il s'agit d'équilibrer la pratique acoustique actuelle qui privilégie en général le traitement des locaux et l'exposition des opérateurs ;
- présenter de manière structurée et cohérente les différents phénomènes physiques en jeu, depuis la génération du bruit jusqu'à sa propagation et sa réception ;
- s'appuyer sur cette présentation pour proposer une **méthodologie d'analyse** d'un problème de bruit, permettant une orientation vers une solution privilégiée.

Ce guide s'adresse à des industriels non spécialistes en acoustique, mais désireux d'améliorer les expositions sonores des employés. L'ambition est de leur donner des éléments pour choisir les solutions à mettre en œuvre, soit pour effectuer l'analyse eux-mêmes et les orienter vers un fournisseur adapté, soit pour avoir des éléments de discussion avec leurs fournisseurs de solution (vendeurs de matériaux ou consultants).

Afin de faciliter son utilisation, ce document a été structuré en quatre parties distinctes, les plus indépendantes possible :

- la **première partie** présente le problème : quelles sont les différentes natures du bruit, comment est-il généré ; de quelles différentes manières le bruit est-il transmis ; comment ces différents bruits reçus se combinent en une exposition globale ;
- la **deuxième partie** présente les différents principes des actions de réduction du bruit : quelles sont ces solutions, sur quels principes physiques reposent-elles, quelles sont leurs applications ; des exemples pratiques sont donnés en illustration ;
- la **troisième partie** propose une démarche à suivre pour orienter le lecteur vers les solutions les plus adaptées à son problème. Cette démarche n'est pas universelle ni idéale ; elle est une aide pratique qui recherche le compromis entre rigueur et pragmatisme ;
- enfin, des compléments sur les principales bases techniques de l'acoustique et sur les caractéristiques de certaines solutions sont donnés en **partie 4**.

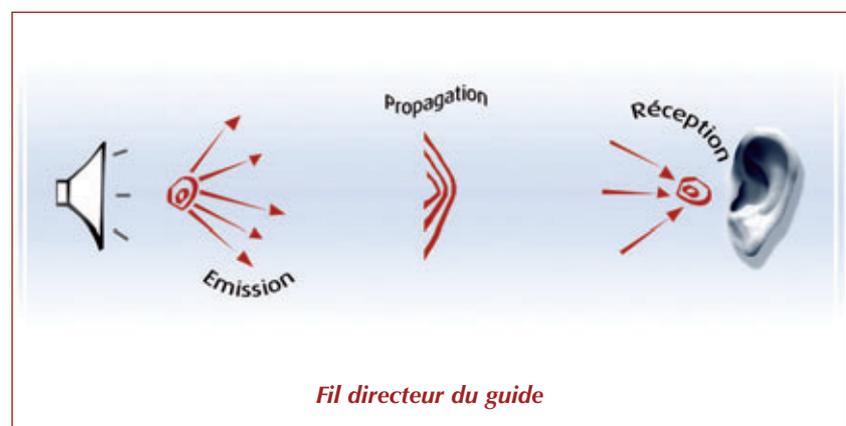
Lecture du guide : ce qu'il faut savoir

Pour le lecteur qui le désire, des éléments complémentaires et une compréhension plus poussée du sujet traité lui sont donnés ; ils sont identifiés par cette typographie.

Les méthodes alternatives préconisées dans la partie 3 sont repérées par le signe ✓.

Elles visent à déterminer les éléments techniques nécessaires au passage de l'étape considérée et se veulent un compromis entre la facilité de mise en œuvre et la fiabilité du résultat attendu. Elles peuvent :

- sans nécessiter des compétences techniques et des moyens très importants, permettre néanmoins d'augmenter la fiabilité du résultat ;
- être plus facilement applicables en fonction du contexte du problème ; si elles sont moins fiables, ceci est indiqué.





1

**Aspect physique :
génération,
propagation
et réception
du bruit**

Introduction

Pourquoi réduire le bruit ? Quels objectifs de niveau ?

La réduction du bruit est une préoccupation sociale à laquelle la grande majorité des individus est sensibilisée dans la vie quotidienne (voisinage, environnement). Le contexte pris en compte ici est le milieu du travail, qui semble paradoxalement moins toucher le public, alors que les atteintes de l'audition, générées par l'exposition sonore au travail, restent encore aujourd'hui une des causes principales de maladie professionnelle.

Ce fait justifie en lui-même le souci de réduire le bruit en entreprise : une surdité n'est pas qu'une maladie banale, c'est une déficience irréversible qui affectera l'individu pour le restant de sa vie. Les implications professionnelles sont nombreuses : difficulté d'adaptation à un poste de travail, difficulté de perception de messages, et donc effet sur la productivité... Mais elles sont encore négligeables par rapport aux conséquences humaines : qui peut évaluer l'impact social d'une communication difficile ?

Cet aspect concerne les expositions sonores élevées, qui sont prises en compte par les seuils réglementaires de protection des travailleurs. Cependant, un niveau sonore très inférieur à ces seuils peut affecter l'activité professionnelle, en fonction du type d'activité de l'opérateur : on sait que le bruit est un facteur important de stress et qu'il est préjudiciable à la concentration intellectuelle. Il a donc également un impact important dans certains secteurs d'activité, en terme professionnel (rendement) et humain (stress) : on voit ainsi la sensibilisation à l'exposition sonore pénétrer des secteurs jusqu'ici peu pris en compte, tel le tertiaire.

À ces considérations est reliée la notion de seuil d'exposition. Ce « niveau limite » est au cœur de toute démarche technique de réduction du bruit. Cependant, ce sujet nécessite en lui-même de longs développements, il n'est donc pas détaillé ici. On peut se référer dans un premier temps aux seuils d'action réglementaires, mais aussi à des seuils de « confort » déclinés en fonction de l'activité intellectuelle. Ces critères sont disponibles auprès des services de prévention ou des organismes de santé et sécurité au travail.

L'acoustique reste néanmoins un domaine physique général : aussi, bien que cette brochure soit orientée vers des préoccupations de réduction du bruit en entreprise, les principes présentés demeurent dans la grande majorité des cas valables, quel que soit le niveau d'exposition rencontré, et quelle que soit l'application concernée.

1. Du bruit émis au bruit reçu

1.1. Émission, propagation, réception

« Entendre un bruit » paraît immédiat : en réalité, le processus suivi par ce bruit se décompose en trois étapes :

- à l'origine, le bruit est émis par une source : un équipement, une personne, un phénomène quelconque l'a généré ;
- il se propage ensuite jusqu'à l'endroit où on l'entend, via un chemin plus ou moins complexe constitué éventuellement de réflexions diverses ;
- en cet endroit, il est capté par un récepteur qui peut être un appareil de mesure, une oreille humaine...

Il est ensuite traité et interprété, selon le cas, électroniquement ou par le cerveau. Cette « perception » du bruit est, en ce qui concerne l'être humain, du domaine de la psychoacoustique. Notre propos s'arrête là... à l'entrée de l'oreille, qui ne sera prise en compte globalement que par le choix d'une unité de mesure.

Analyser un bruit reçu nécessite de prendre en compte ces trois étapes que sont l'émission, la propagation et la réception (*figure 1*).

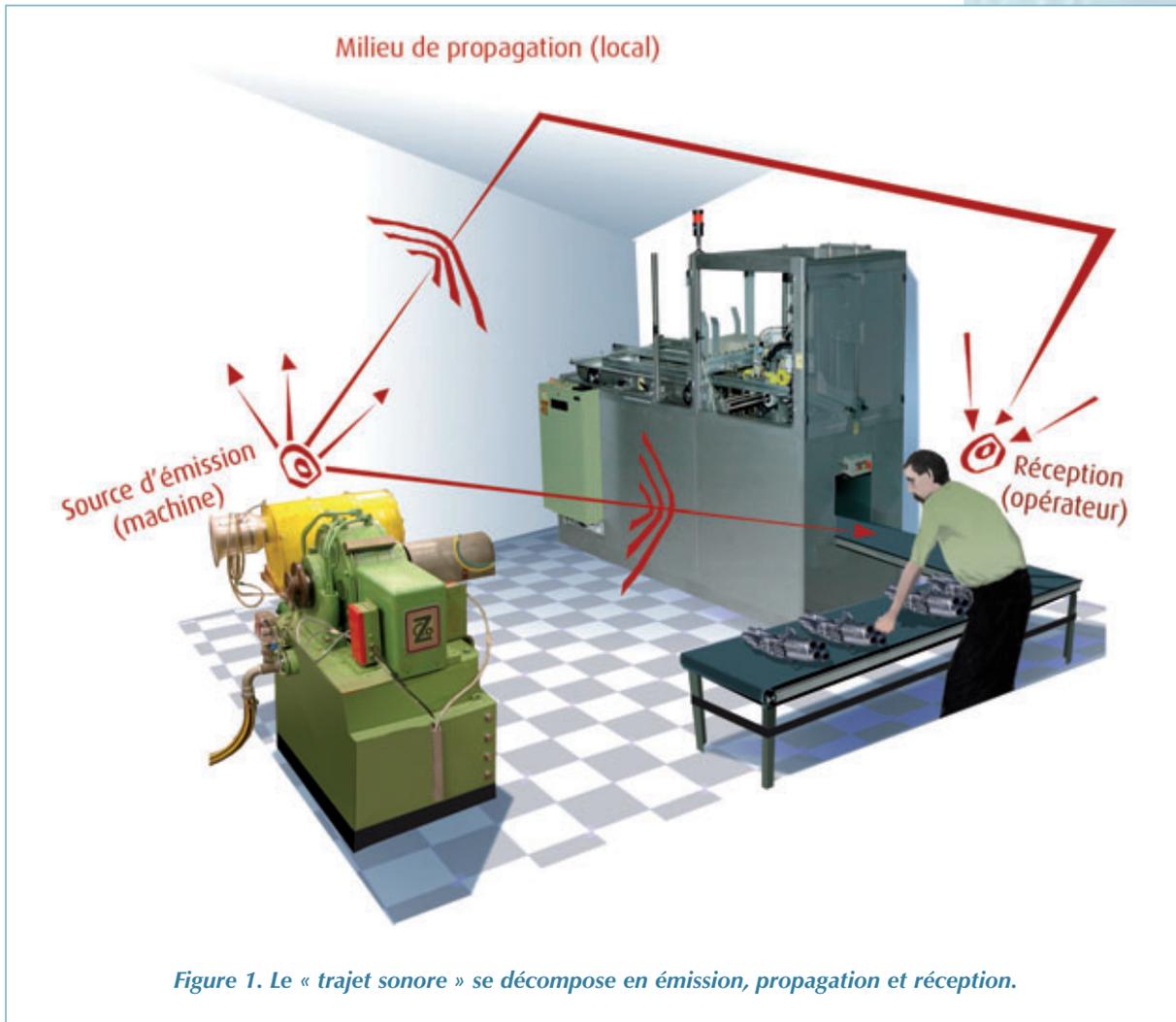
À chacune de ces étapes, différents phénomènes interviennent qui déterminent ce qui sera perçu par l'opérateur ; c'est également à chacune de ces étapes que pourront être entreprises des solutions de réduction du bruit. C'est donc ce schéma qui servira de ligne directrice à ce guide.

L'application au milieu du travail se décline ainsi :

- l'émission provient de sources très variées : machines fixes ou mobiles, outils, installations diverses (distribution de liquide ou de gaz, manipulation et convoyage de pièces...) ;
- la propagation s'effectue parfois en plein air, mais en général en milieu confiné, celui-ci étant a priori un local dont les parois et l'encombrement affectent la propagation ;
- le récepteur est une personne exposée (que l'on appellera un employé, un salarié, un opérateur, un travailleur...). Sa réception peut être modifiée par la présence de protections éventuelles.

Nous verrons également qu'il faut prendre en compte différents paramètres pour établir son exposition, c'est-à-dire la « dose » de bruit reçue pendant sa période de travail. L'exposition est la principale valeur de référence utilisée dans la réglementation sur la protection des travailleurs contre le bruit.

Le bruit se manifeste par une variation de pression du milieu ambiant (l'air, en général). Il se propage sous la forme d'ondes qui, à l'image de vagues dans un milieu liquide, retracent le parcours de cette variation de pression. La vitesse de cette propagation (vitesse des vagues) est appelée célérité : cette appellation spécifique permet de dissocier une propagation d'onde d'un déplacement de matière : en effet, si la vague avance, les particules d'eau restent à la même place, comme l'indique le bouchon de la ligne du pêcheur.



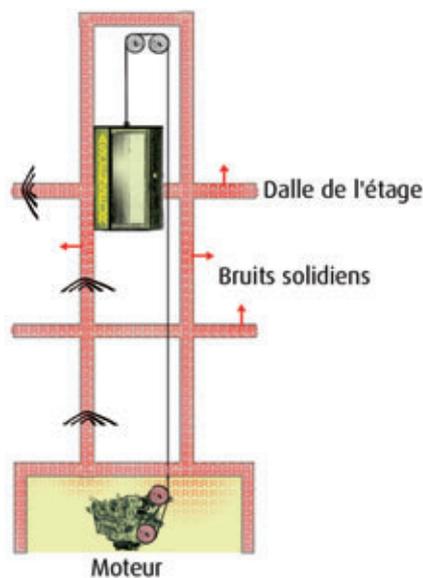
1.2. Bruit aérien, bruit solide

Source aérienne :
le bruit est directement
généralisé dans l'air.

Source solide :
le bruit est généré par
un contact entre
des pièces solides.



La propagation aérienne se fait dans l'air.



La propagation solide se fait par le sol et les parois.

Figure 2. Bruit aérien et bruit solide.

Si tous les bruits suivent le processus « émission/propagation/réception », on peut néanmoins les distinguer selon plusieurs types, liés à la nature des éléments qui en sont à l'origine ou qui les véhiculent (figure 2).

Ainsi, une source dite « aérienne » génère directement le bruit, c'est-à-dire une variation de la pression de l'air dans l'air ambiant : c'est le cas des instruments de musique à vent, des sirènes, des détonations...

La propagation de ce bruit est également aérienne dès lors qu'elle se réalise également dans l'air ambiant.

Il est à noter que, les règles physiques d'acoustique étant analogues dans tous les milieux gazeux, on parle par extension de bruits aériens pour tous ceux-ci.

Pendant, un bruit peut être généré indirectement à partir du contact entre deux pièces solides : engrenage, contact roue/rail, choc entre deux pièces... Le système est « excité » par ce contact et il réagit. La variation de pression de l'air est une conséquence de ce contact et de la réaction qui en découle. On parle alors de source « solide ».

De même, si le bruit se transmet au sein d'une structure solide (rail, conduite, génie civil...), la propagation est dite solide.

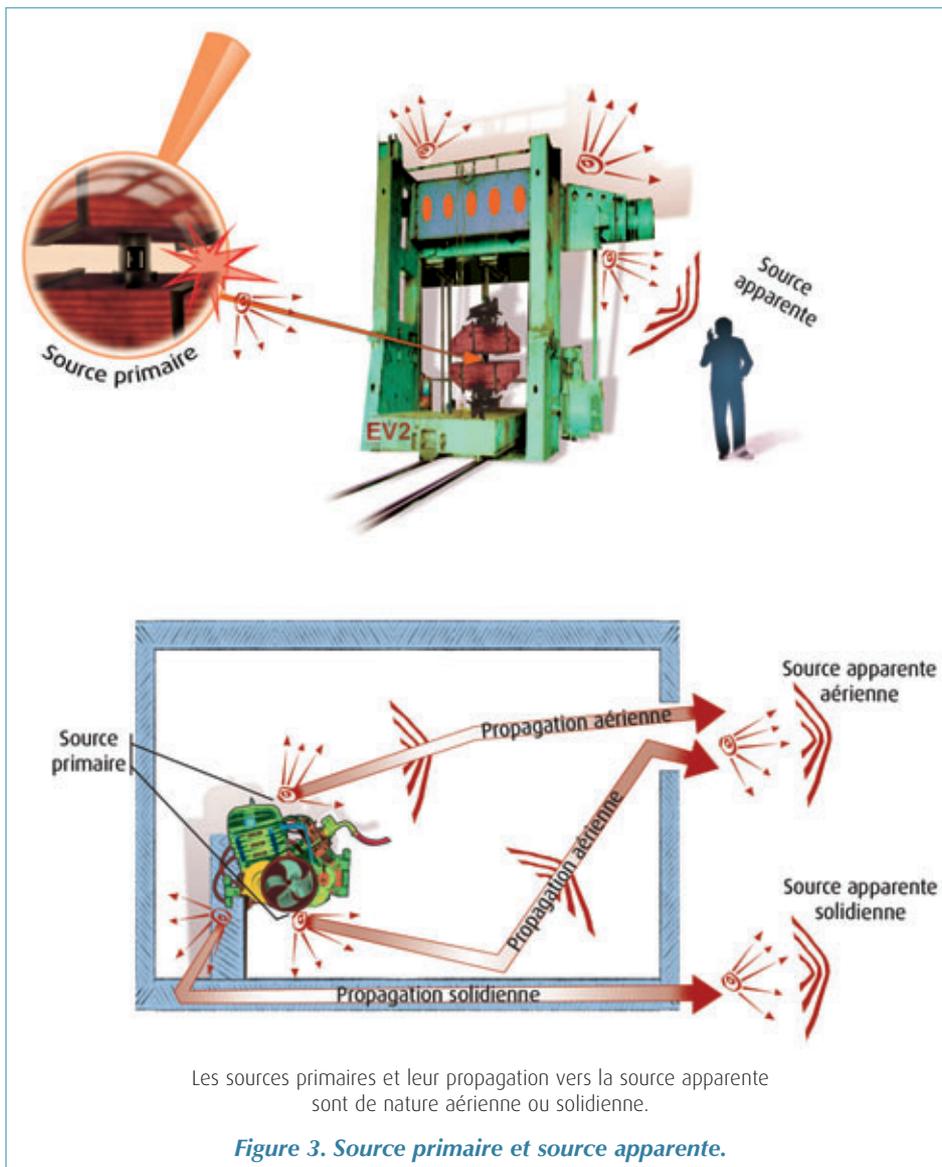
L'intérêt de cette distinction est que, pour chacun de ces types de source ou de propagation, les lois physiques et mathématiques sont différentes ; nous verrons aussi que les solutions de réduction du bruit sont différentes.

Le paramètre physique représentatif d'une source aérienne est une variation de pression directement générée dans le milieu gazeux ambiant. La propagation aérienne suit les lois liées à la propagation d'ondes sonores dans ce milieu ; elle a une célérité constante en fréquence pour un gaz et des conditions de température constantes.

L'excitation d'origine d'une source solide est pour sa part représentée par une force (fluctuant dans le temps) : le premier processus physique est la transformation de cette force en vibrations, puis de celles-ci en variation de pression. La propagation solide fait intervenir des lois spécifiques, avec différents types d'ondes et une célérité qui, selon le cas, varie avec la fréquence.

- Le milieu liquide induit également des spécificités ; il se ramène cependant à des règles solidiennes et aériennes. Il est traité au § 2.3 Génération du bruit.

1.3. Source primaire, source apparente (figure 3)



La décomposition en « source, propagation et réception » n'est pas si simple, et elle nécessite de bien définir ce qu'est une source. En effet, pour le travailleur exposé par exemple, la source est l'équipement qui fait du bruit. En revanche, pour le concepteur de cet équipement, la source est le mécanisme interne qui va faire que l'équipement fait du bruit. Qu'en est-il ?

Une réponse générale est apportée en décrivant la chaîne globale de génération du bruit de la manière suivante :

- ② la source primaire est la toute première excitation, la source « originale » :
 - elle est solidoienne, dès lors qu'elle se manifeste sous forme de force : c'est le cas des contacts entre pièces par exemple ;

- elle est aérienne, si elle se manifeste directement sous la forme de variation de pression : c'est par exemple le cas d'un échappement ;

🌀 la source primaire se propage, ou se transforme, au sein de l'équipement :

- cette propagation est solidienne si cette propagation se fait via les structures de l'équipement : arbres, paliers, carters...
- elle est aérienne si elle se fait via une cavité interne de l'équipement : volume interne d'un carter...

🌀 l'équipement devient alors lui-même une source de bruit : on l'appelle source apparente, pour bien noter qu'il y a bien déjà eu la chaîne « émission/propagation » à l'origine de son propre bruit. Cette source apparente génère :

- des bruits solidiens, par ses éléments de structure ; le paramètre générateur du bruit est alors la vibration. On peut dire que l'équipement a transformé ses forces internes en vibrations ;
- des bruits aériens, via ses ouvertures éventuelles ;

🌀 l'équipement est ainsi équivalent à un assemblage de sources apparentes solidiennes et aériennes, dont le bruit se propage vers l'opérateur.

Ce schéma général de génération du bruit présente plusieurs intérêts :

- garder les distinctions des natures aérienne et solidienne, dont on sait qu'elles se traitent différemment ;
- décomposer le problème en plusieurs étapes, pour le ramener à plusieurs problèmes simples, et ainsi mettre en évidence les différentes voies d'action dont on dispose ;
- mettre en évidence la source primaire, sur laquelle on travaille encore peu, et décliner les étapes spécifiques des passages de la force à la vibration, puis de la vibration au bruit ;
- mettre en évidence qu'une source apparente est constituée de plusieurs sources « élémentaires », solidiennes et aériennes ;
- décrire toute situation en une cascade de problèmes élémentaires du même type : émission/propagation/réception. Ainsi, si par exemple l'équipement est encoffré, l'encoffrement devient à son tour source apparente. Les actions peuvent donc concerner l'équipement, la propagation entre l'équipement et l'encoffrement, et l'encoffrement lui-même en tant que source – sur lequel on peut donc appliquer les méthodes d'investigation propres aux sources.

Pour les sources solidiennes, il subsiste donc une différence entre la source primaire, qui est une force, puis la source apparente, qui est la vibration qui en découle. Ce lien entre force et vibrations s'appelle transfert vibratoire et suit des lois physiques spécifiques. La transformation de la vibration en bruit est du domaine du rayonnement, dont les lois physiques sont différentes.

Par ailleurs, les propagations entre sources primaires et apparentes, puis entre la source apparente « finale » et l'opérateur, si elles suivent des principes analogues, présentent dans la pratique des différences dues au fait que le milieu de propagation final est le local, dont les dimensions sont importantes par rapport aux volumes des sources apparentes.

1.4. Qualification du bruit : fréquence et décibel

Le bruit perçu est une combinaison de plusieurs sons, d'origines diverses. Chacun de ces sons est représenté par deux paramètres : la fréquence, qui donne la « hauteur » du son et s'exprime en Hertz, et le niveau, qui quantifie son intensité et s'exprime en décibel (figure 4).

La fréquence permet de définir si un son est plus ou moins grave ou aigu. Le son correspond à une variation de pression de l'air : les particules d'air sont cycliquement comprimées puis relaxées (par exemple, sous l'effet de la membrane d'un tambour) et transmettent cette fluctuation aux particules voisines. La fréquence est le paramètre qui quantifie la cadence de cette fluctuation ; son unité est le Hertz (noté Hz), un Hertz correspondant à une fluctuation de pression par seconde.

Plus la fréquence est élevée, plus le nombre de fluctuations par secondes est grand, et plus le son est aigu (pour exemple, la corne de brume émet un son basse fréquence et le sifflet un son haute fréquence).

La quantification du niveau sonore obéit à des règles plus complexes : il s'agit de prendre en compte la perception de l'oreille humaine, par une mesure physique « neutre » associée à un moyen (loi mathématique) approprié. La prise en compte de l'appareil auditif humain repose sur plusieurs principes.

La capacité d'entendre un son

L'appareil auditif traduit les variations de pression de l'air qui parviennent au tympan. L'amplitude de ces variations de pression se mesure selon l'unité physique générale qui est le Pascal, noté Pa. La limite de perception humaine (niveau le plus bas que l'on peut entendre, d'un point de vue statistique bien sûr) correspond à une variation de pression de l'air de 0.00002 Pascal (Pa) : c'est à peu près le bruit d'un moustique à 3 mètres de distance... Les amplitudes mesurées seront comptées « à partir » de cette valeur.

La sensibilité au niveau du son

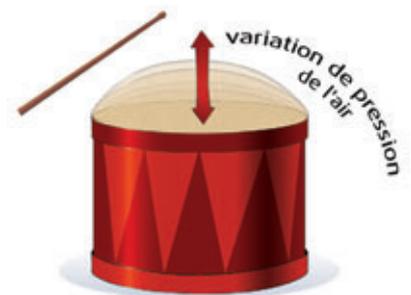
La sensation humaine est liée à la différence relative des phénomènes physiques reçus plutôt qu'à leur valeur absolue. C'est-à-dire que l'être humain perçoit la même différence entre 10 kg et 11 kg, et entre 100 et 110 kg, qui correspond à un même écart relatif de 10 %, alors que les écarts absolus sont respectivement 1 et 10 kg.

Mathématiquement, ceci se traduit par le fait que la sensibilité de l'homme par rapport à une stimulation augmente en proportion de la multiplication de celle-ci, et non pas en fonction de sa somme : dans la vie de tous les jours, lorsqu'on allume deux ampoules d'une même intensité, on n'a pas la sensation d'être deux fois plus éclairés. De même, le bruit émis par deux voitures ne sera pas perçu comme deux fois le bruit émis par une seule, mais comme « un peu plus » qu'une seule.

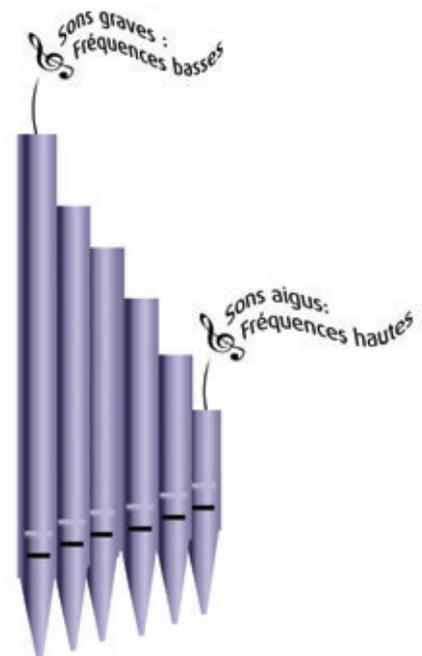
1 cycle
(un "aller retour")



La fréquence est un nombre de cycles par secondes.

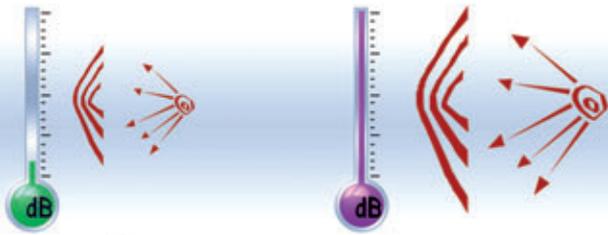


Pour le son, un cycle correspond à un « aller-retour » de la pression d'air.



La fréquence d'oscillation de la pression des particules d'air donne la « hauteur » du son.

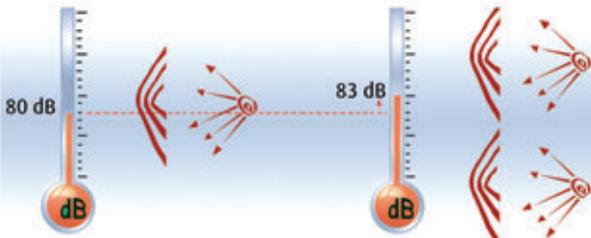
Figure 4. Fréquence et son.



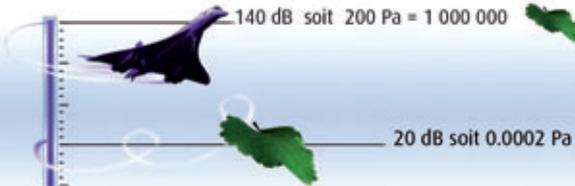
Le décibel (dB) quantifie l'intensité du son.



Le dB(A) prend en compte la perception de l'oreille humaine.



Le décibel compte de manière logarithmique : les niveaux ne s'additionnent pas simplement.



L'échelle logarithmique des décibels permet de mesurer des niveaux très différents.

Figure 5. Niveau sonore : le décibel.

Les amplitudes seront donc mesurées avec l'outil mathématique, qui permet de transformer une multiplication (celle des pressions acoustiques, en Pa) en une addition : c'est le logarithme (figure 5). Nous verrons que, par ailleurs, cette loi permet également de représenter, sur une échelle restreinte, les niveaux de bruits correspondant à des pressions sonores très différentes, c'est-à-dire que cette compression logarithmique des niveaux, effectuée par l'oreille, permet d'entendre des sons très faibles jusqu'à des sons très forts (figure 6).

La sensibilité à la hauteur du son

L'oreille ne perçoit pas de la même manière toutes les fréquences : en particulier, les basses fréquences sont moins bien perçues. Pour prendre en compte cet effet, on applique au son mesuré un filtre, qui suit la courbe « moyenne » des atténuations acoustiques de l'oreille humaine en fonction de la fréquence. Lorsque l'on applique le « filtre » de l'oreille humaine, on parle de pondération (« A » est le nom de la courbe mathématique du filtrage pour les sons d'intensité courante).

Formule

On calcule le niveau de pression acoustique par :

$$L_p = 10 \log (\text{module de la pression acoustique en Pa} / 0.00002)^2$$

Le résultat s'exprime en décibel, noté dB ou dB(A), lorsqu'il est filtré conformément à la courbe « A ».

- ▶ Le calcul du niveau de pression sonore, noté $L_p(A)$, est exprimé en dB(A). C'est le paramètre qui est pris en compte dans l'exposition sonore.

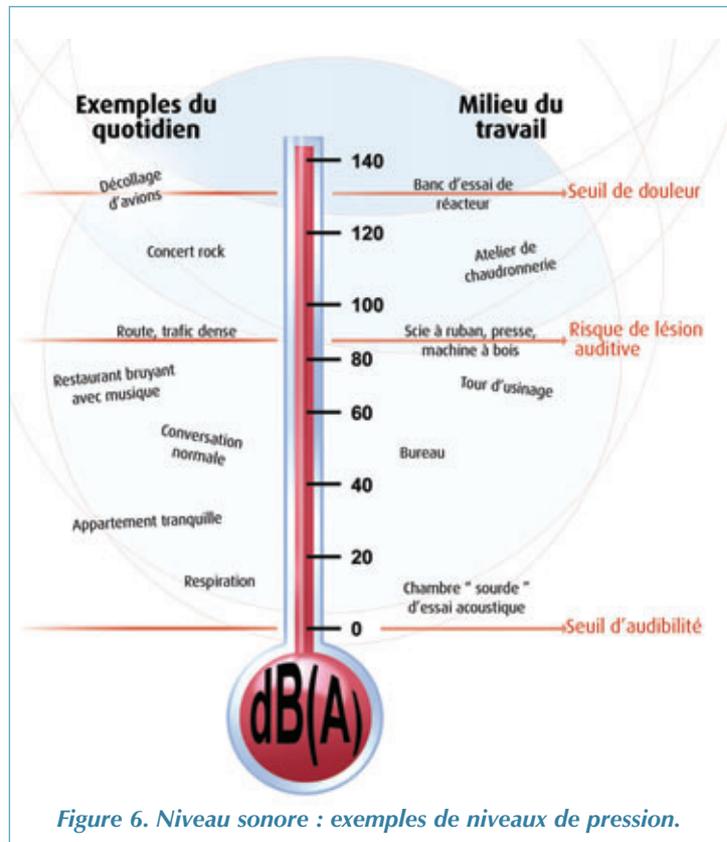
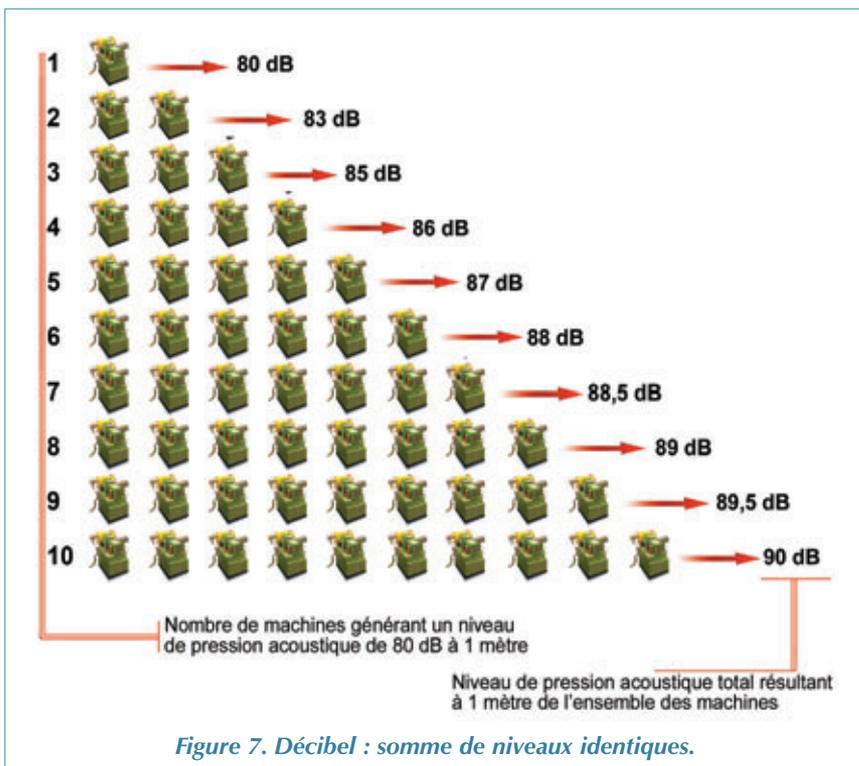


Figure 6. Niveau sonore : exemples de niveaux de pression.

Le décibel

Le décibel permet donc d'adapter la mesure à la perception auditive humaine ; mais sa définition spécifique implique que les résultats doivent être manipulés avec des réflexes différents de ceux de la vie courante :

- les sources sonores ne se combinent pas simplement : deux sources émettant chacune un niveau de pression acoustique en un point de 80 dB génèrent un niveau résultant de 83 dB (figure 7). Cette combinaison de niveaux est fondamentale ; les tableaux de l'encadré 1 permettent de l'estimer sans formule mathématique ;
- il faut qu'une source sonore soit très dominante pour avoir un poids important dans un ensemble de sources (figure 8) : un traitement individuel de source de bruit n'aura donc d'effet positif que si son niveau sonore est très supérieur à celui des autres sources.



On remarque que le décibel n'est pas une unité en soi, mais une manière de compter ; il est d'ailleurs utilisé dans d'autres domaines physiques que l'acoustique (électricité par exemple). Ceci amène d'ailleurs de nombreuses confusions en acoustique : la même appellation « dB » sert à quantifier des grandeurs différentes telles que la pression, l'intensité et la puissance...

Niveaux de pression acoustique mesurée à 1 mètre de l'ensemble des machines considérées

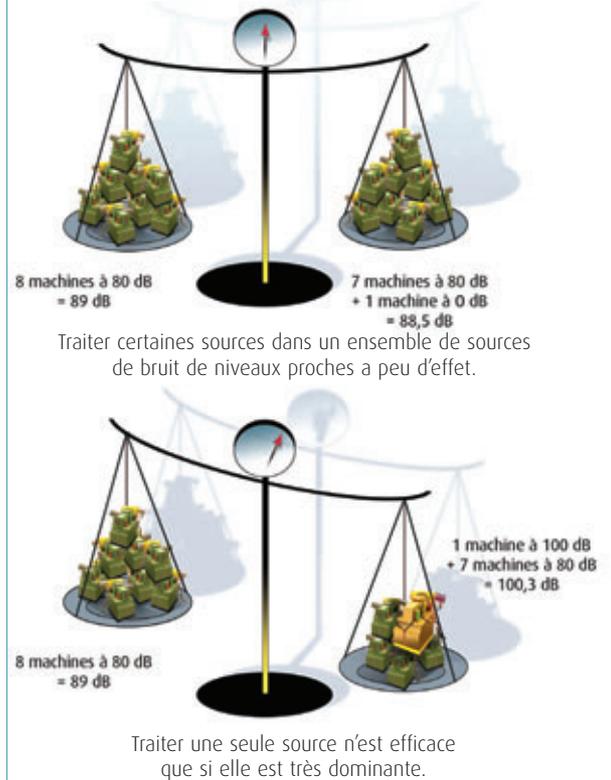


Figure 8. Diminuer le niveau sonore d'une source n'est efficace que si elle est très dominante.

Décibel : combinaison de niveaux différents**Addition de niveaux en décibels**

Problème : quel est le niveau résultant lorsque le niveau reçu provenant de deux sources différentes est connu ?

Différence entre les deux niveaux ($L_1 - L_2$) (en dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valeur à ajouter au niveau le plus élevé (en dB)	3	2,5	2,1	1,8	1,4	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4

Exemple

Combinaison d'un niveau reçu de $L_1 = 85$ dB et d'un niveau reçu $L_2 = 91$ dB ?
L'écart est de $91 - 85 = 6$ dB ; le niveau à ajouter à la valeur la plus élevée est de 1 dB

Le niveau global est donc : $91 + 1 = 92$ dB

Formule : $L_{\Sigma} = 10 \log (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10})$

NB : le calcul est identique en dB(A)

Soustraction de niveaux en décibels

Problème : quel est le niveau provenant de la deuxième source lorsque sont connus le niveau global provenant de deux sources différentes et le niveau provenant de la première ?

Différence entre les deux niveaux ($L_{\Sigma} - L_1$) (en dB)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valeur à soustraire au niveau global L_{Σ} (en dB)	6,9	4,3	3	2,2	1,7	1,3	1	0,7	0,6	0,5

Exemple

Source 1 = machine ; source 2 = bruit de fond

Niveau global $L_{\Sigma} = 80$ dB ; niveau du bruit de fond : $L_2 = 73$ dB

L'écart est de 7 dB ;

le niveau de la source 1 (machine) est donc $L_1 = 80 - 7 = 73$ dB

Formule : $L_2 = 10 \log (10^{L_{\Sigma}/10} - 10^{L_1/10})$

NB : le calcul est identique en dB(A)

2. Génération du bruit

2.1. Source aérienne

On distingue plusieurs manières de générer directement une fluctuation de bruit dans l'air :

- le jet de gaz : le bruit est généré dans la zone de « mélange » du gaz et de l'air ambiant où se créent des turbulences ; son niveau est lié à la différence des vitesses d'écoulement entre le jet et le milieu ambiant ;
- le contact entre un écoulement et un élément solide (paroi contenant l'écoulement, obstacle...) : ce contact génère des turbulences ;
- le contact entre un élément solide mobile (rotor de machine...) et l'air ambiant : les fluctuations de pression sont générées dans la section située entre l'élément mobile et la paroi la plus proche ;
- la génération d'une impulsion sonore (détonation)...

Le niveau sonore des sources aériennes est lié à la masse volumique du gaz, aux dimensions de la source, et surtout à la vitesse de l'écoulement (le cas échéant).

Dans le cas du jet, c'est en réalité la différence des nombres de Mach (la vitesse du gaz rapportée à la célérité du son) des deux milieux gazeux qui conditionne le niveau.

2.2. Source solidienne

De la force au bruit

L'origine de l'excitation solidienne est une force appliquée à une structure* ; la caractéristique de cette force est qu'elle varie continuellement dans le temps.

La structure se met alors à vibrer, selon des mouvements et déformations complexes, qui ont pour caractéristique d'osciller autour d'une position donnée, dite d'équilibre.

Le passage de la force au bruit suit donc les étapes suivantes : force, vibrations, bruit (figure 9).

(*) On appelle ici **structure** une pièce, un élément solide tel qu'une plaque ou une poutre, ou un ensemble quelconque de pièces et d'éléments solides.

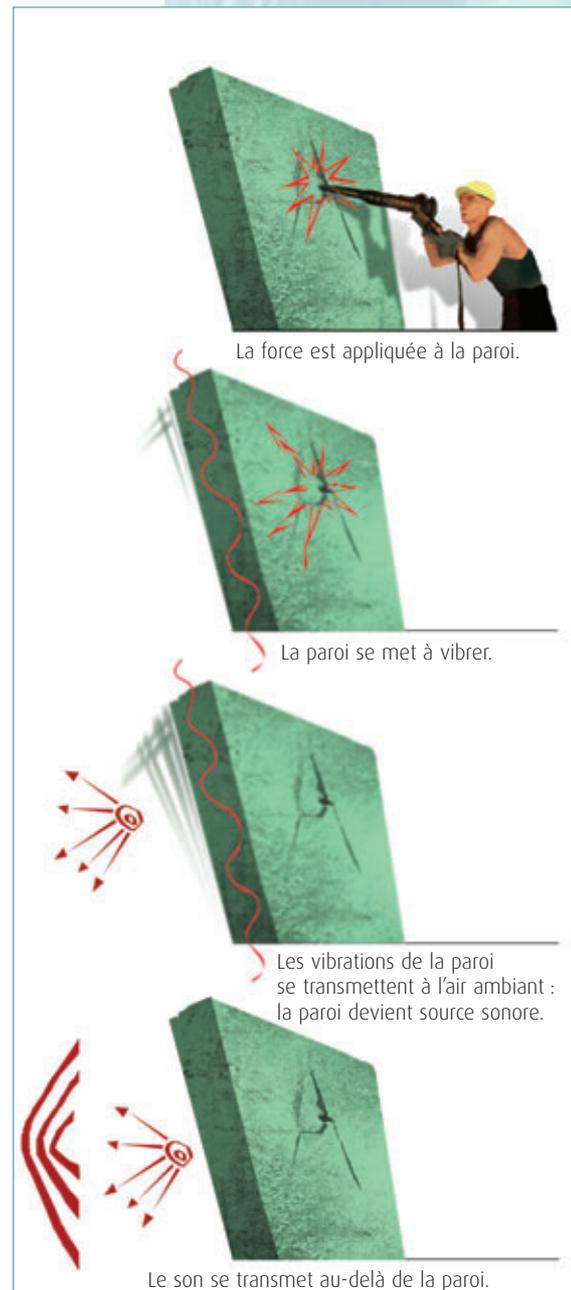


Figure 9. Source solidienne : de la force au bruit.

Vibration et fréquence

Lorsque l'on relâche une structure (essai de lâcher, de choc), celle-ci va se mettre à vibrer sur certaines fréquences préférentielles : c'est ce que l'on observe par exemple pour les instruments de musique « frappés » : les cordes frappées (piano, luth) répondent sur la fréquence de vibration « naturelle », qui correspond à la note entendue. Comme pour les membranes (tambours), cette fréquence varie avec la tension : ainsi, la note change alors que la frappe reste identique.

On peut ainsi considérer que les structures, quelles qu'elles soient, ont des fréquences de vibrations « privilégiées » : on les appelle des fréquences propres.

Dès lors que la force est appliquée à l'une de ces fréquences, la vibration va être naturellement amplifiée : c'est ce que l'on appelle la résonance. On peut citer comme exemples : le phénomène des vibrations du volant d'un véhicule qui culminent pour une vitesse donnée, les ponts qui se déforment pour une vitesse de vent donnée, etc.

Ainsi, le niveau de vibrations d'une structure, s'il dépend bien sûr de l'amplitude de la force appliquée, dépend en grande partie de sa fréquence propre (figure 10).

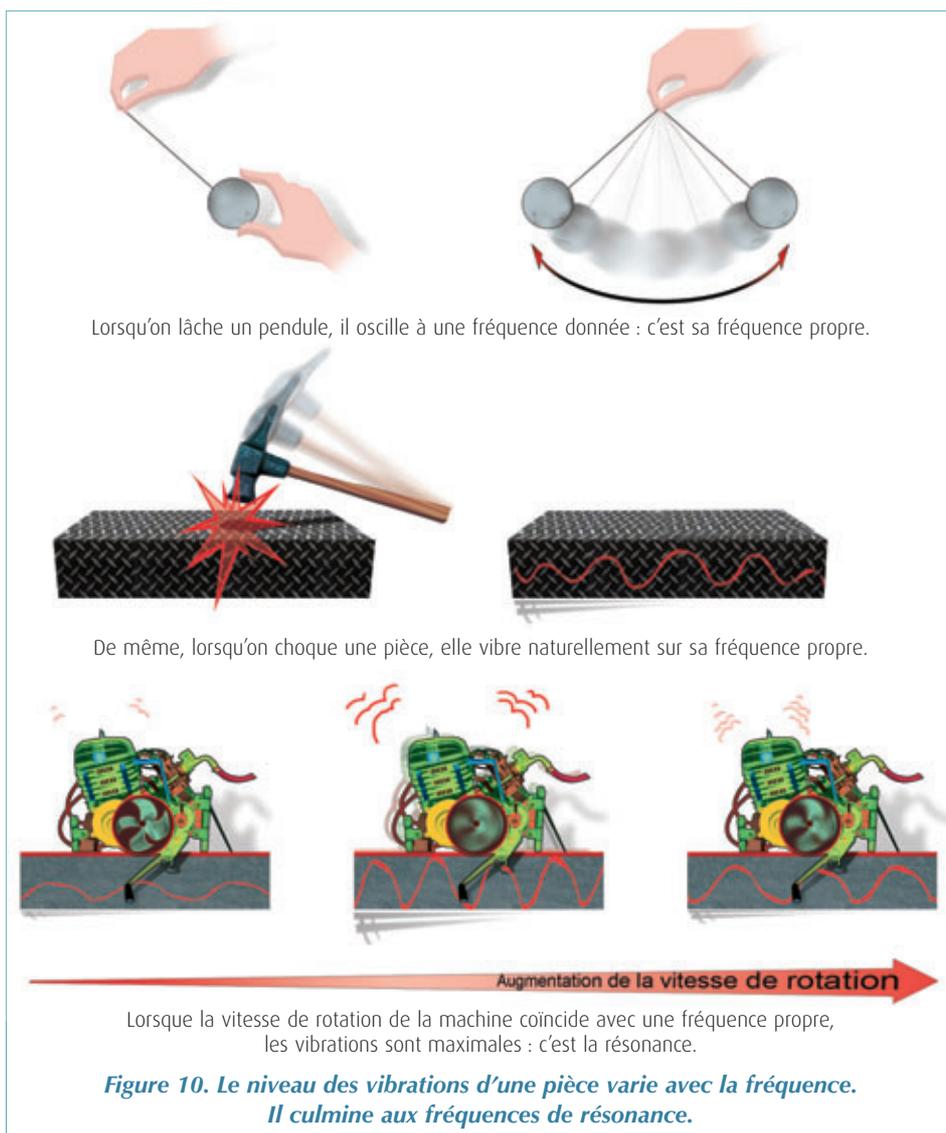


Figure 10. Le niveau des vibrations d'une pièce varie avec la fréquence. Il culmine aux fréquences de résonance.

La force appliquée variant dans le temps, elle contient plusieurs fréquences. La détermination des fréquences des phénomènes étudiés se fait en utilisant une méthode de mesure (ou de calcul) appelée analyse spectrale : on obtient ainsi le spectre du phénomène (bruit, vibration, force...), c'est-à-dire un graphe donnant son amplitude en fonction de sa fréquence.

En réalité, une force comprend beaucoup plus de fréquences que ce que l'on croit : une machine, dont le cycle de fonctionnement est de 50 Hz par exemple, génère en réalité des efforts à une infinité de fréquences (harmoniques, cinématiques diverses des pièces, chocs, frottements...).

Par ailleurs, une structure a une infinité de manières de se déformer, et par voie de conséquence... une infinité de fréquences propres ! Et à chacune de ces fréquences, l'amplification est différente.

Le résultat de la combinaison force/structure est donc complexe : on parle de transfert vibratoire.

Vibration et bruit

La vibration de la structure se transmet au milieu ambiant, par exemple l'air. Au mouvement des molécules d'air ainsi généré correspondent des fluctuations de pression, c'est-à-dire du son.

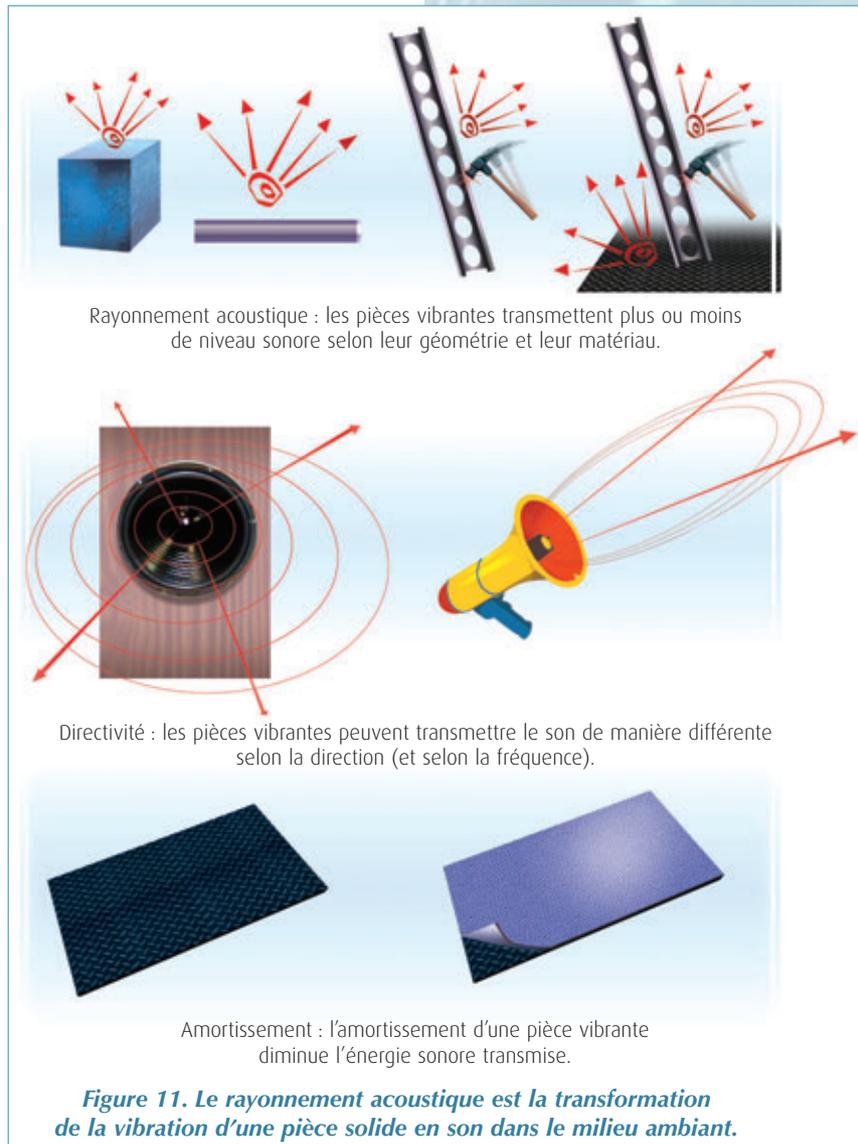
Les lois physiques qui relient les vibrations au bruit sont également complexes ; elles dépendent de la fréquence, des caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure, des conditions du milieu ambiant... Elles sont le domaine dit du rayonnement (figure 11).

La quantité de bruit émis pour une vibration donnée se traduit par le facteur de rayonnement : il varie avec la fréquence. On peut donner quelques tendances générales sur sa valeur :

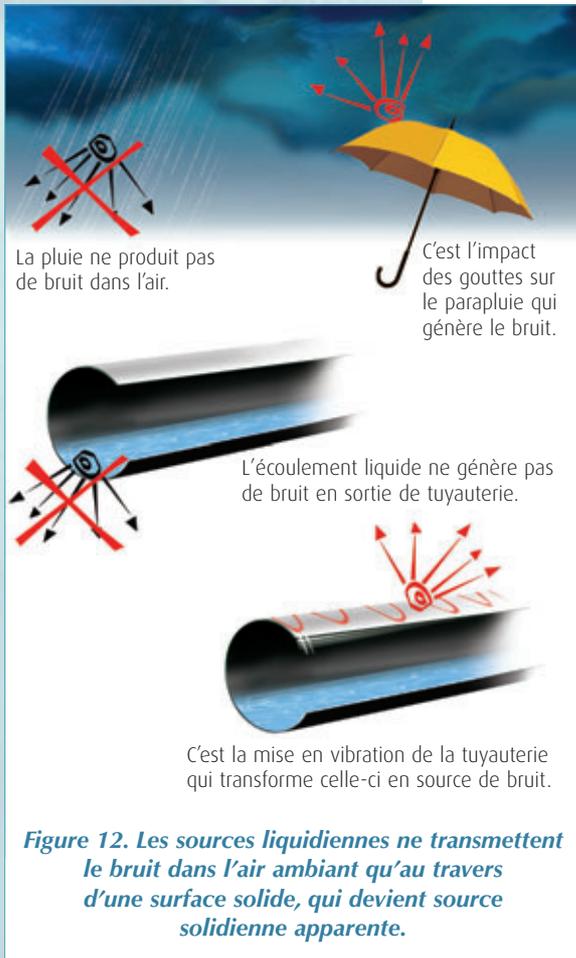
- il est plus important en hautes qu'en basses fréquences ;
- en basses fréquences, il est plus important pour une structure étendue et légère que pour une structure compacte et massive. Une plaque fine rayonne plus qu'un bloc d'acier...
- le rayonnement diminue avec l'amortissement : une partie de l'énergie vibratoire se dissipe en frottement plutôt qu'en bruit.

Le rayonnement d'une structure varie en fonction de la position du point d'écoute par rapport à la source : ceci s'explique en particulier par la variation de sa géométrie, ses discontinuités mécaniques, la proximité de ses limites... On « entend plus » la source selon une direction donnée. On peut ainsi tracer une carte du rayonnement d'une source : c'est ce que l'on appelle sa directivité.

Par ailleurs, les ondes sonores s'accordent plus ou moins aux ondes qui se propagent dans la structure en fonction de leur fréquence : par conséquent, la directivité spatiale varie également avec la fréquence.



2.3. Source liquidienne



Un liquide peut être le siège de fluctuations de pression au même titre qu'un gaz. Cependant, contrairement aux solides, les caractéristiques mécaniques des liquides ne leur permettent pas de transmettre ces fluctuations de pression à l'air ambiant : un écoulement d'eau ne produit pas de bruit dans l'air. C'est le contact de l'écoulement avec une structure solide (tuyauterie, baignoire...) qui va en réalité générer le bruit (figure 12).

Un intermédiaire solide est nécessaire pour transformer la source liquidienne en bruit.

Un problème de bruit liquidien se gère donc de deux manières :

- en jouant directement sur l'excitation : les phénomènes sont alors analogues à ceux des excitations aériennes et se traitent de manière analogue. On parle d'ailleurs souvent de sources fluides, qui englobent les sources aériennes et liquidiennes ;
- en considérant la structure solide rayonnante comme une source solidienne apparente.

La cavitation est souvent citée comme une source liquidienne spécifique, car elle se produit au sein même d'un liquide. Ce phénomène correspond à la vaporisation d'un liquide, lorsqu'il atteint localement des conditions de température et de pression suffisantes pour passer de l'état liquide à l'état gazeux (au niveau d'une vanne par exemple). Le gaz est produit sous la forme de bulles qui implosent dans le liquide environnant ; il s'ensuit le bruit de « grenailage » bien connu des spécialistes de pompes. C'est l'implosion d'une bulle de gaz qui est à l'origine du bruit : la nature de cette source est donc en réalité aérienne. Elle se propage ensuite par voie liquidienne ou solidienne. Cependant, les spécificités de cette source justifient de la traiter à part.

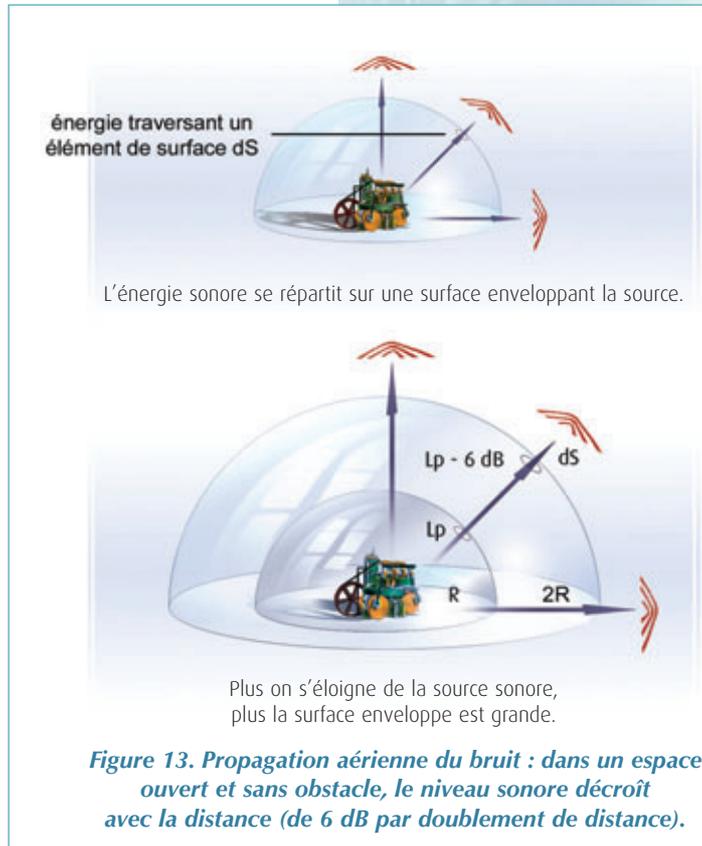
3. Propagation du bruit

3.1. Propagation aérienne

La « capacité à générer du bruit » reste une quantité intrinsèque à la source : c'est ce que l'on appelle sa puissance acoustique. Cependant, le bruit émis se disperse dans l'espace : l'énergie sonore émise se propage dans tout le volume environnant du milieu aérien. On peut imaginer cette propagation comme une « bulle » centrée sur la source, dont les dimensions s'accroissent au fur et à mesure de son chemin.

Le total de l'énergie sonore répartie sur cette surface est constant : on peut d'ailleurs déterminer la puissance acoustique d'une source de cette manière. Mais, la surface grandissant, l'énergie sonore « ponctuelle », ramenée à une petite surface (celle d'un microphone par exemple) va diminuant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source : c'est ce que l'on appelle l'atténuation géométrique du niveau sonore.

En ramenant cette énergie à l'accroissement de la surface, on détermine qu'en théorie le niveau sonore dans un espace libre décroît de 6 dB lorsque la distance par rapport à la source double (figure 13).



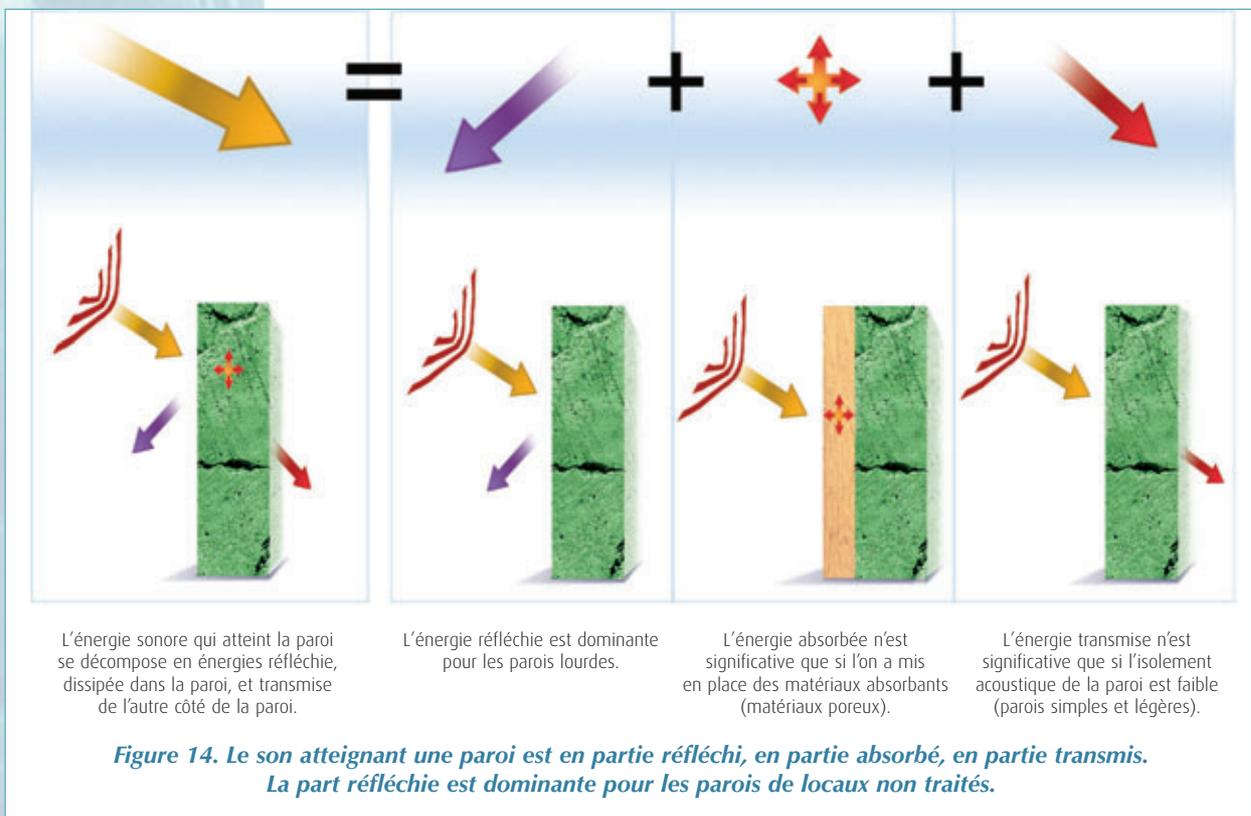
L'atténuation géométrique de 6 dB par doublement de distance s'explique simplement si l'on calcule l'égalité des énergies sonores traversant deux surfaces hémisphériques successives, de rayon R et $2R$ (voir figure 13). La première surface est de $2\pi R^2$, la suivante de $2\pi(2R)^2$, elle est donc 4 fois plus grande que la première. Pour une même unité de surface, la pression à la 2^e hémisphère est donc 4 fois plus petite. Le rapport en dB des deux niveaux de pression est $10 \log 4 = 6$ dB.

La loi de propagation aérienne (atténuation du niveau sonore avec la distance) dépend également en théorie des conditions atmosphériques : l'air ambiant « absorbe » le son plus ou moins selon ses conditions atmosphériques (hygrométrie, pression...). À titre d'exemple, dans des conditions d'ambiance normales (20 °C, 60 % d'humidité) et à 1 000 Hz, l'atténuation du niveau sonore lorsqu'on passe de 1 m à 128 m de la source (7 doublements de distance) est de 1 dB pour l'absorption de l'air, pour 42 dB d'atténuation géométrique. Pour les applications d'analyse du bruit en milieu du travail (dans un local), cette influence est faible à proximité de la source, elle peut devenir non négligeable lorsqu'on en est éloigné.

3.2. Influence du local

L'influence d'un local se manifeste par l'interaction entre le son qui se propage et les parois du local (figure 14). L'énergie sonore se répartit de la manière suivante :

- une partie est réfléchi par la paroi ; la partie réfléchi est d'autant plus importante que la paroi est dure : béton, parpaings peints, tôle, vitres...
- une partie est absorbée au sein de la paroi, par frottement des molécules : ceci suppose que ce frottement soit possible et donc que le matériau soit poreux, ou qu'on dispose d'une lame d'air confinée devant la paroi (membrane). Cet aspect est développé dans le § 5.3. « Absorption du local » de la partie 2 « Les actions de réduction du bruit en entreprise ».
- une partie est transmise de l'autre côté de la paroi : elle est faible pour les parois lourdes ou complexes. Cet aspect est développé dans le § 5.1. « Isolation aux bruits aériens » de la partie 2.

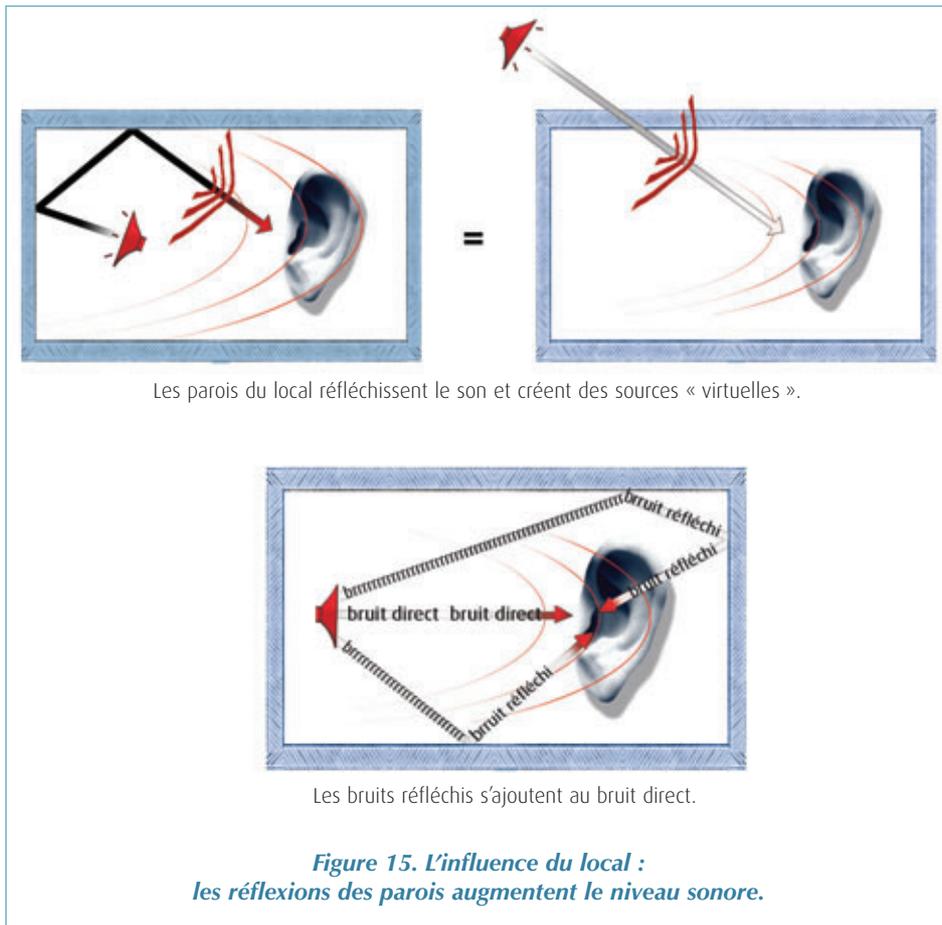


Les principes de cette répartition montrent que, loin de la source, la partie réfléchi est en général dominante pour les parois de locaux non traités en absorption.

On a imaginé précédemment la propagation du son à l'expansion d'une « bulle » sonore ; on peut ainsi représenter son trajet comme une multitude de rayons sonores émergeant de cette bulle.

Pour chacun de ceux-ci, l'effet d'une réflexion se traduit par un nouveau rayon sonore émis par la paroi, qui se comporte comme une source virtuelle ou apparente.

Ainsi, le niveau sonore reçu est la combinaison des rayons sonores directement émis par la source et des rayons sonores émis par les parois dans la direction du récepteur. Le local amplifie de cette manière le niveau reçu (figure 15).

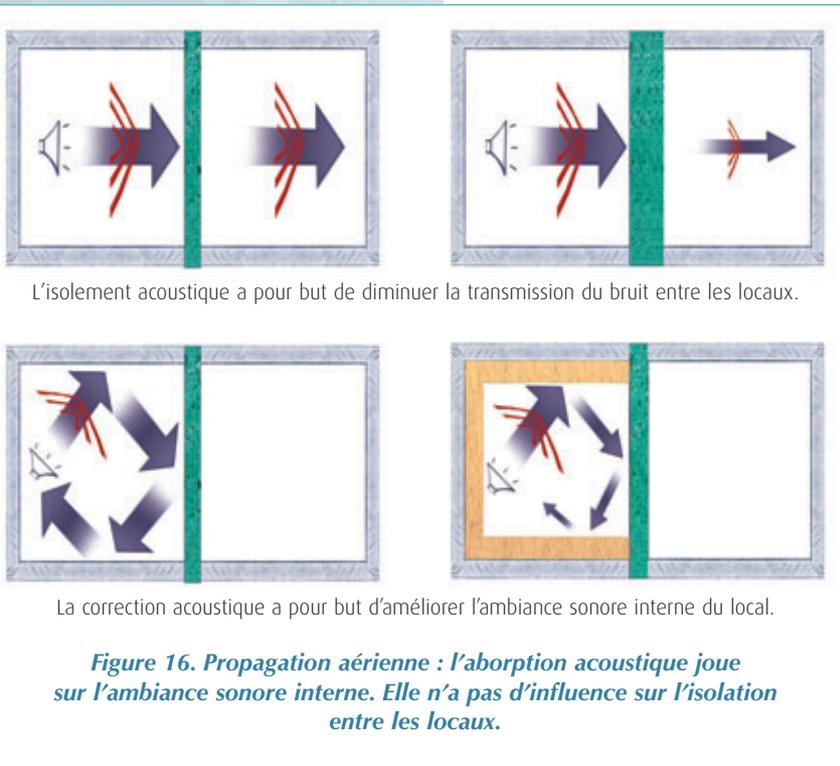


La bulle évoquée ici a en réalité la forme de la directivité évoquée précédemment au § 2.2. La représentation de la propagation en rayons n'en reste pas moins analogue.

La prise en compte de la propagation des ondes sonores dans un local par des rayons de la manière évoquée ici, est valable pour un local de grandes dimensions et en hautes fréquences. Dans les autres cas, il faut prendre en compte l'influence des amplifications acoustiques du local : en effet, un volume fermé a des « fréquences de résonance » acoustiques qui dépendent de ses dimensions. La représentation du problème par les rayons sonores reste cependant une approche satisfaisante dans le cas industriel général, où les locaux sont vastes, et où le domaine fréquentiel qui nous concerne, celui de l'audition, est dominant en moyennes et hautes fréquences.

Les considérations ci-dessus ne prennent pas en compte un paramètre significatif dans l'influence acoustique du local : son encombrement, lié à la présence de machines, installations diverses, opérateurs... Chacun de ces éléments agit comme un obstacle à la propagation du son : ce point est donc analogue au rôle des écrans, développé dans la partie 2.

3.3. Isolation et absorption (figure 16)



Nous avons vu précédemment que, au contact d'une paroi, la propagation aérienne suit deux trajets possibles : la réflexion sur la paroi, et la transmission au travers de celle-ci. Les solutions à mettre en œuvre pour atténuer l'énergie sonore par l'un ou l'autre de ces trajets sont totalement différentes, et de plus sans incidence significative sur l'autre trajet.

L'atténuation du son transmis de l'autre côté de la paroi est du domaine de la transmission acoustique (ou à l'inverse, l'atténuation ou l'isolation acoustique) ; les solutions mettent en œuvre des augmentations de masse de la paroi ou des complexes de doubles parois, cette dernière solution n'étant pas forcément efficace dans tous les cas. L'isolation acoustique se caractérise par un paramètre noté R_w , l'affaiblissement acoustique normalisé d'une paroi, qui est le rapport entre la puissance sonore incidente et la puissance sonore transmise. R_w s'exprime en dB ; ainsi, en raisonnant sur des valeurs moyennes, si le niveau sonore incident est de 80 dB, et que R_w vaut 30 dB, le niveau sonore transmis vaut $80 - 30 = 50$ dB.

L'atténuation du son lors de sa réflexion est pour sa part du domaine de la correction acoustique du local ; les solutions mettent en œuvre la mise en place d'absorbants.

L'absorption de la paroi se caractérise par le facteur d'absorption α , qui est le rapport entre la puissance sonore absorbée et la puissance sonore incidente. α ne s'exprime pas en dB, sa valeur s'étend de 0 (aucune absorption) à 1 (absorption totale), ces deux valeurs extrêmes n'étant bien sûr jamais atteintes dans la réalité.

Les valeurs de R_w et de α dépendent des caractéristiques des matériaux utilisés (voir partie 2) et, pour un même matériau, varient avec la fréquence.

Les domaines de l'isolation et de la correction, voire les termes eux-mêmes, sont souvent confondus : or, les solutions de chacun étant spécifiques, cette confusion peut avoir des effets très négatifs, car on peut croire traiter un problème alors qu'en réalité c'est d'un autre que l'on s'occupe...

- Il est donc important d'établir dès le départ le cas que l'on veut traiter :
- s'il s'agit d'un problème d'acoustique interne au local, il s'agit de le traiter en correction acoustique, par l'amélioration de l'absorption des parois ;
 - s'il s'agit d'un problème de transmission de bruit entre locaux, il s'agit de le traiter en isolation acoustique, par l'augmentation de l'affaiblissement acoustique des parois.

Chacun de ces types de solution est présenté spécifiquement dans la partie 2 « Les actions de réduction du bruit en entreprise ».

Cette distinction explique que, dès les premières étapes de la méthodologie de recherche de solution (voir partie 3), on cherche à qualifier le local du point de vue correction acoustique. Cette qualification se fait à partir de paramètres spécifiques : la durée ou temps de réverbération T_r , qui représente un temps de diminution de niveau sonore après arrêt de la source, ou la décroissance sonore spatiale DL , qui illustre la diminution de niveau sonore dans le local au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source. Ces paramètres sont explicités en annexe.

3.4. Propagation solidienne

La propagation solidienne concerne essentiellement les sources solidiennes, et en particulier les machines. Les vibrations générées par la source primaire se transmettent au sol via l'enveloppe et les liaisons de l'installation ; celui-ci se met à vibrer et transmet ses vibrations aux structures solides qui lui sont reliées rigidement (parois, charpentes, passerelles...). Chacun de ces éléments se comporte alors comme une source apparente solidienne et contribue au niveau sonore reçu par les employés à proximité (figure 17).

Par rapport au problème du bruit en entreprise, les énergies en jeu font que ce type de propagation a une part significative surtout en basses fréquences.

Le phénomène peut être amplifié localement si l'une des structures concernées entre en résonance.

Pour réduire la propagation solidienne, il faut atténuer les forces transmises au sol : c'est l'isolation vibratoire, qui se traite en découplant l'installation et le sol. Cette solution est traitée spécifiquement dans la partie 2.

Ce type de propagation est rarement pris en compte dans les études acoustiques : or, il est impossible de traiter une propagation solidienne par des solutions aériennes. La difficulté est donc de déterminer si la propagation solidienne a une incidence importante sur le niveau reçu ; la procédure requise est présentée dans la partie 3 « Méthodologie, choix des solutions ».

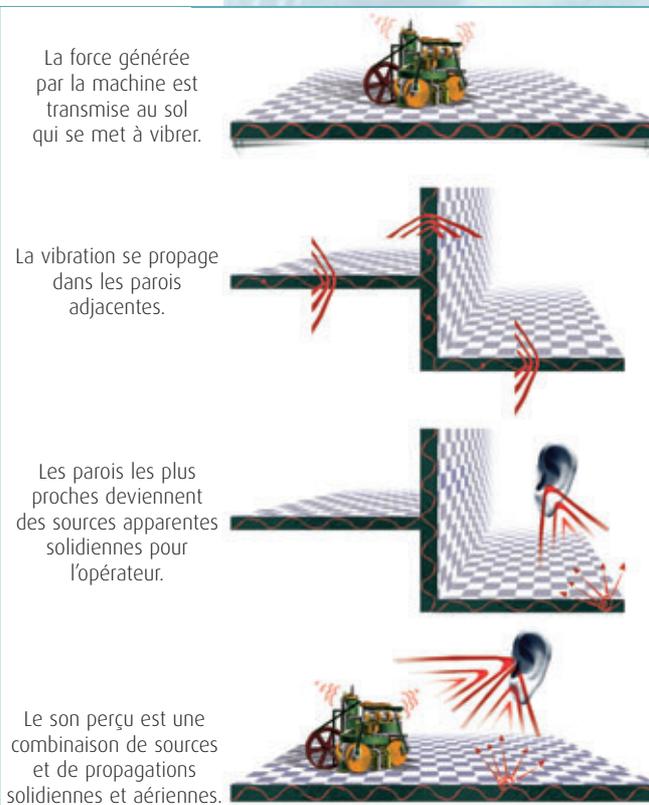


Figure 17. Propagation solidienne : le sol et les parois transmettent les vibrations et deviennent des sources solidiennes apparentes qui se rajoutent aux sources aériennes.

Nous traitons ici de la propagation solidienne par le sol : il va de soi que ce type de propagation peut suivre un tout autre chemin via des éléments rigides fixés à l'installation : châssis, tuyauteries... Les principes de traitement du problème sont identiques.

On peut aussi considérer que des sources aériennes peuvent se propager par voie solidienne : c'est le cas par exemple des transmissions latérales entre locaux, via les éléments de bâtiment liés à la cloison séparative (sol, plancher...). La part de ces chemins est en général faible par rapport au trajet aérien direct (transmission au travers de la paroi), mais elle peut cependant avoir une incidence significative sur l'isolation globale entre locaux (voir partie 2, § 5.1. Isolation aux bruits aériens).

4. Réception et exposition

La notion de bruit reçu se réfère implicitement à un bruit instantané : lorsque telle source émet tel bruit, que le bruit suit tel trajet, quelle est la quantité de bruit à l'arrivée ?

Or, le critère pris en compte pour juger de l'impact du niveau sonore sur la santé d'un employé est son exposition au bruit. Ce critère se rapproche d'une notion de dose de bruit, « niveau cumulé » qui agit sur la santé.

Il faut donc prendre en compte, en plus du niveau reçu, les éléments suivants :

- la contribution des différentes sources au point de réception, que l'on appelle le bruit ambiant (figure 18) ; c'est le niveau reçu au total qui est à considérer ;

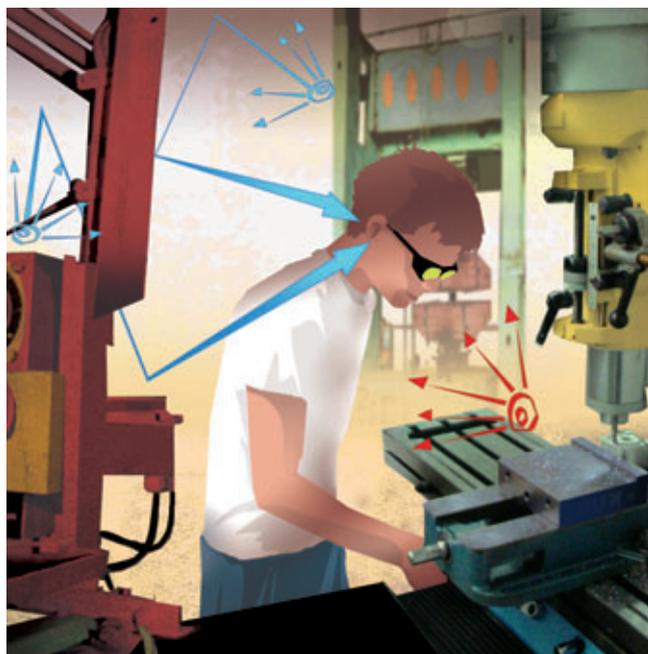


Figure 18. Le bruit ambiant est le niveau sonore reçu en un endroit, issu de toutes les sources environnantes et amplifié par l'influence du local.

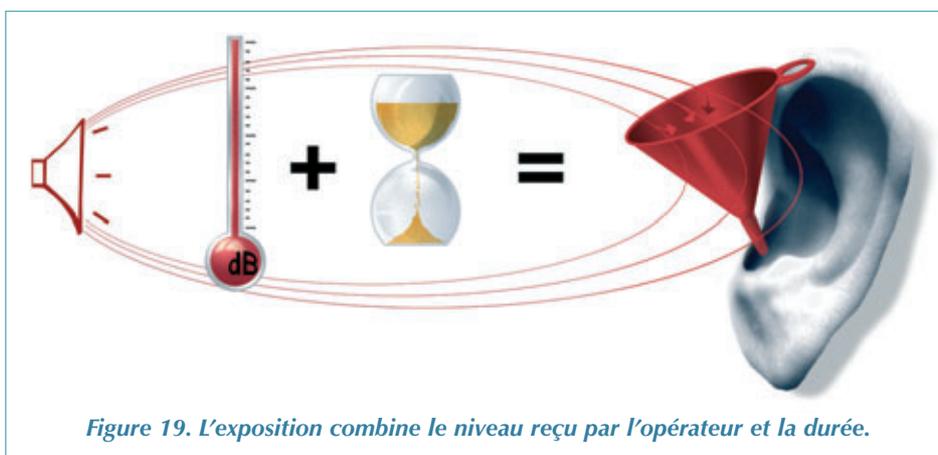


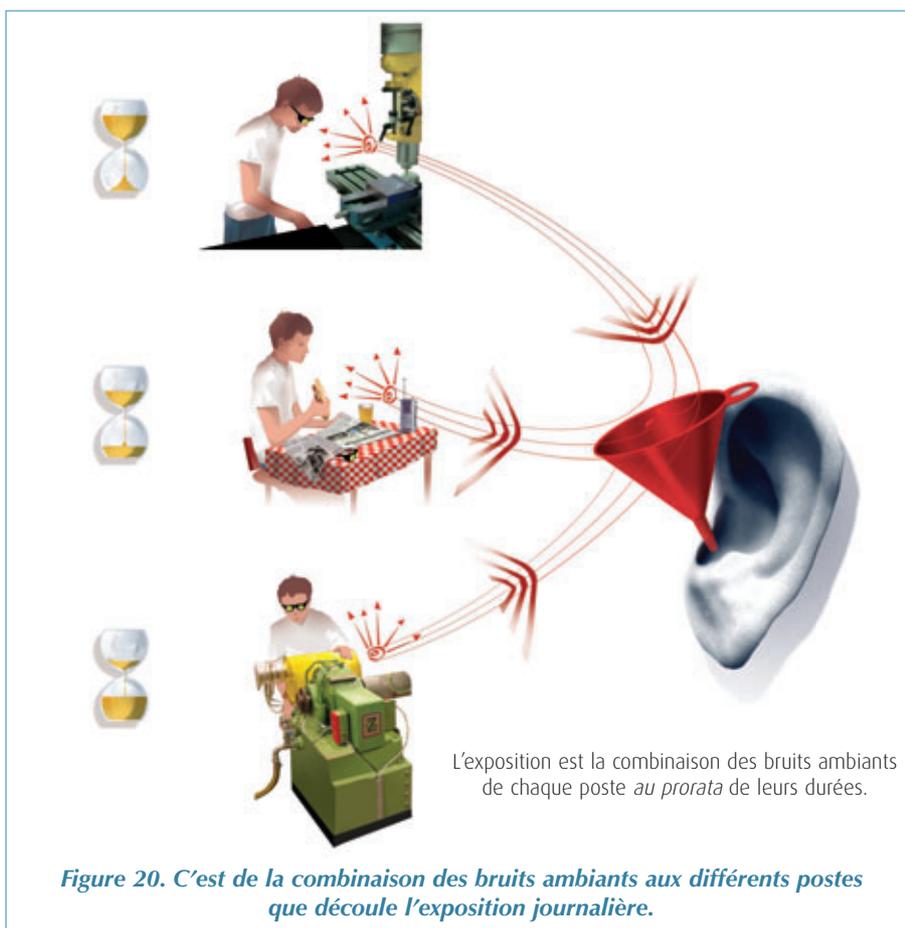
Figure 19. L'exposition combine le niveau reçu par l'opérateur et la durée.

- la durée d'exposition : le niveau est sommé énergétiquement pendant un temps donné, en prenant en compte ses fluctuations pendant cette durée ; (une somme énergétique consiste à calculer une valeur d'énergie équivalente à celle du niveau fluctuant, dont le niveau serait constant pendant toute la durée de mesure) (figure 19) ;
- le trajet de l'opérateur : pendant son activité, il se déplace d'un point à l'autre, chaque station étant un point récepteur. Les bruits ambiants de chaque point récepteur sont à combiner en fonction de leur durée d'exposition (figure 20).

Niveau sonore de la phase bruyante dB(A)	Durée d'exposition quotidienne maximale*
85	8 h
88	4 h
91	2 h
94	1 h
97	30 min
100	15 min
103	7 min 30 s
106	1 min 52 s
109	56 s
112	28 s
...	...
135	0,3 s

* en supposant que le niveau d'exposition en dehors de cette durée soit négligeable.

Équivalence d'expositions sonores maximales, pour une référence du niveau sonore reçu de 85 dB(A) pendant 8 heures.



Le résultat final est une valeur dite équivalente, « sommée » sur la durée de la journée de travail d . Le paramètre correspondant est noté $L_{Ex,d}$ et s'exprime en dB(A).

Cette sommation est énergétique et se base sur des valeurs logarithmiques ; elle ne s'effectue pas par une addition simple.

L'exposition peut se mesurer de plusieurs manières : l'utilisation d'un sonomètre intégrateur permet de donner le niveau équivalent $L_{Aeq,T}$ pendant la durée T d'un poste ; la combinaison mathématique des $L_{Aeq,T}$ des différents postes donne le niveau d'exposition quotidien $L_{Ex,d}$. On peut également faire porter à l'opérateur un dosimètre qui calcule en continu le $L_{Ex,d}$.

Le $L_{Ex,d}$ est le critère réglementaire de base pour déterminer l'exposition d'un travailleur. Il existe cependant un autre critère, le niveau crête, noté L_{pc} , qui correspond à un niveau instantané maximum reçu pendant la journée de travail. En effet, un dépassement, fut-il instantané d'un niveau sonore donné est susceptible de dégrader l'ouïe. Il concerne des événements impulsionnels du type impact de marteau sur une tôle, chute d'objets métalliques, échappements de gaz...

Ce paramètre se mesure de manière spécifique ; il s'exprime en dB Lin (non filtré), ou en dB(C), la courbe de filtrage C correspondant à la perception de l'oreille des bruits élevés.

Les principes et méthodologies présentés dans ce guide sont en grande partie applicables à une étude de L_{pc} .

Bruit au travail :

du « chemin du bruit » à la « carte des solutions »

La présentation de la chaîne de génération du bruit de manière structurée n'est pas gratuite. Elle permet de mieux comprendre les phénomènes en jeu, mais elle répond aussi à un souci pratique : la classification des actions de réduction du bruit, qui permettra ensuite de donner une démarche permettant le choix de la solution la plus judicieuse (figure 21).

Cette classification des actions suit donc la logique physique présentée :

🌀 dans un premier temps, on les répartit selon leur place dans la chaîne du bruit :

- actions sur l'émission : elles sont liées à l'équipement lui-même. On les appelle actions à la source (sur la source de bruit) ;
- actions sur la propagation : elles concernent les différents chemins du bruit, de la source au récepteur. Elles comprennent l'absorption du local, mais aussi certaines actions qui sont souvent considérées à tort comme à la source, telles que les encoffrements et l'isolation vibratoire ;
- actions sur la réception : ce sont celles qui agissent sur le récepteur final, soit l'opérateur ;

🌀 dans un deuxième temps, on analyse la nature du bruit. En effet, selon celle-ci les solutions vont différer : par exemple, l'isolation vibratoire joue sur la propagation solidienne et l'encoffrement sur la propagation aérienne, et ces deux solutions n'ont aucun effet sur l'autre type de propagation.

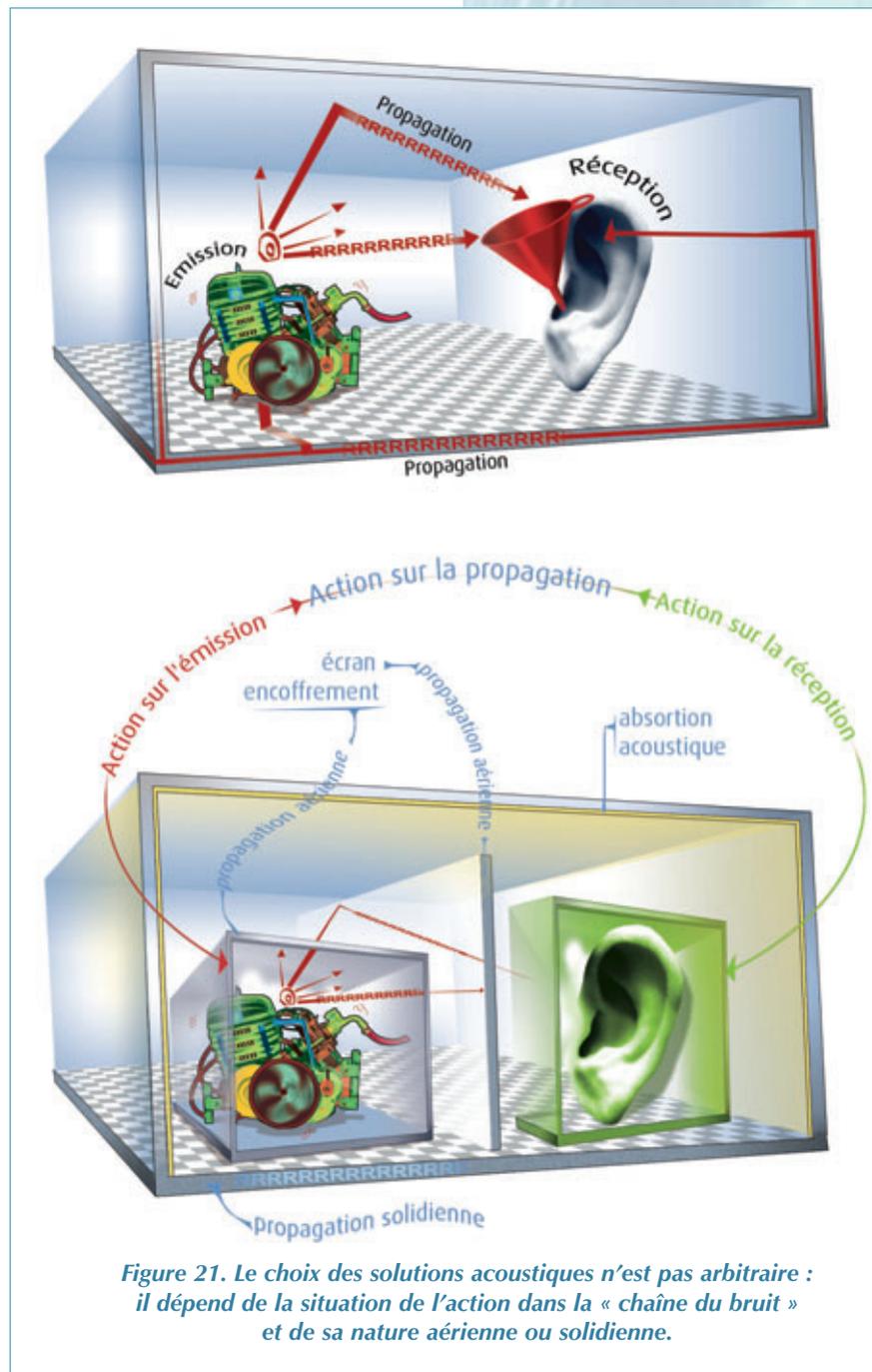
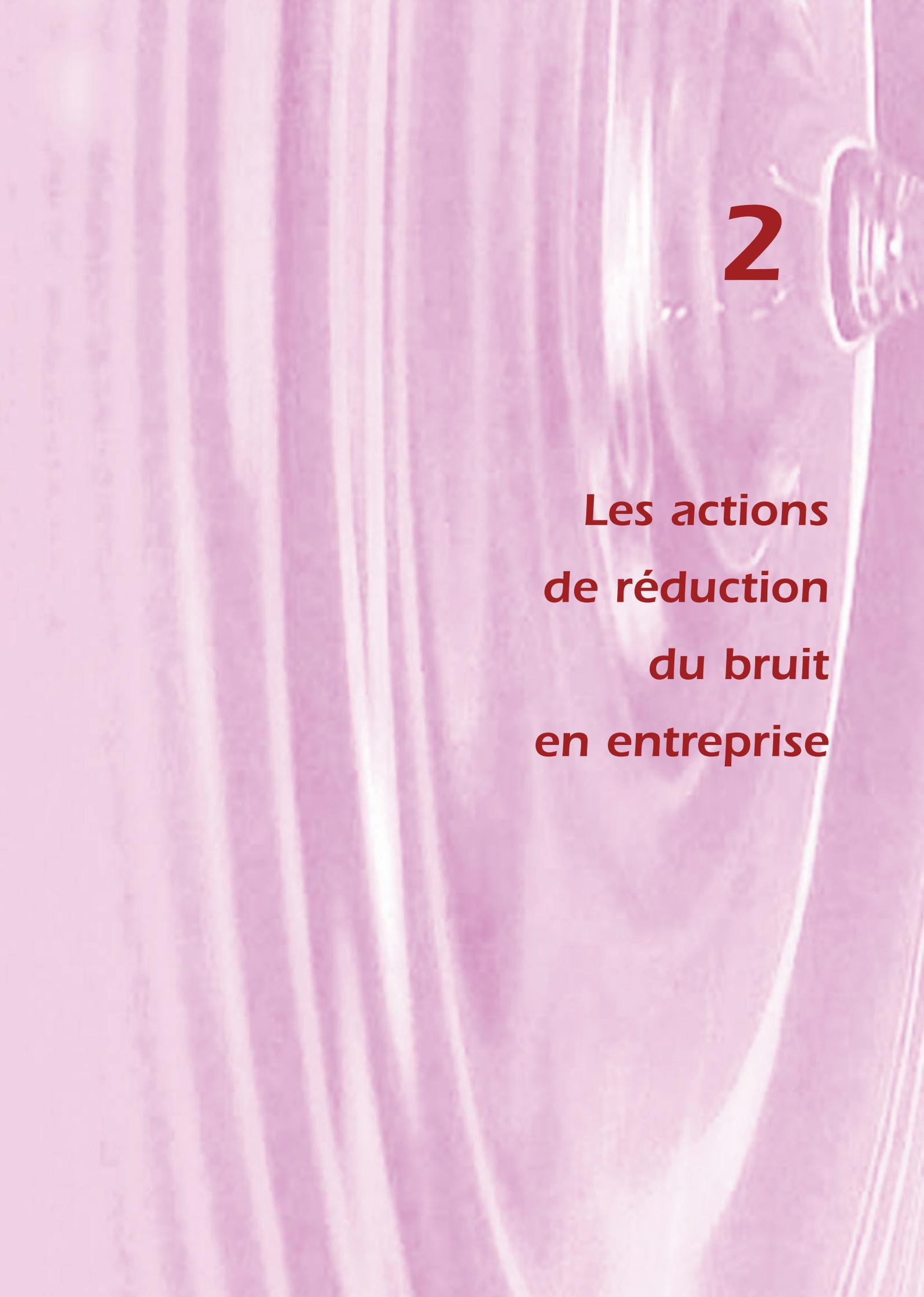


Figure 21. Le choix des solutions acoustiques n'est pas arbitraire : il dépend de la situation de l'action dans la « chaîne du bruit » et de sa nature aérienne ou solidienne.

A large, close-up photograph of a hand holding a glass bottle, with a large number '2' overlaid on the right side.

2

Les actions de réduction du bruit en entreprise



1. Une classification des actions de réduction du bruit

Dans la première partie de ce guide, nous avons présenté un schéma prenant en compte la nature du bruit (aérienne, solidienne) et les étapes de sa manifestation (source, propagation, réception). Ce schéma nous permet de classer simplement les actions techniques de réduction du bruit (*figure 1*) :

- action sur les sources aériennes (on y intègre les actions sur les sources liquidiennes, d'où l'appellation « action sur les sources fluides »),
- action sur les sources solidiennes,
- action sur la propagation aérienne,
- action sur la propagation solidienne,
- action sur la réception.

Cependant, avant toute action technique ponctuelle, il est souvent judicieux d'envisager des actions dont la teneur dépasse le cadre strict du problème technique acoustique et que nous appelons pour cela des actions « amont ».

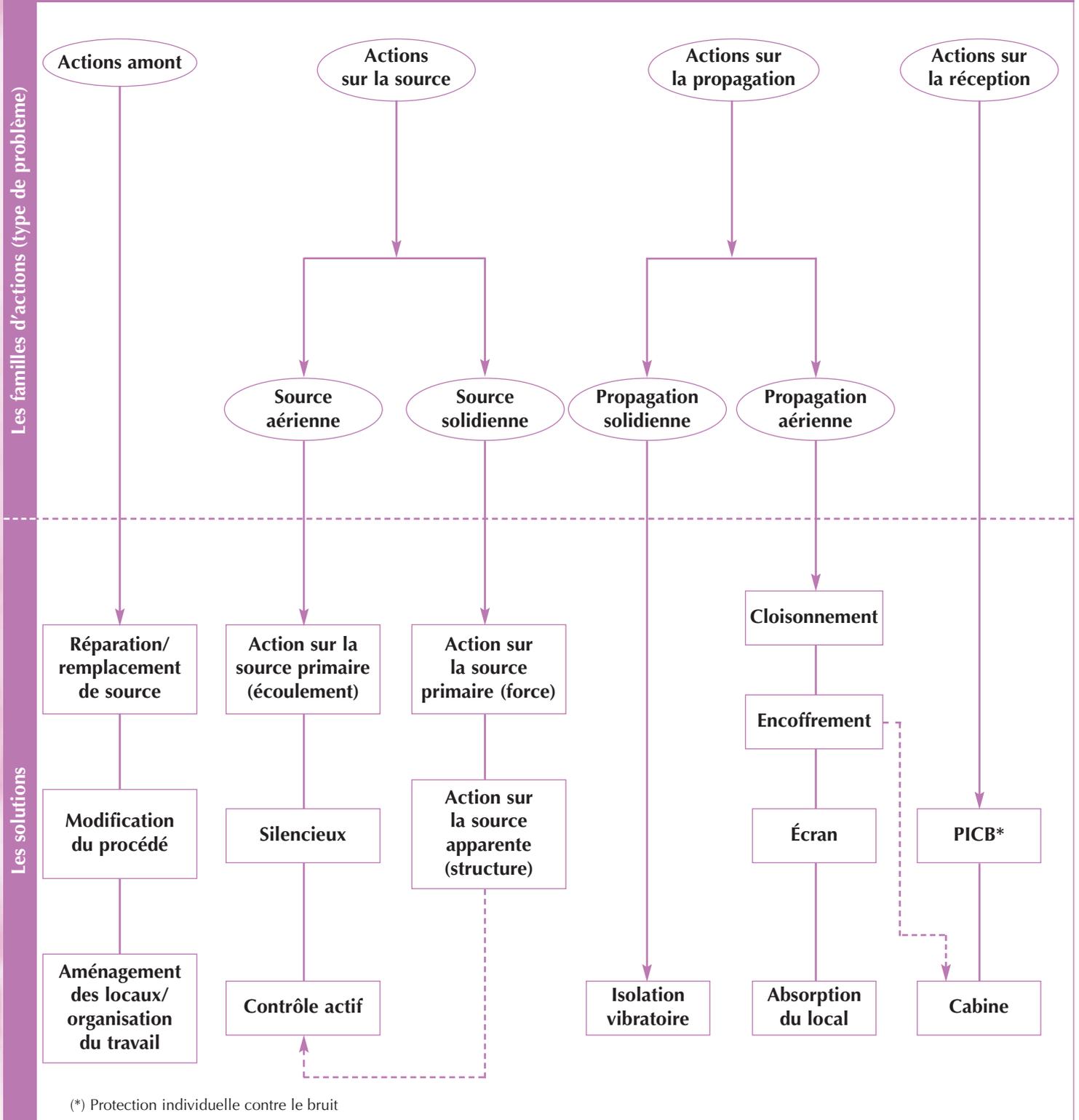
Celles-ci portent sur le procédé bruyant, l'aménagement de l'espace et des tâches, l'organisation du travail. Elles ont un impact positif sur l'exposition sonore, mais leur prise en compte ne peut être dissociée du fonctionnement global de l'entreprise ; leur mise en œuvre peut de ce fait avoir des effets positifs sur d'autres points que l'aspect acoustique : productivité, maintenance, bien-être au travail...

Dans une approche rationnelle de réduction d'un risque, il convient toujours d'envisager ce type de solution en premier lieu.

Certaines actions recouvrant plusieurs classes de solutions, nous les avons rangées dans le groupe qui nous paraît le plus adapté :

- les silencieux sont souvent considérés comme outils d'action sur la propagation. La pratique de leur mise en place au plus près de l'émission sonore, ainsi que leur influence sur le rayonnement d'une ouverture, nous les ont fait classer dans les actions à la source ;
- le contrôle actif, qui concerne aussi bien les sources aériennes que solidiennes, est classé dans les actions sur les sources aériennes : c'est en effet pour ce type de problème que cette solution est aujourd'hui la plus répandue ;
- la cabine, action sur la propagation aérienne, est classée dans les actions sur la réception, dans la mesure où c'est une sorte de protection individuelle de l'employé.

Figure 1. Les actions de réduction du bruit en entreprise



2. Les actions amont

2.1. Réparation et/ou remplacement de source

Le mauvais état d'une installation industrielle est souvent générateur de vibrations et par voie de conséquence de bruit : présence de jeux, problème de lubrification, dispositifs silencieux défectueux... Une inspection de la machine bruyante est donc une action utile avant toute analyse : une bonne maintenance est un auxiliaire à ne pas négliger dans la lutte contre le bruit.

Mais l'action la plus efficace est bien sûr de rechercher des sources silencieuses – voire, moins bruyantes – de par leur conception. Ce critère du « moins de bruit » des équipements est déjà bien instauré dans les biens de consommation courante ; il doit l'être dans les équipements industriels. Acheter plus silencieux est l'action prioritaire, pour peu bien sûr que la situation s'y prête : renouvellement d'installation, recherche d'une performance accrue...

La démarche suit alors les étapes suivantes :

- intégration dans le cahier des charges de l'équipement d'une clause imposant des limites au bruit émis ;
- vérification de la validité du bruit déclaré de l'équipement proposé (norme d'essai de référence, certification...);
- si possible, recette acoustique de l'installation.

La représentativité des conditions de fonctionnement et d'installation de l'équipement doit être prise en compte dans ces différentes étapes.



© Y. Cousson

Exemple

Des outils et équipements moins bruyants existent, avec des performances analogues aux outils classiques. Le gain acoustique varie avec les conditions d'opération. Ainsi, l'utilisation d'un chalumeau « silencieux » peut amener une diminution importante du niveau de pression reçu par l'opérateur, qui peut aller de 7 à 20 dB(A) en fonction du débit.

Techniques et précautions

- ▶ Rédiger un cahier des charges (engagement du fournisseur sur le niveau sonore au poste de travail, la puissance acoustique de la machine...).
- ▶ Vérifier le bruit déclaré (prendre en compte les conditions de fonctionnement).
- ▶ Organiser un contrôle à la réception de l'installation (prendre en compte les conditions de fonctionnement).

2.2. Modification de procédé

Le procédé de fabrication influe sur le niveau sonore ambiant sous de nombreux aspects :

- transport de pièces et produits : génération de chocs, vitesses d'avancement...
- vitesses et débits d'écoulement de fluides,
- choix des opérations pour un résultat donné : découpe par sciage ou par guillotine, fixation par rivet ou par boulonnage...
- rythme de fonctionnement des machines (vitesse, cadence...).

Les choix des réglages du procédé obéissent bien sûr à des considérations de production. Ils sont cependant parfois établis dans des plages données, et la recherche de la condition de fonctionnement « la moins bruyante » peut être possible.

Par ailleurs, la recherche de solutions alternatives moins bruyantes va souvent de pair avec des progrès parallèles et peut même amener une amélioration de la fabrication.

Techniques et précautions

- ▶ S'assurer d'une performance suffisante au niveau du procédé.
- ▶ Intégrer dans l'analyse les gains connexes (coût, maintenance...).
- ▶ Estimer le gain sonore attendu.
- ▶ Évaluer l'impact sur les autres risques potentiels.

Exemple



© B. Floret

Dans cet atelier de préparation de salades, celles-ci sont convoyées puis fixées sur une broche par un opérateur pour l'étape suivante de la découpe.

À l'origine, l'opérateur, debout face au tapis, soulevait les salades et les accrochait. Le procédé a été modifié : c'est désormais à une tourelle pivotante que l'opérateur les accroche.

Le gain apporté au poste de travail est de l'ordre de 6 dB(A) : le système de tourelle est peu bruyant, alors que les chocs du système d'accrochage initial génèrent un niveau significatif.

Cette modification de procédé est initialement prévue dans un contexte global d'amélioration de la prévention, en particulier au niveau de l'ergonomie (le nouveau poste implique pour l'opérateur un geste moins pénible d'accrochage de la salade, et lui permet une station semi-assise). Ceci illustre la caractéristique de ce type d'action qui permet de jouer sur plusieurs aspects simultanément – y compris l'amélioration de la productivité.

2.3. Aménagement des locaux et/ou de l'organisation du travail

L'aménagement des locaux est relatif à la distribution des postes et au parcours des matières. Il est donc souvent lié à l'organisation du travail. Certains principes peuvent être suivis :

- ne pas placer les sources bruyantes à proximité des parois et en particulier des angles, afin d'éviter les réflexions sonores dès l'émission ou, si nécessaire, traiter au moins localement ces parois en absorption ;
- regrouper les sources bruyantes pour les confiner ou les éloigner (séparer les postes bruyants et non bruyants) ;
- éloigner les postes de travail autant que possible des sources de bruit ;
- évaluer l'incidence d'une répartition des tâches bruyantes entre employés pour répartir l'exposition sonore dans des proportions correctes pour tous.

Techniques et précautions

- ▶ **Le confinement des sources bruyantes doit prévoir le transport des produits entre équipements et opérateurs.**
- ▶ **Ne pas déplacer le problème.**
- ▶ **Ne pas « sacrifier » d'opérateur.**

Exemple



© Y. Cousson

Dans une carrière, les travailleurs sont fortement exposés au bruit et à la poussière. Les postes de commande des machines ont été transférés dans des bungalows vitrés, séparés et climatisés, protégeant ainsi les opérateurs des deux nuisances.

Les actions amont sont souvent reliées entre elles et il est souhaitable de les envisager dans leur ensemble.

On peut noter que le « moins de bruit » des installations va souvent de pair avec un fonctionnement optimum, moins de vibrations et moins d'usure.

D'ailleurs, l'outil principal de la maintenance conditionnelle des équipements est le suivi et l'analyse de leurs vibrations.

3. Les actions sur les sources fluides

Comme nous l'avons indiqué dans la partie 1 de ce guide (voir chapitre « Génération du bruit », § 2.3), les sources aériennes et liquidiennes peuvent dans l'ensemble être traitées communément comme sources fluides. C'est ce que nous faisons ici, pour éviter les redondances, en spécifiant lorsque nécessaire les particularités des sources liquidiennes.

3.1. Actions sur l'écoulement primaire

Le paramètre le plus significatif dans le niveau sonore d'une source fluide est la vitesse de l'écoulement : sa diminution, lorsqu'elle est possible, est donc une action performante pour atténuer le niveau sonore émis. Les autres solutions dépendent du type de source : contact avec le fluide d'un élément solide fixe ou mobile, ou d'un autre fluide ; caractère continu ou impulsif (voir tableau).

Classification des excitations fluides primaires permettant d'orienter les solutions à mettre en œuvre

Excitation fluides (variations de pression)								
Contact élément mobile/fluide		Contact élément fixe/fluide		Contact fluide/fluide				
Continu		Impulsif		Obstacle	Conduite	Mélange des écoulements	Écoulements sur cavité	Écoulement diphasique gaz/liquide
Exemples	Rotor de pompe ventilateur	Machine alternative (piston)	Défecteur, vanne	Gaine, tuyauterie	Jet d'air (buse)	Outil tournant affleurant sur caisson machine	Cavitation	
Axes de solutions	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer le jeu aux extrémités mobiles ; • diminuer la vitesse périphérique ; • optimiser l'état de surface des éléments mobiles ; • optimiser le profil de la pièce mobile. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la vitesse de variation de pression (détente progressive). 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la la vitesse d'écoulement ; • réduire la taille de l'obstacle ; • profiler sa forme ; • jouer sur l'incidence de l'écoulement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les discontinuités géométriques (variations de section, séparations, courbures) ; • optimiser l'état de surface ; • diminuer les vitesses d'écoulement. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la vitesse d'écoulement (agrandir les sections) ; • réduire les différences de vitesse entre les écoulements (insertion d'un flux intermédiaire). 	<ul style="list-style-type: none"> • Revêtir la cavité d'absorbant ; • modifier l'incidence de l'écoulement ; • diminuer la vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire la vitesse d'écoulement ; • réduire les pertes de charge ; • augmenter la pression statique ; • raccourcir les conduites d'aspiration. 	

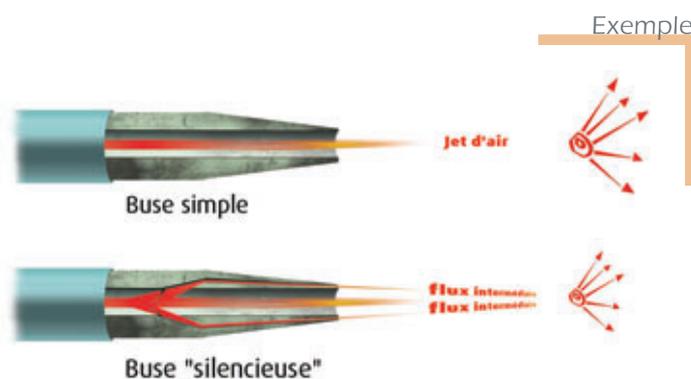


Techniques et précautions

- **Attention aux effets sur les procédés !**
La modification de l'écoulement doit être compatible avec les contraintes de production. Inversement, une modification d'installation diminuant l'émission sonore peut amener une efficacité accrue (diminution de pertes de charge, des énergies utilisées...).

On peut cependant évoquer les axes généraux de solution suivants :

- optimiser l'état de surface des éléments solides en contact (tuyauteries, aubes...),
- rendre les obstacles plus « aéro- ou hydrodynamiques » et diminuer leur taille,
- éviter les singularités géométriques (coudes...),
- réduire si possible les vitesses d'écoulement.



L'utilisation de soufflettes silencieuses permet d'obtenir un ordre de grandeur de gain en pression acoustique de 10 à 20 dB(A). Le principe général d'atténuation du bruit de buse est d'atténuer la transition entre la vitesse d'écoulement du jet et celle de l'air ambiant par la création d'un flux intermédiaire.

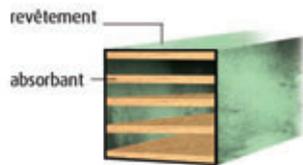
3.2. Les silencieux

Le silencieux est un dispositif qui est mis en place au niveau de la source fluide de bruit pour en atténuer l'intensité.

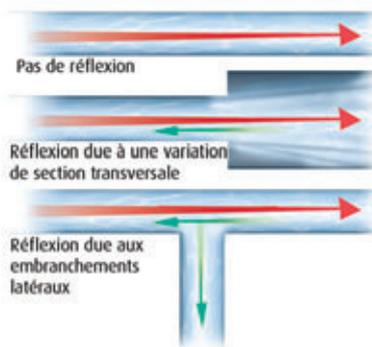
Pour les écoulements gazeux, on distingue plusieurs technologies ; selon celles-ci, l'onde sonore transmise est atténuée :

- par réflexion, celle-ci étant générée par la rencontre d'une discontinuité géométrique sur le trajet de l'onde ;
- par dissipation, en transformant l'énergie sonore en chaleur par le frottement de molécules (air ambiant ou fluide en contact).

Techniques et précautions



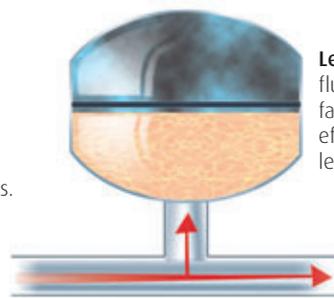
Les silencieux « dissipatifs » : le son est atténué au travers du silencieux par des revêtements absorbants ; ils sont en général utilisés sur des systèmes de ventilation pour des débits d'écoulement faibles.



Les silencieux « réactifs » : ils jouent sur la réflexion du son créée par des discontinuités géométriques du dispositif ; c'est par exemple le cas des « pots d'échappement » des voitures.



Les silencieux de détente : ils assurent une diminution de pression progressive au travers d'un dispositif poreux ; ils sont utilisés sur des évacuations d'air comprimé, par exemple.



Les accumulateurs à gaz : ils transmettent les fluctuations de pression à un volume de gaz qui fait office d'amortisseur ; ils sont particulièrement efficaces en cas de bruits impulsionnels et pour les bruits liquidiens.

Pour les écoulements liquides, on trouve principalement des silencieux par accumulateurs à gaz : une cavité remplie de gaz « amortissant » est en contact avec le liquide par l'intermédiaire d'une membrane souple.

La mise en place d'un silencieux sur une ouverture affecte l'intensité et la directivité de l'émission du bruit : on peut considérer qu'il modifie le « rayonnement » de l'ouverture.

On dispose le silencieux au plus près de l'émission du bruit :

- soit à l'ouverture d'une source apparente,
- soit en début de conduite dans le cas d'un écoulement : ceci permet d'éviter le rayonnement de la conduite entre la source et le silencieux.

Aspiration et échappement sont deux sources à traiter séparément.

Exemple



Les silencieux d'échappement permettent d'obtenir des gains de 20 à 40 dB(A). En dehors des critères acoustiques et de coût, ils se choisissent en fonction de la perte de charge qu'ils génèrent et de la facilité de leur maintenance (*).

* Sil'Échap est une base de donnée informatisée d'aide au choix des silencieux, développée par l'INRS (réf. CD 14, 2003).

3.3. Contrôle actif

Techniques et précautions

- ▶ L'installation est complexe et nécessite une électronique appropriée.
- ▶ Des conditions techniques favorables sont nécessaires pour atteindre un résultat significatif.
- ▶ Des applications sont également possibles pour atténuer les vibrations.

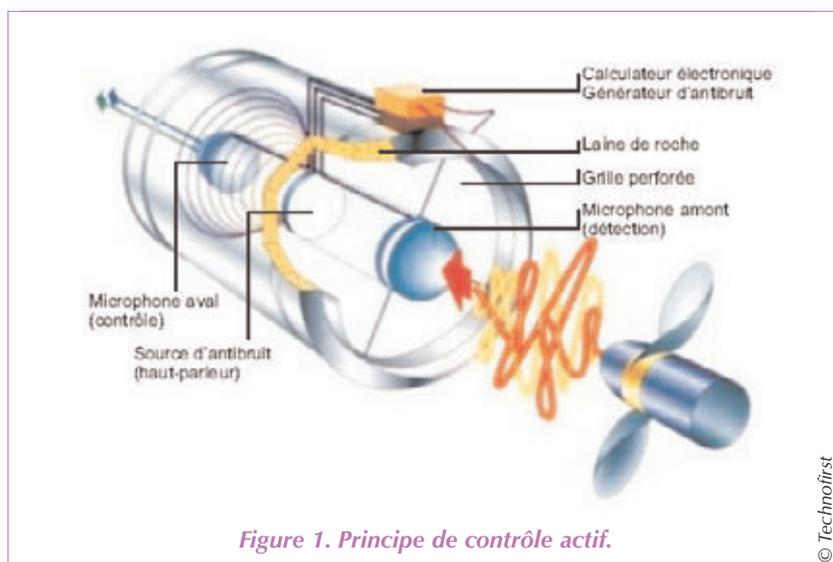
Le contrôle actif consiste à créer un bruit opposé à celui que l'on veut atténuer, de telle sorte que le bruit résultant soit (idéalement) nul. Il repose donc sur la mise en place d'une source de bruit artificielle à proximité de la source à atténuer, et d'un dispositif électronique de mesure et de régulation qui règle de manière continue le contre-bruit par rapport aux fluctuations du bruit à traiter.

Cette technologie a pour conséquence que l'efficacité du contrôle actif :

- est meilleure sur les basses fréquences : le système de régulation a le temps de réagir ;
- est meilleure sur les bruits périodiques (fréquences « pures »), qui ne varient pas continuellement ;
- est plus facile à mettre en œuvre pour une propagation guidée (conduite), la multiplication des sources artificielles dans l'espace n'étant pas nécessaire.

Ce type de réalisation reste encore peu répandu dans le milieu industriel ; on en trouve cependant dans le domaine des gaines d'écoulement d'air.

Il est à noter que le principe du contrôle actif (voir figure 1) s'applique également sur les sources solidiennes : la source artificielle est alors de nature différente (de type « pot vibrant » plutôt que « haut parleur »).



3.4. Cas de la cavitation

Comme nous l'avons vu précédemment dans la partie 1 « Aspect physique : génération, propagation et réception du bruit », la cavitation est plutôt une source aérienne que liquidienne. Cependant, les actions pour atténuer ou éviter la cavitation sont appliquées sur l'écoulement fluide lui-même : il s'agit d'éviter la dépression qui vaporise le liquide. Différents axes sont possibles :

- augmenter la pression statique du réseau d'écoulement,
- réduire la vitesse de l'écoulement,
- diminuer les pertes de charge : géométrie et état de surface des conduites...

4. Les actions sur les sources solidiennes

4.1. Actions sur la force

En fonction du problème, on peut intuitivement imaginer des voies de solution pour atténuer un effort solidien. L'assistance du service maintenance est précieuse à ce niveau.

Ici aussi, les solutions dépendent du type de source : forces de contact ou à distance, caractère continu, impulsionnel ou de friction... (voir tableau ci-dessous).

On peut cependant évoquer les axes généraux de solution suivants :

- optimiser l'état des surfaces en contact (amortir ou étaler les contacts),
- « lisser » les efforts (éviter les à-coups),
- lubrifier,
- diminuer les énergies de mouvement ; éviter les jeux.

Classification des forces primaires permettant d'orienter les solutions à mettre en œuvre

Excitations solidiennes (forces appliquées)				
Forces de contact (en mouvement)			Forces à distance	
Continues	Impulsionnelles		De friction	
Exemples	Engrènement, roulement	Chocs mécaniques, butées, chutes d'objet	Freins, contact outil/pièce	Forces électromagnétiques
Solutions	Optimiser l'état des surfaces de contact ; améliorer la continuité du contact ; optimiser la lubrification ; augmenter la flexibilité des pièces en contact ; éviter les jeux.	Augmenter la durée de l'impact ; augmenter la masse du corps fixe ; diminuer la vitesse de l'impact ; minimiser la masse du corps mobile ; éviter les jeux ; jouer sur la déformation des éléments.	Choisir les matériaux en contact ; lubrifier ; amortir la pièce excitée.	Jouer sur l'entrefer (moteur), sur l'orientation des encoches (moteur) ; choisir le matériau du noyau (transformateur).

Exemple



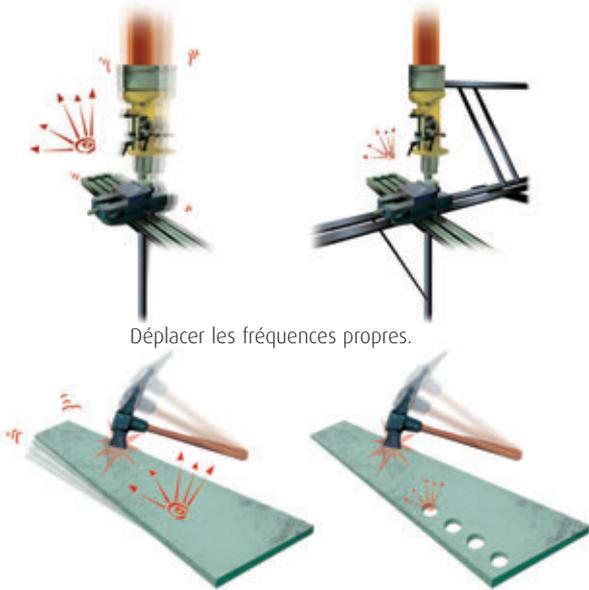
© B. Floret

Les cribles sont une importante source de bruit, en particulier du fait des chocs entre les éléments triés et le tamis.
L'utilisation de tamis en polyuréthane permet d'amortir ces chocs et d'obtenir ainsi un gain acoustique de l'ordre de 10 dB(A).

Techniques et précautions

- ▶ Intercaler des matériaux amortissants.
- ▶ Lubrifier.
- ▶ Changer de technologie.
- ▶ Modifier la cinématique.

Principes



Déplacer les fréquences propres.

Diminuer le facteur de rayonnement.

4.2. Actions sur la structure

Les actions sur la structure sont difficiles à mettre en œuvre dans la mesure où, dans ce domaine, l'intuition est souvent mauvaise conseillère.

On peut distinguer deux situations :

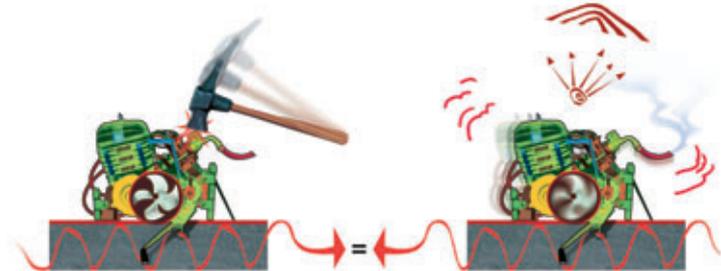
- une résonance de structure est identifiée, et il est établi que cette résonance est influente sur le niveau sonore : il s'agit alors de modifier la structure en cause pour déplacer sa fréquence propre (modification de masse, de raideur) ou augmenter son amortissement ;
- le facteur de rayonnement d'un élément de la structure est jugé important, et il est établi que l'incidence de ce rayonnement partiel est influente sur le niveau sonore global : on peut alors modifier la surface en cause, la perforer, la revêtir de matériau amortissant, ou l'isoler d'un point de vue vibratoire de ses sources d'excitation.

L'identification du problème, le choix de la modification à réaliser, l'évaluation de l'impact attendu sont complexes : une analyse du problème à l'aide de méthodes spécifiques s'avère souvent nécessaire pour éviter une erreur.

Techniques et précautions

Le déplacement de fréquence propre n'est utile qu'en cas de résonance.

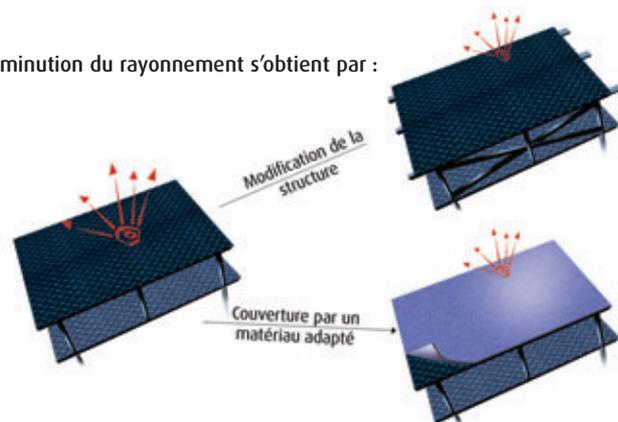
S'assurer que la fréquence en fonctionnement correspond à une fréquence propre.



Mesure des fréquences propres de l'équipement.

Mesure des fréquences en fonctionnement dominantes dans le problème.

La diminution du rayonnement s'obtient par :



Exemple



© P. Bérenger

La chute de pièces dans un bac de manutention génère des bruits solidiens élevés au niveau des parois du bac. La mise en place de parois grillagées permet de diminuer son rayonnement et d'obtenir ainsi un gain de pression acoustique de l'ordre de 15 dB(A).

5. Les actions sur la propagation aérienne

5.1. Isolation (aux bruits aériens)

Cloisonnement

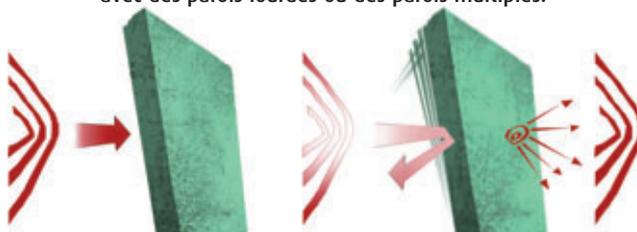
L'isolation aux bruits aériens permet d'atténuer la transmission du bruit entre deux espaces séparés. La séparation de base est une cloison qui délimite la frontière entre les deux espaces, de manière hermétique.

Le caractère isolant d'une cloison peut être accru par deux voies :

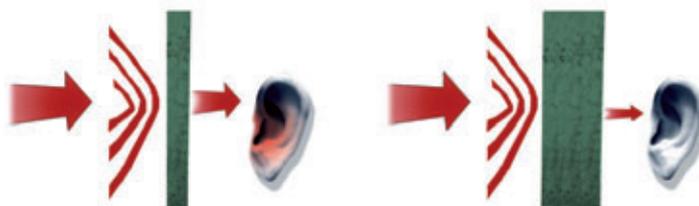
- en augmentant la masse surfacique, c'est-à-dire la masse par mètre carré : une paroi est d'autant plus isolante qu'elle est massive ;
- en utilisant le principe de la paroi multiple : elle est constituée de plusieurs éléments séparés par une lame d'air, de préférence « enfermée » dans un complexe absorbant de type laine de verre. Par ce système, on obtient un fort isolement pour une masse globale de paroi faible.

Principes

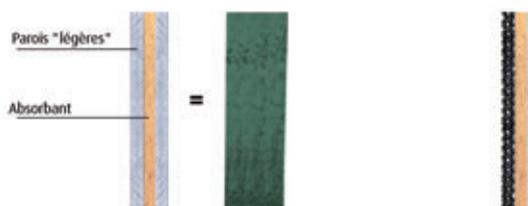
Une bonne isolation acoustique aux bruits aériens est obtenue avec des parois lourdes ou des parois multiples.



La transmission du bruit : l'onde sonore incidente fait vibrer la paroi qui devient source de bruit de l'autre côté.



Plus la masse surfacique de la paroi est grande, moins celle-ci vibre, et moins le bruit est transmis.



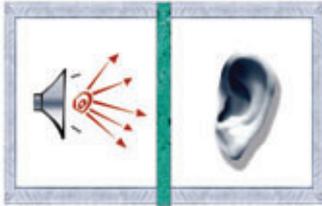
L'utilisation de complexes de parois multiples permet souvent d'augmenter considérablement l'isolation pour de faibles masses.

Attention : l'ajout d'un revêtement métallique perforé ne crée pas un effet de paroi multiple.

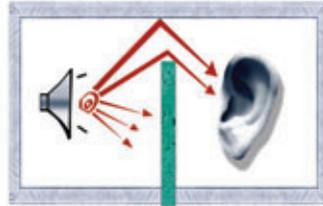
Il faut cependant noter qu'une paroi présente une zone de fréquence qui, au contraire, assure un isolement très faible ou, formulé différemment, une transparence acoustique élevée. Du fait de sa composition, une paroi multiple présentera plusieurs zones de fréquence de « faiblesse ». Ce phénomène doit être pris en compte dès la conception, afin d'éviter qu'elles ne correspondent aux fréquences à isoler. Ce point est développé dans la partie 4.

Techniques et précautions

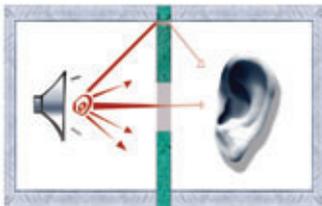
Le cloisonnement



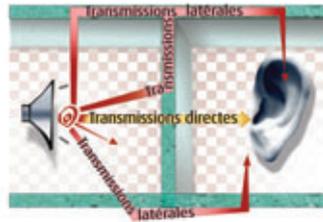
Le cloisonnement permet de confiner les sources bruyantes dans un espace fermé.



Si la cloison n'est pas jointive aux autres parois, son effet est proche de celui d'un écran.



Les éléments rapportés de faible isolement, ainsi que les fuites aux jonctions, diminuent considérablement l'isolement global de la cloison.



Les transmissions via les parois jointives atténuent l'isolement théorique de la cloison.



Prendre en compte les fréquences de forte transparence acoustique des parois, et en particulier des parois multiples.

Exemple



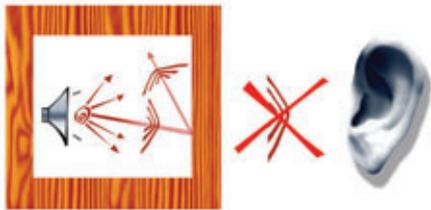
Cloisonnement d'un atelier de passementerie



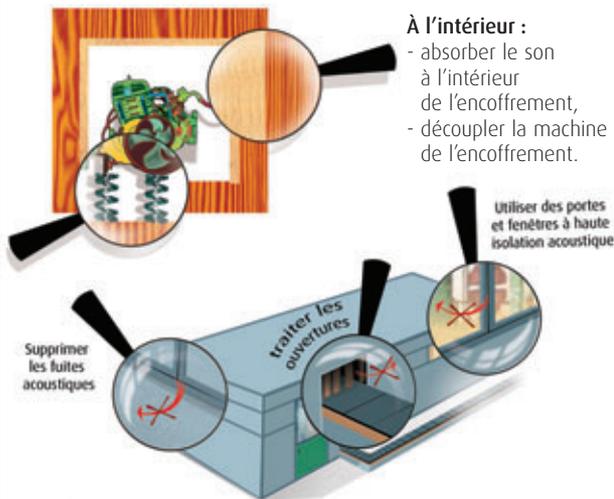
Cloisonnement de protection d'une zone de repos

Le cloisonnement peut enfermer une zone bruyante, ou à l'inverse protéger une zone silencieuse. Les gains attendus sont du même ordre de grandeur que ceux des encoffrements.

Techniques et précautions



« Enfermer » la source : l'encoffrement.



À l'intérieur :

- absorber le son à l'intérieur de l'encoffrement,
- découpler la machine de l'encoffrement.

Utiliser des portes et fenêtres à haute isolation acoustique

Supprimer les fuites acoustiques

traiter les ouvertures

À l'extérieur :

- utiliser des portes et fenêtres à haute isolation acoustique,
- traiter les ouvertures,
- supprimer les fuites acoustiques.

L'efficacité d'un encoffrement ne dépend pas que de l'isolation acoustique de ses parois : il faut suivre des règles simples de conception.

Encoffrement

L'encoffrement est une enceinte qui enferme l'équipement bruyant, afin de l'isoler acoustiquement du reste du local.

Les caractéristiques d'isolation des parois de l'encoffrement suivent les mêmes principes que celles des cloisons. Les techniques et précautions sont également identiques, à ceci près qu'un encoffrement nécessite souvent de nombreuses ouvertures pour les entrées et sorties de matière, son aération, etc., et que, de ce fait, une attention très poussée doit être apportée à ces sources potentielles de faiblesse acoustique :

- éviter toute « fuite acoustique » aux joints entre parois, sol et huisseries,
- mettre en place des vitrages et des ouvrants de bonnes caractéristiques d'isolation acoustique,
- traiter les ouvertures par la mise en place de silencieux, tunnels ou rideaux en lanières acoustiques.

Par ailleurs, l'équipement est confiné dans le volume réduit de l'encoffrement et le niveau de bruit dans ce volume est susceptible d'être augmenté de manière importante par les réflexions des ondes sonores sur les parois internes : celles-ci doivent donc être recouvertes de matériaux absorbants.

L'inconvénient principal de l'encoffrement est de limiter l'accès à l'équipement ; cependant, ses performances en atténuation de bruit sont importantes lorsque toutes les précautions de réalisation sont respectées.

Exemple



© Y. Cousson



© Y. Cousson

L'encoffrement de ce centre d'usinage de longues barres métalliques a permis de diminuer le niveau de pression sonore de 21 dB(A) en phase d'usinage. Il permet par ailleurs d'assurer une protection contre les risques mécaniques, les portes d'accès étant asservies aux commandes de la machine.

La réduction du niveau de pression acoustique d'un encoffrement est de l'ordre de :

- 5 à 10 dB(A) pour une enveloppe simple (« capotage »),
- 10 dB(A) à 25 dB(A) pour une paroi simple avec revêtement absorbant,
- plus de 25 dB(A) pour une paroi double avec revêtement absorbant.

5.2. Obstacles : écrans

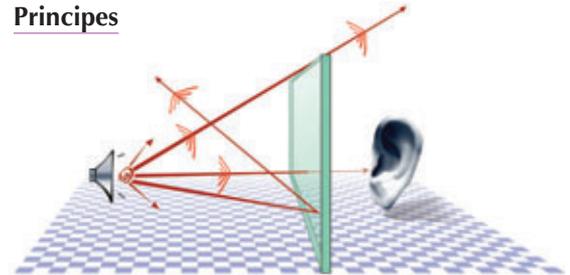
Lorsque la mise en place d'une isolation complète (cloison ou encoffrement) n'est pas possible, pour des raisons d'accès ou de circulation par exemple, on peut envisager de mettre un obstacle sur le trajet de l'onde sonore pour atténuer sa progression : c'est le principe de l'écran.

C'est une paroi éventuellement amovible qui protège le récepteur.

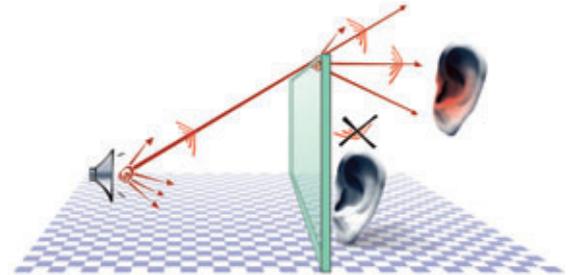
Le gain acoustique d'un tel dispositif est limité ; de ce fait, il n'est pas nécessaire que l'écran ait une masse surfacique élevée. En revanche, un traitement absorbant de la face côté émission évite de créer une nouvelle source apparente de bruit par réflexion.

L'efficacité de l'écran demande de nombreuses précautions, et il faut en particulier que le local soit traité acoustiquement, afin d'éviter les réflexions de celui-ci du côté récepteur.

Principes



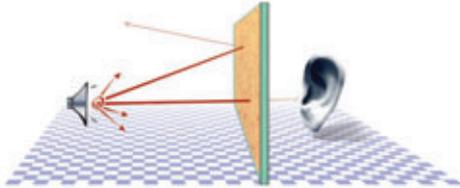
L'écran est un obstacle (cloison amovible) qui permet d'atténuer le niveau sonore reçu.



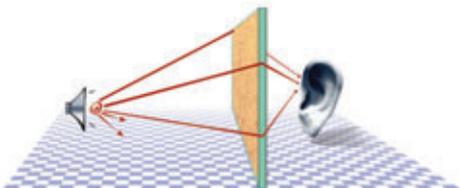
L'effet de diffraction au sommet de l'écran agit comme une source sonore secondaire qui annihile la protection lorsqu'on s'en éloigne.

L'écran protège l'opérateur situé immédiatement derrière ; un écran rapproché de la source et éloigné de l'opérateur est très peu efficace.

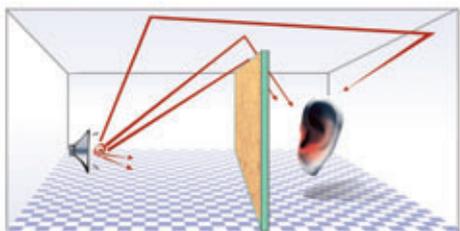
Techniques et précautions



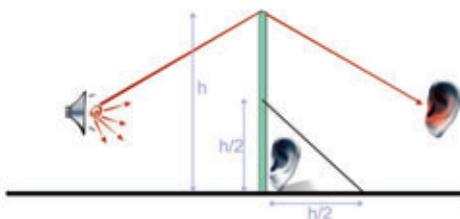
L'atténuation d'un écran dépasse rarement 10dB(A) ; il n'est donc pas nécessaire de le surdimensionner en isolation aérienne. En revanche, un traitement absorbant sur sa face côté source permet de ne pas amplifier le bruit émis.



Il est nécessaire de prendre en compte les dimensions latérales de l'écran pour calculer son effet.



Pour qu'un écran soit efficace, il faut traiter les parois du local ; les réflexions sur celles-ci peuvent atténuer la performance de l'écran jusqu'à 5 dB(A).



Du fait de la diffraction, l'opérateur doit être placé à une distance très faible de l'écran (idéalement, inférieure à la moitié de sa hauteur).

Exemple



© Y. Cousson

Le gain en pression acoustique d'un écran peut varier de 2 dB(A) à 10 dB(A) (local traité). Cette solution apporte également un avantage psychologique, en isolant visuellement les opérateurs de leur environnement.

5.3. Absorption du local

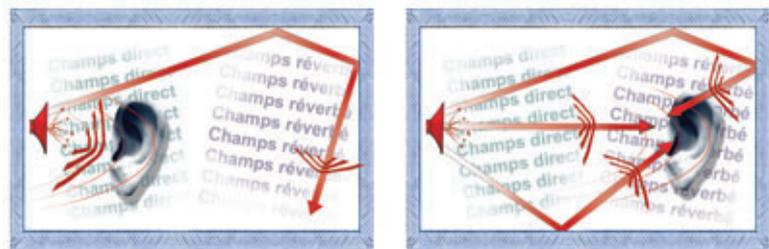
Si l'on considère la multitude des réflexions de la source de bruit sur les parois d'un local, les effets cumulés de celui-ci peuvent être envisagés par une influence globale sur l'ambiance sonore. Cette influence peut être considérée comme une capacité d'amplification du bruit, celle-ci variant selon la proximité de la source sonore.

On distingue ainsi trois zones géographiques :

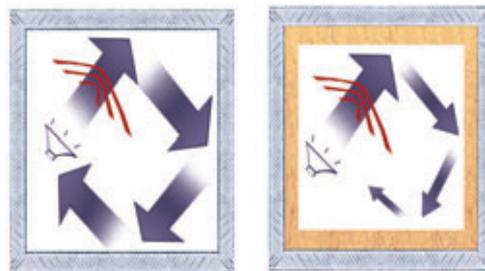
- à proximité de la source, le niveau sonore est principalement dû au bruit qu'elle transmet directement (avant toute réflexion) : on est dans une zone dite de « champ direct » ; l'influence du local est négligeable ; un traitement du local pour un récepteur en champ direct aura donc peu d'effet ;
- loin de la source, la part des réflexions devient prépondérante, à tel point que leur combinaison aboutit à un niveau sonore quasiment constant, même lorsque l'éloignement de la source augmente : on est dans une zone dite de « champ réverbéré » ; c'est dans cette zone que le traitement du local est optimal ;

Principes

Le traitement du local atténue le bruit réfléchi sur les parois.
Il est efficace lorsqu'on est éloigné des sources.



L'influence du local est dominante lorsqu'on est éloigné des sources.

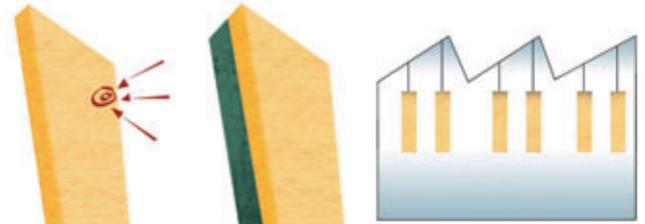


On atténue les réflexions sonores en couvrant les parois de matériaux absorbants.

– on passe progressivement du champ direct au champ réverbéré, dans une zone intermédiaire où l'influence du local va croissant au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source.

L'ordre de grandeur de la limite du champ proche est de quelques mètres de la source si le local est réverbérant, une dizaine de mètres si le local est traité.

Techniques et précautions



Les matériaux poreux (type laine de roche) absorbent les hautes fréquences.

Ils sont posés sur les parois ou suspendus au plafond.



Les panneaux de bois absorbent les basses fréquences.

Ils sont fixés sur les parois via une ossature qui les en sépare, de manière à permettre leur déformation.



Les résonateurs absorbent des gammes de fréquences étroites en basses fréquences.

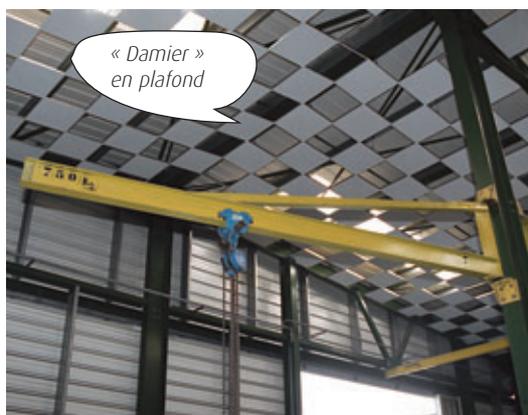
Ils se placent dans l'épaisseur d'une paroi, ou en appendice d'un encoffrement.

Exemple



« Bandes »
sur parois et plafond

© Y. Cousson



« Damier »
en plafond

© Y. Cousson



« Baffles » suspendus
en plafond

© Y. Cousson

La mise en place de matériaux absorbants acoustiques peut être réalisée selon de nombreuses dispositions (surfaces, emplacements, mode de fixation...). Le choix se fait en fonction des objectifs de gain, de la situation acoustique, et des contraintes pratiques.

5.4. Cas des silencieux

L'efficacité d'un silencieux ne commence qu'à son emplacement... Aussi, il est vivement souhaitable de l'installer au niveau de la source de bruit elle-même, afin d'éviter le rayonnement de la conduite entre la source et le silencieux. Cet aspect, ainsi que d'autres présentés en première partie de ce guide, font que cette solution est traitée dans le chapitre 3 « Les actions sur les sources fluides » (§ 3.2).

La propagation aérienne dépend également de l'encombrement du local ; ce critère peut être pris en compte de manière globale dans certains outils de simulation et il l'est implicitement par les mesures sur site. Cependant, l'incidence ponctuelle par rapport à un récepteur donné est plus difficile et peut être significative ; afin d'éviter ceci, il est souhaitable de prendre en compte dans son analyse les installations de grandes dimensions et de les considérer comme des écrans.

Les principes présentés ici éludent un paramètre fondamental : la fréquence du bruit. Les caractéristiques d'absorption (donc de réverbération) et d'isolation varient de manière très importante avec la fréquence. En général, la performance croît globalement lorsque la fréquence augmente, mais il y a toujours des fréquences données de faiblesse acoustique, en particulier en ce qui concerne l'isolation : les parois ont des « fréquences critiques » auxquelles elles sont plus « transparentes » au son. Une étude fiable demande donc à prendre en compte cet aspect fréquentiel.

Cette faible performance des solutions sur la propagation aérienne en basses fréquences fait que, pour ce domaine fréquentiel, les actions à la source (hors silencieux) sont souvent préférables.

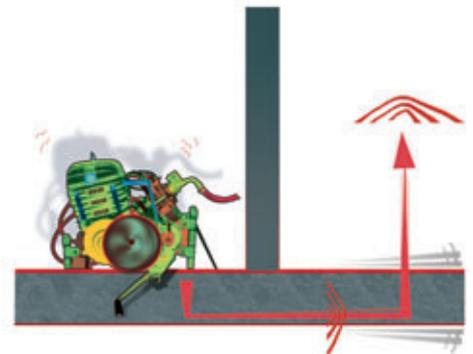
6. Les actions sur la propagation solidienne

L'action la plus efficace pour atténuer la propagation solidienne est l'isolation vibratoire.

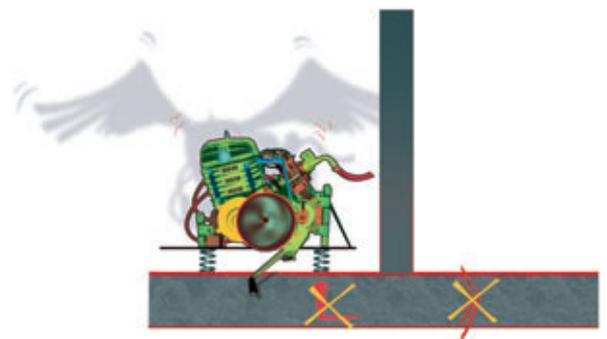
Le but est d'affaiblir le lien entre l'équipement source de vibration et son environnement. On « suspend » l'équipement de telle sorte qu'il se comporte de manière libre et indépendante, sans aucune interaction avec ce qui l'entoure. Pour aboutir à cela, on dispose entre l'équipement et le sol une liaison la plus souple possible (suspension métallique ou élastique) : on est bien entendu limité par le fait que la raideur de cette liaison doit néanmoins être suffisante pour supporter la charge (voir photo).

Pour que l'isolation soit efficace, il faut éviter toute autre liaison rigide entre l'équipement et son environnement : des dispositifs souples doivent donc être prévus au niveau de la fixation des tuyauteries, des structures associées... Il faut également que la structure de part et d'autre de la suspension (châssis machine et dalle) soit suffisamment rigide pour ne pas interagir avec le ressort de la suspension.

Principes

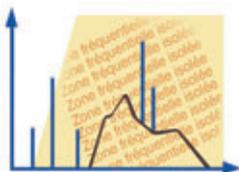


La propagation solidienne se fait par la liaison entre la machine et le sol.



On supprime la propagation solidienne en « suspendant » la machine sur des liaisons souples : c'est l'isolation vibratoire.

Techniques et précautions



Identifier la fréquence la plus basse à isoler.



S'assurer de raideurs amont/aval suffisantes.



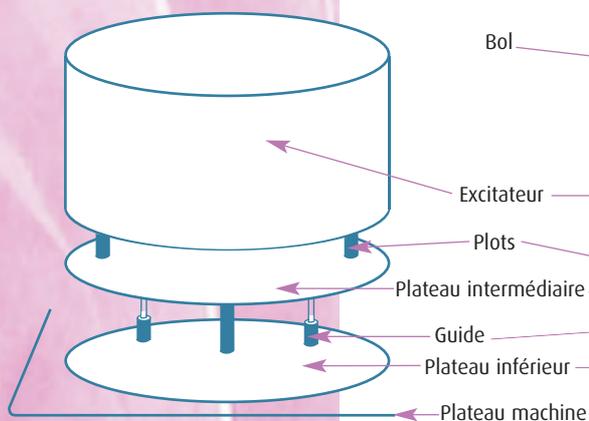
© Y. Cousson

Exemple de suspension élastique

Le résultat du montage permet d'obtenir une isolation vibratoire à partir d'une certaine fréquence calculée à partir des caractéristiques de masse de la machine et de raideur des suspensions. Il faut donc s'assurer que la suspension choisie ait les caractéristiques telles que la fréquence à isoler la plus basse soit bien dans la zone d'isolation.

Le montage isolant aboutit à la création d'un nouveau système mécanique constitué par la masse de la machine et le ressort de la suspension : on crée de ce fait une fréquence propre du montage isolé. Celle-ci régit la loi fréquentielle de l'isolation, qui fait que théoriquement on n'atténue les efforts vibratoires qu'à partir de 1.4 fois la fréquence propre ; ils sont amplifiés en dessous, et l'atténuation croît ensuite avec la fréquence – jusqu'à atteindre en hautes fréquences les résonances des suspensions. En toute rigueur, une étude d'isolation vibratoire devrait prendre en compte les 6 fréquences propres du montage correspondant à ses 6 possibilités de mouvement d'ensemble (3 translations et 3 rotations), et idéalement le comportement dynamique des structures de part et d'autre. Dans la réalité industrielle, seul un calcul simple basé sur la seule fréquence propre de translation verticale est effectué : il convient à une première approche, mais doit être complété dans le cas de situations jugées critiques.

Exemple



© Cebal

Sur ce bol vibrant, le remplacement des suspensions par des plots plus adaptés a permis d'accroître l'isolement vibratoire de l'équipement. Le gain est double : au niveau de l'exposition vibratoire de l'opérateur proche, et au niveau de la propagation solidienne via le sol.

7. Les actions sur la réception

7.1. Cabines

Le principe de la cabine est identique à celui de l'encoffrement, à ceci près qu'au lieu d'enfermer la source, on enferme le récepteur pour le protéger. Cette solution est donc également performante au niveau du gain acoustique, mais elle n'est bien sûr envisageable que pour un poste sédentaire : des sorties répétées de la cabine amènent à une exposition sonore élevée qui contribue fortement à l'exposition totale sur la journée de travail.

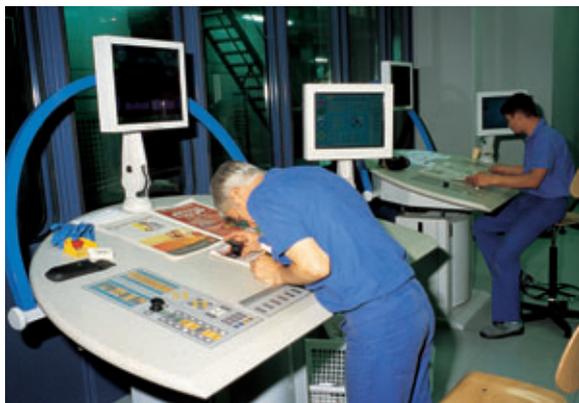
Les spécificités de la cabine par rapport à l'encoffrement sont les suivantes :

- il est souvent souhaitable de prévoir un dispositif de communication avec l'opérateur situé à l'intérieur ;
- il est possible d'isoler la cabine d'un point de vue solidien pour protéger l'opérateur des vibrations extérieures.

Exemple



© P. Béranger



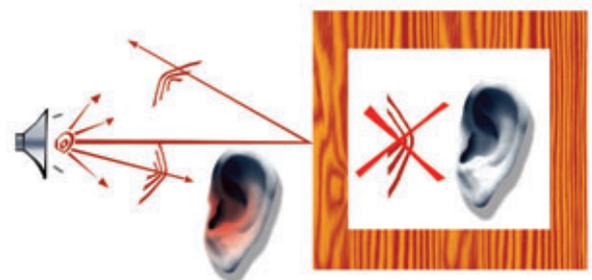
© P. Béranger

Lors de la conception de cette cabine, traitée acoustiquement à un poste de commande de rotative, on a prévu des parois vitrées pour la surveillance de la machine, un dispositif « passe-plat » pour récupérer des journaux sans sortir de la cabine et un sas d'entrée.

Techniques et précautions

- ▶ La conception d'une cabine suit les principes de l'isolation aux bruits aériens ou de l'encoffrement :
 - prêter attention aux faiblesses acoustiques de certains éléments, s'assurer de bonnes performances d'isolation,
 - colmater les fuites,
 - mettre à disposition des moyens de communication.
- ▶ Des dispositifs spécifiques peuvent être prévus : ventilation, chauffage ou climatisation, communication...

Principes



« Enfermer » l'opérateur : la cabine.



La cabine elle-même peut être isolée d'un point de vue vibratoire.

Techniques et précautions

- ▶ Les critères de choix sont multiples :
 - durée et continuité de port,
 - environnement,
 - facteurs humains,
 - critères acoustiques (fréquence et niveau).
- ▶ L'atténuation effective d'un PICB est toujours inférieure à l'atténuation mesurée en laboratoire et indiquée sur la notice.
- ▶ Pour un bruit ambiant de 100 dB(A) pendant 8 heures, avec un PICB ayant une atténuation effective de 30 dB(A) :
 - si le PICB est porté 8 heures, l'exposition est de 70 dB(A),
 - s'il est porté 7 h 59, l'exposition est de 75 dB(A),
 - s'il est porté 7 h 30, l'exposition est de 88 dB(A).

7.2. Protecteurs individuels contre le bruit (PICB)

Les principes de base de la prévention veulent que la protection collective soit prioritaire par rapport à la protection individuelle : les PICB ne sont donc à utiliser qu'en complément de mesures de protection collective, ou en dernier recours en l'absence d'autre moyen de réduction de l'exposition sonore.

Mais ceci est particulièrement vrai pour le domaine du bruit. En effet, la performance effective du PICB, quel qu'en soit le type, est fortement atténuée par des paramètres courants :

- la durée du port : le PICB doit être porté en permanence, sinon son efficacité est considérablement réduite. Or, l'opérateur est souvent amené à ôter cet équipement pour des périodes courtes, soit pour discuter, soit par gêne momentanée.
- les conditions de port : une mauvaise mise en place du PICB, ou un changement de position occasionné par un geste quotidien, génèrent des « fuites acoustiques » qui peuvent atténuer considérablement sa performance.

Principes

- ▶ Le PICB est une protection physique placée au niveau de l'oreille externe qui atténue la transmission aérienne du bruit.
- ▶ Il existe une grande diversité de PICB : il faut adapter le choix aux conditions d'exposition et à l'opérateur, en prenant en compte ses souhaits, même subjectifs.



Les protecteurs munis de coquilles sont plus adaptés à des ports intermittents.



Les bouchons d'oreille sont plus adaptés à des ports continus ; ils peuvent être « moulés sur mesure ».



Certains protecteurs équipés électroniquement permettent un contrôle actif du bruit. Un système de communication par radio peut être intégré à certains PICB.

Exemple



© P. Bérenger

L'équipement de sécurité de ce chaudronnier l'amène à utiliser des protecteurs de type « bouchon d'oreille » plutôt que des « coquilles » incompatibles avec le port du masque.

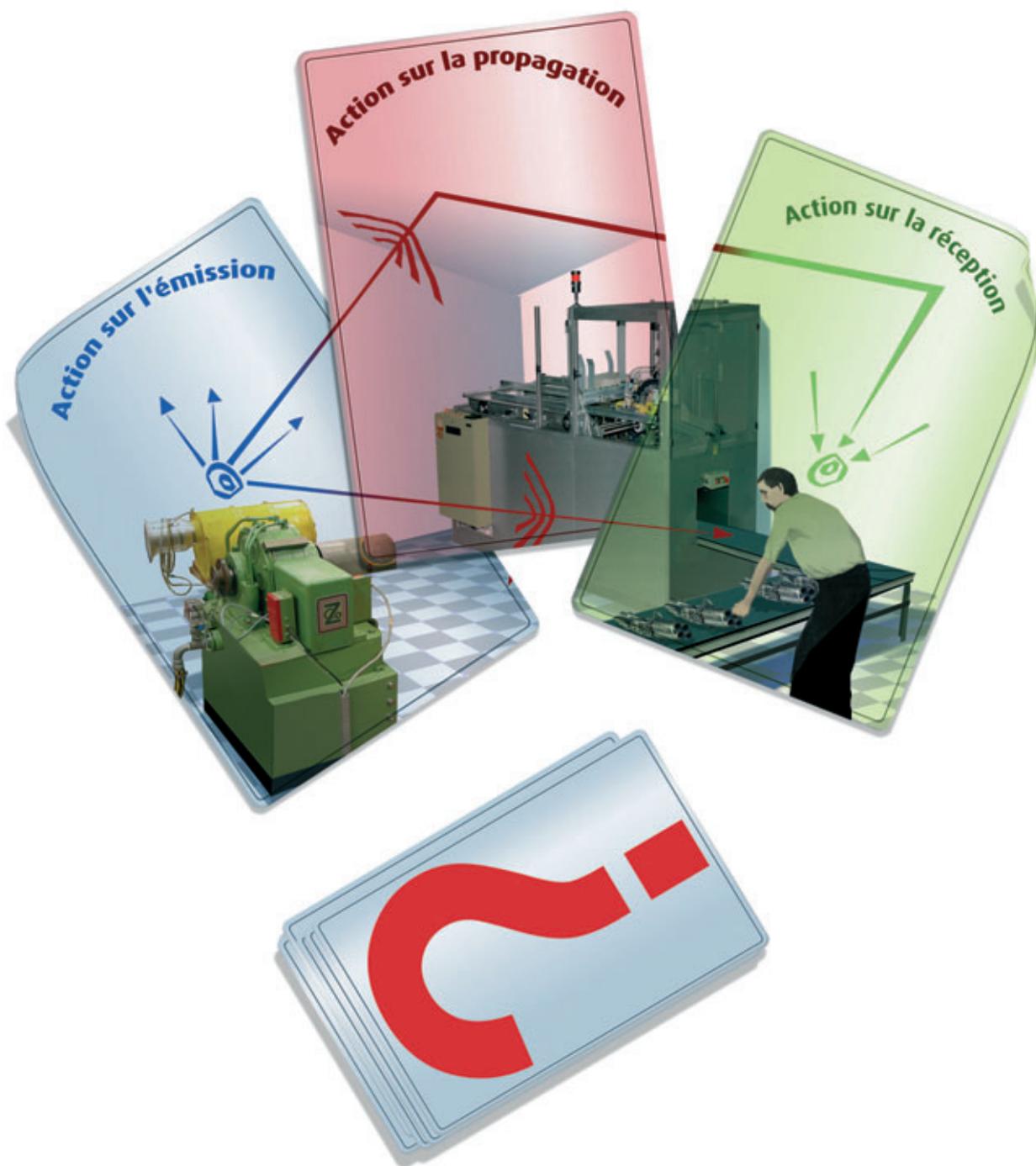
Si le choix de PICB s'avère nécessaire, il faudra donc s'assurer au moins des garanties suivantes :

- l'opérateur est associé au choix du PICB : l'équipement doit être pleinement accepté, tant il est vrai que le meilleur EPI est... celui qui est porté ! La gamme des PICB est suffisamment vaste pour en trouver un qui satisfasse les contraintes sonores et le confort de l'opérateur ;
- l'opérateur est formé au port du PICB, et aux effets affectant son efficacité.

Ici aussi, pour la cabine comme pour le PICB, l'efficacité dépend de la fréquence ; la notion d'atténuation globale, quelle que soit la situation sonore, est abusive. Elle n'a pas de sens pour des expositions sonores de répartitions fréquentielles différentes. Une étude confrontant le spectre d'émission et le spectre d'atténuation du protecteur, pour calculer l'exposition réelle résultante, est très souhaitable.

3

Méthodologie Choix des solutions



« Que choisir : action sur l'émission, sur la propagation ou sur la réception ? »

Introduction

L'objectif de cette partie est de répondre à la question : « Parmi toutes les solutions existantes, laquelle choisir ? ».

Il n'est pas facile de proposer une démarche d'analyse qui soit universelle : toutes les situations sont particulières et l'impact de chaque solution dépend grandement du contexte de sa mise en œuvre. Prendre en compte (presque) toutes les possibilités amène à proposer une démarche lourde. Construire une démarche très générale amène peu d'aide à qui veut être guidé.

Nous proposons une approche qui recherche un équilibre entre ces deux directions. Elle se décompose en deux phases :

🌀 Un diagnostic de la situation permet de poser les bases du problème : sa gravité, les opérateurs et installations concernés, le rôle du local.

Ceci suppose au préalable de déterminer la configuration de fonctionnement du lieu de travail à prendre en compte : quelles conditions de production, quelles tâches des opérateurs...

Cette phase est mise à profit pour déterminer des paramètres qui seront utilisés pour la recherche de solutions.

Suite à ce diagnostic, les couples « émetteur/récepteur » à traiter sont identifiés.

🌀 Le choix des solutions est ensuite structuré selon des principes exposés dans ce guide : actions sur l'émission, la propagation et la réception, déclinaison selon la nature aérienne ou solidienne du problème.

On distingue les *actions génériques*, qui donneront un résultat positif, quel que soit le contexte, et les *actions spécifiques*, pour lesquelles le contexte est déterminant. Pour chaque action, le choix du lecteur est orienté à partir d'éléments favorables ou défavorables à prendre en compte, déterminés à partir de l'analyse de sa propre situation, ou des éléments issus de la première phase.

La démarche proposée se réfère à des lieux de travail existants. Sa logique peut néanmoins être utilisée dans le cadre d'analyses prévisionnelles, à la différence près que les outils d'investigation seront des logiciels de simulation au lieu d'appareils de mesure.

Par ailleurs, nous nous sommes placés dans une situation « moyenne » de lieu de travail : un atelier de grandes dimensions, avec des niveaux sonores élevés. La logique de la démarche peut néanmoins être transposée à des situations différentes (bureau...).

1. Diagnostic et préanalyse

1.1. Conditions d'activité de l'entreprise



Sonomètre intégré



Exposimètre

Les conditions d'activité de l'entreprise sont très influentes sur l'ambiance sonore de ses lieux de travail. Aussi, dès le début de la démarche, il faut définir les situations pertinentes par rapport à l'objectif de réduction du bruit :

- les plus fréquentes,
- les plus bruyantes...

Les paramètres à prendre en compte sont divers :

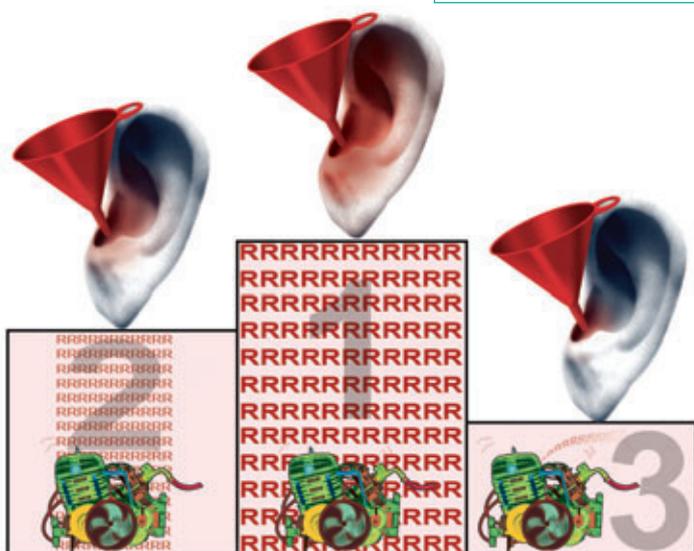
- taux d'activité,
- types d'opérations de production (variabilité des conditions de productions),
- variation des tâches des employés (variabilité des tâches et des situations),
- fonctionnement des installations bruyantes...

1.2. Évaluation des expositions

Il s'agit ici essentiellement de déterminer les travailleurs les plus exposés pour lesquels il faut agir et estimer leur niveau d'exposition. Une mesure précise de l'exposition quotidienne ($L_{Ex,d}$) n'est pas forcément nécessaire. En général, une action de réduction du bruit n'est entreprise que lorsqu'un problème est déjà identifié. Il s'agit donc plutôt de procéder à des mesures de bruit ambiant (au sens normatif, c'est-à-dire niveau au poste de travail exprimé en $L_{Aeq,T}$) aux emplacements et pour des conditions d'opérations jugées représentatives du problème.

Celles-ci doivent permettre :

- de localiser les postes à problème ;
- de hiérarchiser les différentes situations à traiter, pour établir des priorités d'action ;
- d'avoir un ordre de grandeur du gain recherché pour un seuil d'exposition donné, de manière à dimensionner ensuite les solutions à mettre en œuvre.



Hiérarchisation des récepteurs à traiter.



Des mesures d'exposition quotidienne permettent d'obtenir des résultats plus objectifs et une quantification plus fiable. Il existe deux méthodes :

- *l'exposimétrie individuelle* : il s'agit d'enregistrer en continu le niveau sonore sur un exposimètre porté par l'opérateur. Elle prend en compte toutes les conditions réelles sur la journée, donne une valeur globale et une évolution des niveaux dans le temps. Cependant, elle génère des incertitudes et erreurs liées aux accidents de mesure (chocs du micro ou du boîtier, frottements du micro sur tissu...) : le mesurage n'est généralement pas maîtrisé ;
- *la sonométrie* : la mesure est pilotée par un spécialiste qui identifie les tâches et les opérations et repère les événements significatifs. Son inconvénient est la représentativité des durées d'échantillonnage.

Cet état des lieux d'exposition peut aller de simples mesures aux postes identifiés préalablement à l'étude, à la mesure précise de l'exposition de chaque groupe d'opérateurs, incluant le repérage (localisation) des principales sources participant à cette exposition. Cette deuxième possibilité comporte les avantages de ne pas faire d'impasse, et de donner des informations géographiques sur les sources prépondérantes et les propagations probables de bruit ; elle facilite et améliore la fiabilité du croisement « source/récepteur » (voir § 1.5), qui est un point essentiel du diagnostic. Par rapport à une cartographie systématique réalisée sur un maillage géométrique de l'atelier, cette méthode a l'avantage de donner les résultats à l'emplacement même des postes de travail.

1.3. Qualification du local

Il s'agit de déterminer si, a priori, un traitement acoustique du local est nécessaire.

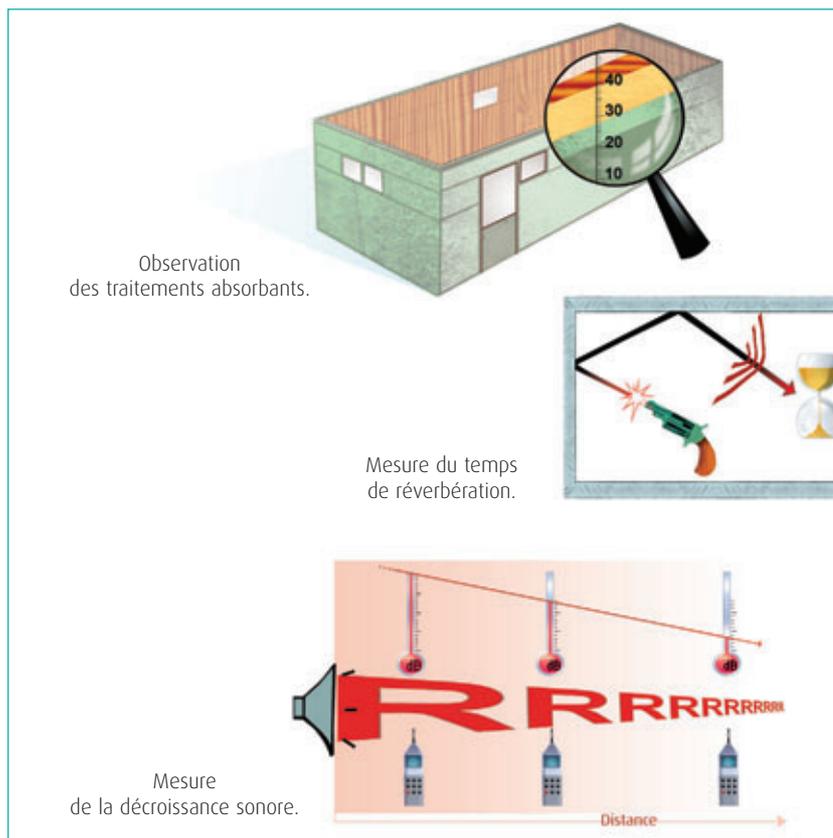
Une première inspection visuelle permet déjà de déterminer si le local est déjà traité ou non : parois recouvertes de matériaux absorbants, présence de baffles suspendus... A contrario, certains éléments visuels argumentent sur la nécessité de traiter le local : grandes surfaces vitrées, murs peints...

Si le local n'est pas traité ou s'il est suspecté de devoir l'être, une qualification chiffrée s'impose.

Cette qualification du local se fait par rapport à un critère adapté : c'est la décroissance sonore DL pour les locaux industriels. Dans d'autres cas particuliers (cantines, bureaux, ateliers de petites dimensions...), c'est le temps de réverbération T_r . Les valeurs de référence du paramètre DL sont données par la législation.

La mesure de la DL a l'avantage de donner des informations chiffrées sur la décroissance sonore au sein du local, et de la part de celui-ci dans l'amplification sonore, donc du gain potentiel maximum que l'on obtiendrait par son traitement. Elle nécessite en revanche un équipement spécifique, en particulier au niveau de la source sonore à utiliser pour l'essai.

La mesure des deux critères est facilitée lorsque le local est silencieux, donc toutes les installations à l'arrêt.



Des outils de simulation performants et fiables existent pour calculer ces paramètres à partir de données simples : géométrie du local, matériaux des parois et/ou coefficients d'absorption des revêtements acoustiques. La simulation a l'avantage de ne pas nécessiter de mesure (et d'arrêt de l'atelier), mais aussi de pouvoir comparer des solutions et estimer leur impact, ce qui permet de les optimiser. L'optimisation consistera à prévoir la surface nécessaire de matériaux à mettre en place, aux endroits judicieux. La fiabilité de la simulation est essentiellement liée à la fiabilité des données saisies dans le logiciel : par exemple, il est difficile de prendre en compte de manière fiable un encombrement de local.

1.4. Identification des sources de bruit

Cette étape se fait en deux temps :

- repérage des sources de bruit : quelles sont les sources bruyantes par rapport aux postes à traiter identifiés précédemment ?
- quel est le niveau sonore de ces sources ?

Les sources bruyantes sont souvent connues des opérateurs. Des mesures sonométriques simples, réalisées à proximité de ces sources, permettent de confirmer ces intuitions.

L'estimation du niveau de pression acoustique émis par les sources est plus délicate : les mesures effectuées pendant que l'atelier fonctionne sont parasitées par le bruit provenant des autres sources.

La procédure la plus souhaitable est d'arrêter toutes les sources de bruit, sauf celle qui nous intéresse. Le niveau à prendre en compte pour la suite de l'analyse est, par exemple, le niveau à 1 mètre de la machine en direction du point de réception traité.



Les solutions alternatives sont les suivantes :

- recherche du niveau sonore dans les documents techniques de l'installation : le niveau de pression acoustique au poste de travail L_{pA} doit être indiqué par le fournisseur de la machine dès lors qu'il dépasse 70 dB(A), donc pour les machines bruyantes. Ce paramètre peut être utilisé pour la suite de l'étude ;
- utiliser des méthodes de mesure qui permettent de s'affranchir, dans une certaine mesure, des perturbations sonores ambiantes : c'est le cas de l'intensimétrie.

Le repérage des sources sonores prépondérantes pour un point de réception (un poste) donné peut être réalisé par la mise en œuvre de mesures adaptées utilisant le principe de l'antennerie (voir partie 4). Cette méthode est lourde mais permet de faire une analyse objective. Elle a également l'avantage de hiérarchiser directement les sources en cause, y compris dans certains cas les sources lointaines qui suivent des chemins indirects (réfléchis).

1.5. Croisement sources/récepteurs

Il s'agit de ramener la situation de l'atelier à des cas élémentaires de source/récepteur, sur lesquels on peut appliquer le schéma de décomposition du problème « émission/propagation/réception ».

Les sources prépondérantes ayant été identifiées, déterminer les postes récepteurs de ces sources, parmi ceux qui ont été identifiés dans l'analyse des expositions, permet de répondre à la question : quels opérateurs sont atteints par cette source ?

Ici aussi, la solution préférable est de procéder à des arrêts de sources. Deux démarches sont possibles :

🔍 mettre à profit les essais précédents de détermination des niveaux des sources : pour chaque installation seule en fonctionnement, effectuer les mesures de réception à tous les points envisagés ;

🔍 arrêter les sources pressenties une par une et vérifier que la chute de niveau au poste est significative. Il est difficile de mener cette opération de manière directement efficace, car il faut déterminer une machine dominante parmi un certain nombre. On peut procéder de la manière suivante :

- n'arrêter que les sources dominantes identifiées (voir § 1.4),
- noter la baisse de niveau à chaque arrêt de source,

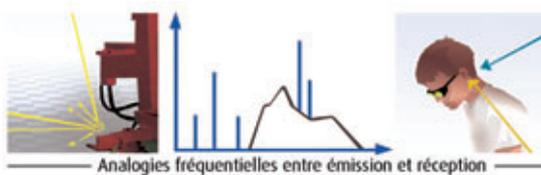
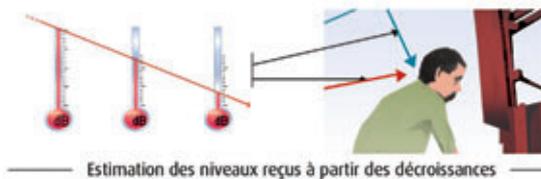
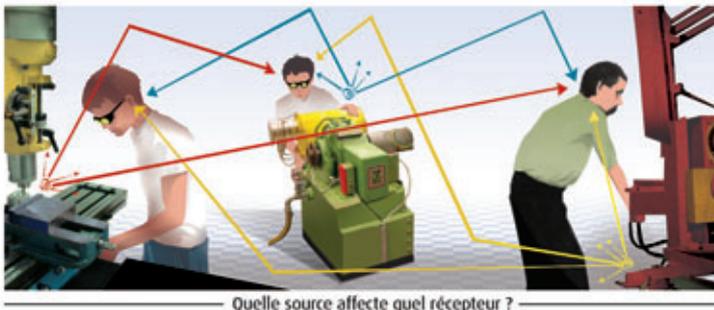
- dès que la baisse de niveau cumulée devient significative [de l'ordre de 8 dB(A)], le traitement de la machine ou des machines arrêtées est susceptible de s'avérer très profitable.



Un calcul approché peut être réalisé en appliquant la loi de décroissance mesurée précédemment au niveau d'émission :

$$\text{réception} = \text{émission} - \text{décroissance}$$

Le résultat donne le niveau de chaque source pour chaque récepteur, et permet de classer ainsi les sources prépondérantes pour chacun.



Quelques méthodes d'identification.

Plusieurs méthodes de mesure sont utilisables pour croiser les récepteurs et les sources en cause :

- comparer les spectres acoustiques à proximité des sources et du récepteur : certaines zones fréquentielles, voire manifestations spectrales (raies ou familles de raies), peuvent être identifiées comme spécifiques à une source et se retrouver au niveau du récepteur. Cette méthode peut être réalisée en tiers d'octave, mais elle sera encore plus efficace en bandes fines ;
- comparer les signaux temporels des bruits à proximité des sources et du récepteur : ceci permet essentiellement de repérer l'impact des sources transitoires ;
- l'identification des signaux spectraux ou temporels à un équipement donné est facilitée par la mesure vibratoire : en effet, une mesure vibratoire effectuée sur une machine garantit dès les moyennes fréquences que le signal mesuré provient bien de la machine elle-même. Il est très peu perturbé par les machines voisines ;
- utiliser l'antennerie comme présentée au § 1.4 « Identification des sources de bruit ».

1.6. Résultats de la préanalyse

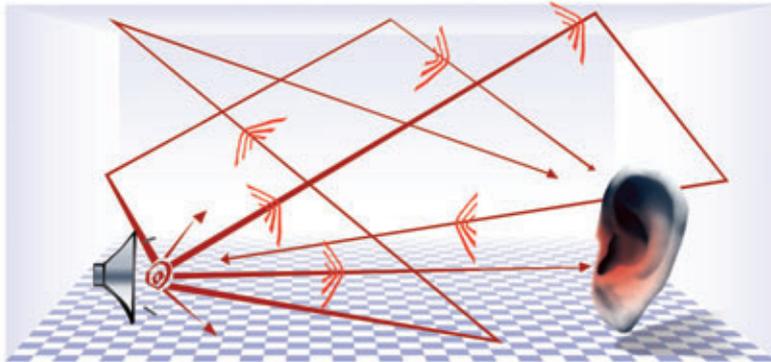
Après cette première phase, la synthèse des éléments disponibles est la suivante :

📍 état des lieux :

- nécessité ou non de traiter le local,
- identification des opérateurs concernés et des postes à traiter,
- identification des couples « source/poste »,
- liste de sources impactant chaque poste ou inversement liste de postes impactés par une source,
- hiérarchisation des actions à entreprendre.

📊 données chiffrées :

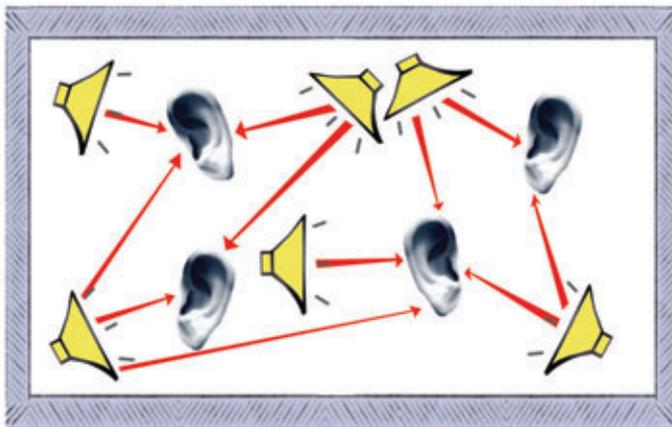
- objectifs de gain par poste,
- niveau d'émission des sources,
- localisation des postes,
- localisation des sources (dans l'absolu, et distance par rapport aux postes),
- selon la méthode de caractérisation du local utilisée, loi de décroissance sonore du local.



Nécessité ou non de traiter le local ; loi de décroissance.

Récepteurs par niveau d'exposition	Sources par niveau d'émission		
	Source 1	Source 2	Source 3
Récepteur 1			
Récepteur 2			
Récepteur 3			

Croisement sources/opérateurs et niveaux sonores.



Repérage des sources et récepteurs et liens mutuels.

2. Choix des actions de réduction du bruit

2.1. Les actions amont et à la source : des solutions génériques

Les actions amont et les actions à la source ont ceci de commun qu'elles amènent un résultat positif, quel que soit le contexte du problème : en effet, elles agissent indépendamment de la propagation entre la source et le récepteur. Par exemple, une source moins bruyante contribuera toujours à diminuer la réception, quelle que soit la nature de sa propagation et l'influence du local. On peut donc les appeler « solutions génériques ». Les inconvénients associés font cependant que leur mise en œuvre est encore peu répandue :

- elles sont souvent lourdes à entreprendre, du point de vue financier ou organisationnel ;
- elles affectent le procédé, qui reste prioritaire ;
- elles nécessitent une maîtrise importante des installations, ce qui n'est pas toujours le cas, la conception ou la garantie de ces installations étant souvent le fait d'un tiers ;
- elles demandent parfois des moyens et méthodes d'analyse encore peu courants pour déterminer les solutions efficaces.

Cependant, elles restent à envisager tant les résultats sont positifs :

- 🔴 elles ont, comme nous l'avons dit, un impact positif assuré en niveau sonore ;
- 🔴 cet impact positif affecte la plupart du temps plusieurs salariés en même temps ;
- 🔴 elles s'accompagnent souvent de progrès sur des plans autres que le bruit :
 - diminution d'autres nuisances,
 - amélioration du procédé,
 - amélioration de la qualité,
 - gains de maintenance...

Les éléments liés au contexte du travail peuvent être plus ou moins favorables à leur mise en œuvre ; le *tableau 1* présente des critères permettant d'orienter le choix.

Les critères de choix sont soit techniques (du point de vue acoustique), soit liés au contexte industriel du problème.

La plupart des critères techniques ont été déterminés dans la démarche de préanalyse : prépondérance de la source, nombre et emplacement des sources et des récepteurs en cause.

Il reste à déterminer trois points :

- la zone fréquentielle du problème,
- sa prépondérance à une fréquence donnée (bande fine),
- le caractère impulsionnel du problème.

Tableau 1 – Éléments de choix entre les actions amont et les actions à la source (*)

Paramètre	Amont	Source (équipement déjà en place)	Commentaire
Installation nouvelle	+++	+	Facilité d'approvisionnement des équipements silencieux et d'optimiser l'aménagement par simulation
Mauvais état de la source (équipement)	+	+++	À détecter en préalable à toute autre action
Accès machine fréquent	++	+++	L'action à la source n'implique pas de contraintes d'accès ; un aménagement de l'atelier reste possible
Problème basses fréquences	++	+++	Les actions liées à la propagation aérienne sont peu efficaces en BF
Problème « bande fine »	+	+++	Ce type de problème est souvent lié au fonctionnement même de la machine
Source prépondérante	+	+++	L'amélioration de la source a un impact multiplié
Sources nombreuses	+++	+	Les autres solutions impliqueraient la multiplication des actions
Sources dispersées	+++	+	Idem
Récepteurs nombreux pour une même source	++	+++	L'amélioration de la source a un impact multiplié
Bruit impulsionnel	+	+++	L'origine du problème est plus facile à identifier sur la source même ; les niveaux souvent élevés sont difficiles à traiter par d'autres solutions
Postes de travail indépendants	+++	+	Organisation du travail facilitée

(*) Notations
 +++ : solution à envisager en priorité, résultats positifs très probables.
 ++ : recommandé, mais dépend du contexte ou d'autres solutions sont préférables.
 + : non recommandé dans le cas général, mais possible dans certains cas.

La zone fréquentielle du problème se détermine par une mesure au point de réception par bandes d'octaves ou de tiers d'octaves ; la figure 1 donne une notion de la répartition des domaines basses, moyennes et hautes fréquences.

Il est difficile d'estimer si une fréquence pure est dominante sans mesure spécifique ; mais les appareils qui permettent la mesure adéquate sont encore assez peu répandus dans le domaine du bruit. Les éléments auxquels se référer sont, éventuellement, un tiers d'octave très dominant (de plus de 6 dB par rapport aux tiers d'octave voisins), voire le jugement humain : le son semble-t-il « pur », comme un sifflement, un bourdonnement... ?

Le caractère impulsionnel est, lui, facilement discernable à l'oreille (bruit bref et intense, éventuellement répété : jet de gaz comprimé, martelage...).

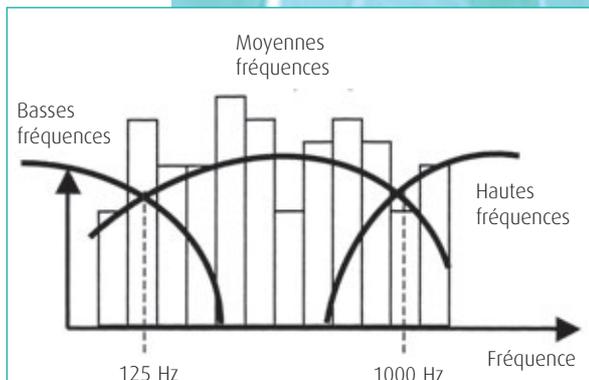


Figure 1



L'utilisation de l'analyse spectrale en bandes fines est l'outil qui permet de déterminer directement la répartition fréquentielle du problème et la dominance éventuelle de fréquences pures.

En cas de doute, le caractère impulsionnel du problème peut être mis en évidence par analyse temporelle, c'est-à-dire le tracé de l'évolution du signal sonore dans le temps, avec une échelle de temps adaptée (voir partie 4). Par ailleurs, le traitement de l'analyse temporelle permet de quantifier la participation des phénomènes impulsionnels sur l'exposition globale.

2.2. Les actions liées à la réception

Les actions liées à la réception pourraient également être considérées comme actions génériques en ce sens que, en ce qui les concerne également, leur résultat est toujours positif sur la diminution de l'exposition sonore, quel que soit le contexte (dès lors que leur mise en œuvre est correcte).

Nous les considérons à part dans la mesure où :

- elles ont moins de résultats positifs connexes, en dehors du gain acoustique, que les actions génériques traitées précédemment ;
- elles sont très sensibles aux conditions de leur mise en œuvre. En particulier, il suffit que leur usage soit négligé pendant un temps très court d'exposition (enlèvement d'un protecteur individuel contre le bruit (PICB), sortie d'une cabine) pour que leur impact positif soit considérablement réduit (voir partie 2, § 7.2) ;
- les solutions individuelles sont toujours à envisager après les solutions collectives.

Cependant, la cabine jouant physiquement sur la propagation aérienne, elle est traitée par la suite parmi les choix de ce type de solutions (*tableau 2*). Nous rappelons enfin que les PICB sont considérés comme la solution de dernier recours.

La solution PICB comporte de plus la difficulté de l'évaluation de son effet réel in situ par rapport à son efficacité théorique : en effet, outre sa durée de port, son efficacité peut diminuer considérablement en fonction des conditions de port (mauvaise mise en place, modification de position pendant la tâche...) et des conditions d'exposition (en particulier répartition spectrale de celle-ci).

2.3. Les actions liées au type de propagation

Les actions sur la propagation aérienne sont aujourd'hui les plus couramment mises en œuvre. Leur efficacité n'est cependant pas systématiquement garantie, et dépend fortement du contexte du problème. Il est donc nécessaire de donner ici des éléments permettant d'orienter l'intervenant vers les solutions à envisager en priorité.

Quelle est la part de la propagation solidienne ?

La question préalable est de déterminer si la principale propagation est de nature aérienne ou solidienne.

La propagation aérienne est toujours présente, et elle est très souvent prépondérante ; cependant, certaines situations peuvent amener à suspecter une participation solidienne significative :

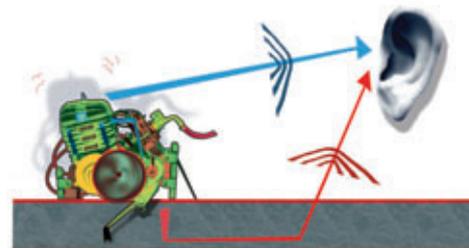
- lorsque les sources en cause ont un fonctionnement alternatif à va-et-vient (presses, moteurs thermiques, compresseurs à piston, métiers à tisser...) et génèrent des efforts importants ;
- lorsque des vibrations sont ressenties autour de l'équipement ;
- lorsqu'un bourdonnement en basses fréquences est entendu, même à une distance éloignée ;
- lorsque le bruit de l'équipement est entendu dans des locaux éloignés et séparés.

La méthode suivante est préconisée :

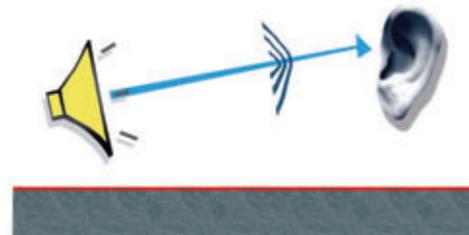
- on mesure l'émission sonore de la source en cause (source réelle) et la réception en des points choisis ;
- on arrête la source réelle ; on met en place au même endroit une source aérienne pure (hauts parleurs par exemple), qui ne génère pas de bruit solidien ;
- on mesure l'émission de cette source aérienne et la réception, aux mêmes points qu'initialement ;
- on déduit de cette mesure la transmission aérienne entre source et réception (émission – réception) ;
- on soustrait cette transmission aérienne du niveau de la source réelle : on en déduit la part de la réception aérienne par rapport à la source réelle ;

f - la part de la propagation solidienne est la différence entre la réception réelle et la réception aérienne.

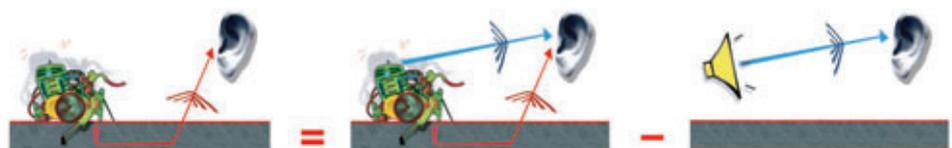
Dès lors que la part de la réception solidienne est significative (si elle est par exemple supérieure ou égale au niveau global de réception aérienne), une action d'isolation vibratoire est à envisager.



Mesure de la réception
avec émission de la source réelle.



Mesure de la réception
avec une source aérienne pure.



La part de la transmission solidienne est la différence entre la transmission globale et la transmission aérienne.

Détermination de la part des propagations solidiennes.



Une alternative assez utilisée est la mesure de la propagation de la vibration de la machine au point récepteur. Ce n'est pas une méthode fiable. En effet, le niveau vibratoire en chaque point dépend beaucoup de la propension à vibrer de ce point (le comportement dynamique de la structure correspondante). De plus, une structure a tendance à se déformer selon des allures spécifiques, qui font que des points proches peuvent plus ou moins vibrer (comportement modal) : il est par exemple courant qu'une rambarde éloignée d'une machine vibre plus que le socle de celle-ci. Par ailleurs, on ne peut pas faire un lien simple entre vibration et bruit (entre le niveau vibratoire d'un mur par exemple et le niveau sonore qu'il émet), et donc émettre un avis sur l'importance de la vibration au point de réception. Ce n'est que l'intuition de l'opérateur qui permettra de porter un jugement.

La simulation permet ici aussi d'augmenter les performances de l'analyse : il s'agit de modéliser le local et la source en cause et de calculer le niveau sonore au point de réception. Le calcul ne prend en compte que les propagations aériennes. On obtient donc directement la transmission aérienne et on atteint directement l'étape « e » de la méthode. L'avantage est de mieux prendre en compte la directivité de la source réelle (si le logiciel le permet) et de s'affranchir des effets de la directivité de la source aérienne d'essai, qui peut avoir une influence significative en fonction de la configuration du local.

Quel choix parmi les actions sur la propagation aérienne ?

Les solutions liées à la propagation aérienne sont de loin les plus appliquées aujourd'hui dans le monde industriel, même si les actions à la source, encore méconnues, ont tendance à se développer avec la popularisation des techniques d'investigation et l'efficacité qu'elles apportent. On retrouve :

- le traitement du local par mise en place d'absorbants,
- le cloisonnement,
- l'encoffrement,
- l'écran,
- la cabine : comme indiqué dans le § 2.1 concernant les actions génériques, la solution « cabine » a été intégrée dans le tableau 2.

Ces solutions sont nombreuses et de nature analogue, il est parfois difficile de déterminer laquelle choisir. Le *tableau 2* présente des critères qui permettent d'orienter ce choix.

Les critères techniques ont été déterminés dans la démarche de préanalyse (voir § 2.1.)

L'utilisation de logiciels de simulation s'avère ici un outil précieux : en effet, l'impact de chaque solution peut être évalué par calcul, ainsi que les combinaisons de plusieurs solutions. Cette approche est donc vivement conseillée.



Tableau 2 – Éléments de choix de solutions (*)

Avertissement

Chaque situation réelle est spécifique et nécessite une analyse particulière. Ce tableau est à considérer comme une aide à la réflexion et non pas comme une préconisation universelle.

	Local (absorption)	Cloisonnage^(**)	Encoffrement (source)	Écran	Cabine (opérateur)	Justification	Limites
Objectif de gain important (environ 20 dB)	-	+++	+++	-	+	Les solutions retenues permettent une séparation physique totale entre source et récepteur.	La cabine n'est efficace que si l'opérateur y reste de manière permanente.
Objectif de gain modéré (moins de 10 dB)	++	+++	+++	+	+	Les gains réels d'un écran sont faibles.	Attention aux contraintes de l'encoffrement.
Source prépondérante	+	+++	+++	-	+	Les actions circonscrites à la source sont plus efficaces.	Écran acceptable si récepteur très proche et plafond traité.
Sources nombreuses	+++	+++	++	--	++	Cloisonnage favorable si possibilité de regroupement de sources.	Encoffrement efficace mais coût élevé. Cabine efficace si tous opérateurs concernés dedans de manière permanente.
Sources dispersées	+++	-	++	--	+	Le traitement du local a l'avantage d'être un traitement d'ensemble.	La multiplicité des sources peut entraîner un coût élevé pour le nombre d'encoffrements.
Sources groupées	++	+++	+	+	+	Cas idéal du cloisonnage.	Le traitement du local est efficace si les récepteurs sont éloignés de la source.
Récepteurs nombreux	+++	+++	+++	--	--	Le local a l'avantage d'une « solution d'ensemble ».	Le traitement du local est rarement suffisant ; cette situation est favorable aux actions à la source.
Récepteurs dispersés	+++	+	++	--	--	Le local a l'avantage d'une « solution d'ensemble ».	Difficile de regrouper les sources dans un endroit sans récepteur (cloisonnage).
Récepteurs concentrés	+	+++	+	+	++	Type « salle de contrôle » ou séparation de zones d'activité.	Une cabine est une sorte de « cloisonnage de récepteurs ».
Récepteur unique et sources nombreuses	+	++	+	--	+++	Essayer de regrouper les sources et de cloisonner.	La cabine n'est efficace que si l'opérateur y reste de manière permanente.
Local réverbérant	+++	+	+	--	+	Les effets positifs du traitement du local sont certains.	Le traitement du local est rarement suffisant.
Récepteur en champ direct	--	+	+++	++	+	Traitement du local inefficace.	Cette situation est favorable aux actions à la source.
Récepteur en champ réverbéré	+++	++	++	--	+	Le gain du traitement du local est « chiffrable ».	Le traitement du local est rarement suffisant.
Bruit impulsionnel	+++	++	++	+	+	Les réflexions du local augmentent la durée du bruit émis.	Les actions à la source sont à favoriser dans cette situation.

Tableau 2 – Éléments de choix de solutions (*)

	Local (absorption)	Cloisonnage ^(**)	Encoffrement (source)	Écran	Cabine (opérateur)	Justification	Limites
Accès fréquent	+++	+	+	+	--	Le traitement du local n'entrave pas la circulation.	Encoffrement : attention aux performances liées aux ouvertures (fuites et durée d'exposition à l'ouverture).
Possibilité de regroupement de machines	++	+++	+	+	+	Le cloisonnage permet une action globale simplifiée.	Le cloisonnage augmente la réverbération du local et un traitement est justifié.
Récepteur mobile	+++	++	+++	--	--	Le traitement du local n'entrave pas la circulation.	Le cloisonnage nécessite des ouvertures pour circulation.
Problème basses fréquences	++	++	++	-	++	Un écran est inefficace en BF.	Toutes ces solutions sont moins adaptées qu'une action à la source. Le calcul prévisionnel d'un encoffrement, cloisonnage ou cabine est nécessaire en basses fréquences.
Source en hautes fréquences	++	+++	+++	++	++	Une « barrière étanche » est très efficace.	Les fuites acoustiques sont particulièrement néfastes dans cette zone de fréquence.
Environnement pollué	+	+	+	-	+++	Traiter la cabine pour protéger des pollutions.	La première action est de mettre en œuvre les solutions pour diminuer la pollution.
Source « multi-nuisance »	+	++	+++	+	++	L'encoffrement permet de traiter l'ensemble des nuisances (poussières, humidité...).	Attention à la dégradation des matériaux du local.
Salle à empoussièrement contrôlé (« blanche »)	+	++	+	+	+	Le cloisonnage permet de limiter la zone de traitement et peut permettre de diminuer le volume à conditionner.	Les produits absorbants de certaines solutions sont à choisir avec précaution.

(*) Notations

+++ : solution à envisager en priorité, résultats positifs très probables.

++ : recommandé, mais dépend du contexte ou d'autres solutions sont préférables.

+ : non recommandé dans le cas général mais possible dans certains cas.

- : effet limité.

-- : fortement déconseillé.

(**) Séparation de deux zones par une ou plusieurs cloisons hermétiques.

2.4. Une synthèse

Le *tableau 3* fait la synthèse des éléments de choix des solutions. Ici aussi, le tableau n'est à considérer que comme une aide à l'analyse et non pas une préconisation. Les éléments qui y figurent nécessitent de connaître les justifications exposées dans l'ensemble du guide.

<i>Tableau 3</i>		
Action	Éléments favorables	Éléments défavorables
Amont	Rénovations prévues ou installation nouvelle, nombreuses sources concernées, postes de travail à traiter nombreux et indépendants.	Difficulté à modifier le procédé au sens large.
À la source (équipement)	Mauvais état de l'équipement, accès machine fréquent, problème bandes fines, problème basses fréquences, récepteurs concernés nombreux, bruit impulsionnel.	Responsabilité en cas de modification de l'équipement (garantie).
Absorption local	Local réverbérant ; sources ou récepteurs nombreux et dispersés ; accès aux sources fréquent ; bruit impulsionnel ; récepteur mobile.	Récepteur en champ direct par rapport à la source ; objectifs de gain importants.
Cloisonnage	Regroupement de sources prépondérantes ; objectifs de gain important ; récepteurs nombreux ; source « multi-nuisances ».	Sources dispersées.
Encoffrement	Source prépondérante ; objectifs de gain important ; récepteurs nombreux ; récepteur en champ direct ; récepteur mobile ; source « multi-nuisances ».	Accès fréquent aux équipements ; sources nombreuses.
Écran	Récepteur en champ direct.	Local réverbérant ; sources nombreuses ; objectifs de gain important ; récepteur mobile.
Cabine	Sources nombreuses et récepteur unique ; environnement pollué.	Opérateur mobile (sortie de la cabine avec PICB nécessaire).
PICB	En dernier recours. Opérateur mobile et impossibilité de traiter la source.	Si toute autre possibilité d'action est envisageable.

4

Compléments et développements techniques

Introduction

Afin de faciliter la lecture des parties précédentes du guide et de ne pas l'alourdir, certaines précisions y ont été éludées. Nous avons tenté de faire en sorte que les éléments présentés restent techniquement corrects et suffisants pour la compréhension des sujets abordés, mais un lecteur intéressé peut chercher des informations complémentaires : c'est l'objet de cette partie.

La complexité des phénomènes abordés fait que les informations données restent incomplètes et sont exprimées de manière lapidaire.

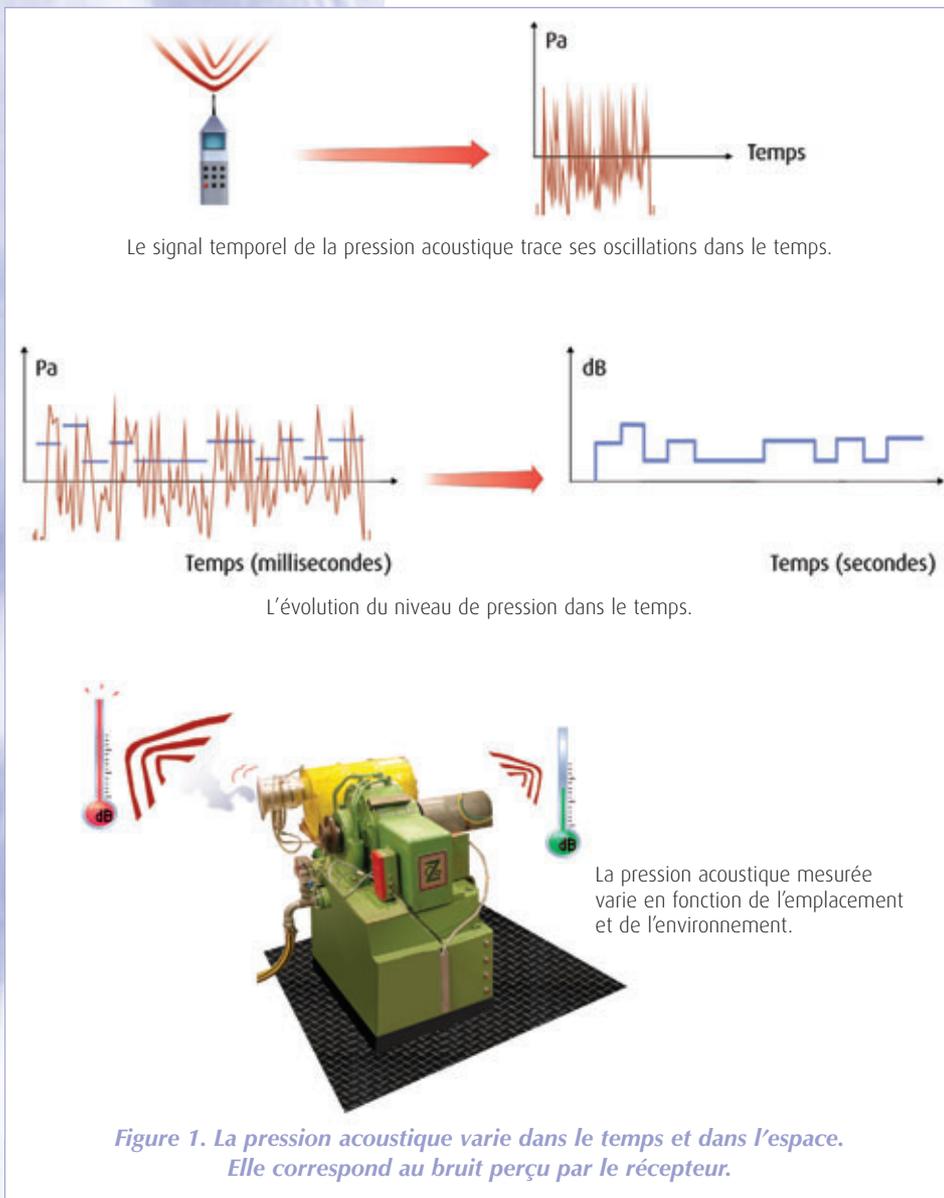
Afin d'aider le lecteur à retrouver les éléments recherchés, un classement a été effectué suivant quatre chapitres :

- notions physiques générales d'acoustique ;
- compléments techniques sur les performances des solutions ;
- méthodes de mesure et d'analyse ;
- méthodes de simulation.

1. Notions physiques générales d'acoustique

1.1. Pression acoustique, signal temporel

La pression acoustique correspond à une « vibration de l'air » : elle fluctue dans le temps autour de la pression ambiante. Le signal temporel est la représentation graphique de l'évolution de cette variation (exprimée en Pascal) dans le temps (figure 1).



Le bruit perçu est mesuré en niveau de pression L_p , exprimé en dB [ou dB(A)]. Le signal correspondant est donc cette fois toujours positif et il ne varie pas autour d'une position d'équilibre. La mesure du niveau de pression se fait pendant une durée déterminée, choisie en fonction de la situation : elle peut aller de l'ordre de grandeur de la perception humaine (plusieurs centaines de millisecondes) à une durée représentative d'un événement (la réalisation d'une tâche, par exemple) qui peut aller de plusieurs secondes à plusieurs heures. On détermine alors le niveau équivalent de bruit sur cette durée, qui correspond à un bruit de même énergie mais stable dans le temps ; il est noté L_{eq} . S'il est mesuré en dB(A) et sur une durée T , on le note $L_{Aeq,T}$: c'est le paramètre de base de la mesure du bruit en entreprise.

On distingue donc deux représentations temporelles de l'évolution du bruit :

🕒 le signal temporel de la pression instantanée, sur des échelles de temps très courtes, dont l'amplitude varie autour d'une position d'équilibre : il est utilisé en expertise pour des analyses très particulières ;

🌀 l'évolution dans le temps du niveau de pression, sur des échelles de temps beaucoup plus longues, dont le pas correspond à la durée de mesure du L_{eq} et où les valeurs sont toujours positives : c'est la représentation la plus utilisée car elle retrace la variation du niveau de bruit pendant une phase de travail.

Par ailleurs, le niveau de pression a les caractéristiques suivantes :

- 🌀 il mesure le bruit ambiant, c'est-à-dire qu'il prend en compte tous les bruits environnants et l'influence éventuelle du local ;
- 🌀 même pour une source seule et en champ libre, il varie selon l'endroit où on effectue la mesure : c'est l'influence de la directivité de la source et de la distance.

La pression acoustique varie dans le temps et dans l'espace. Elle correspond au bruit perçu par le récepteur.

Le niveau de pression équivalent caractérise l'énergie sonore mesurée en un point pendant une durée donnée : c'est le paramètre de base de la mesure du bruit en milieu du travail.

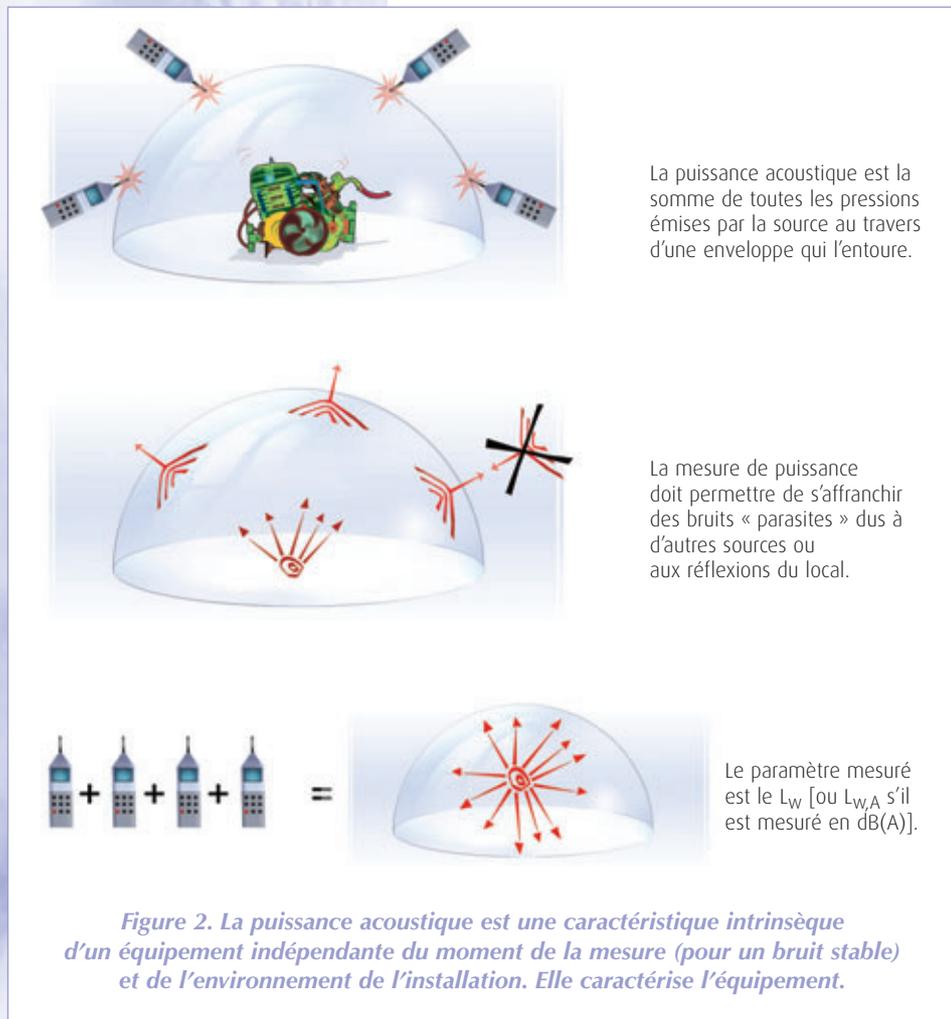
Si l'on veut que le niveau de pression soit représentatif d'un équipement, il faut absolument préciser l'emplacement du point de mesure et s'assurer qu'il n'y a pas de parasitage d'autres équipements et du local.

Cette dernière remarque amène à préciser les précautions minimales à prendre en compte pour mesurer un niveau de pression acoustique :

- vérifier sa chaîne de mesure avant et après la mesure (par exemple avec un calibrateur) ;
- utiliser un appareillage avec des caractéristiques métrologiques adaptées : bande passante, dynamique ;
- vérifier que les niveaux mesurés sont très supérieurs au bruit de fond le cas échéant ;
- noter le type de paramètre mesuré et son unité ;
- repérer et noter le point de mesure ;
- identifier et noter l'environnement de mesure :
 - type de local, traitement éventuel du local, encombrement, dimensions,
 - présence d'obstacles,
 - sources sonores en fonctionnement, localisation des sources dominantes par rapport au point de mesure, condition de fonctionnement de ces sources,
- identifier et noter les conditions de l'opérateur concerné le cas échéant :
 - tâche effectuée,
 - protection acoustique (écran, PICB...),
 - localisation par rapport au point de mesure,
 - noter l'heure et la durée de mesure.

1.2. Puissance acoustique

Pour caractériser de manière absolue l'émission sonore d'un équipement, il faut quantifier sa « capacité d'émission de bruit », ou plus exactement sa puissance acoustique (figure 2).



La puissance acoustique s'exprime en Watt (noté W). Elle s'obtient en faisant une intégration de l'intensité (unité : W/m^2) sur une surface enveloppe (m^2). On peut l'approcher en sommant toutes les pressions émises par l'équipement sur une surface enveloppe. Chaque pression mesurée doit être multipliée par la partie de la surface qui lui est associée, la somme de toutes les surfaces correspondant à la surface totale de l'enveloppe.

De même que pour la pression acoustique, la puissance est quantifiée en niveau de puissance, noté L_w , et s'exprime en dB ou dB(A). La référence est 10^{-12} W.

La méthode utilisée doit permettre de s'affranchir des bruits ne provenant pas de l'équipement : autres sources, réflexions...

La puissance acoustique d'un équipement est indépendante du point de mesure, du moment de la mesure (pour une émission stationnaire) et de l'environnement de l'installation. Elle caractérise l'équipement.

La précision du résultat de mesure de puissance dépend de la méthodologie utilisée (type de mesure, nombre de points, choix de la surface...). La puissance et la pression acoustiques, paramètres de nature très différente, sont souvent confondues : il faut dire que les usages acoustiques prêtent à cette confusion :

- chacune se mesure en niveau, les deux se notent donc « L » (Level, en anglais), et seul l'indice les différencie (p pour pression, W pour puissance) ;
- les unités sont identiques : dB ou dB(A).

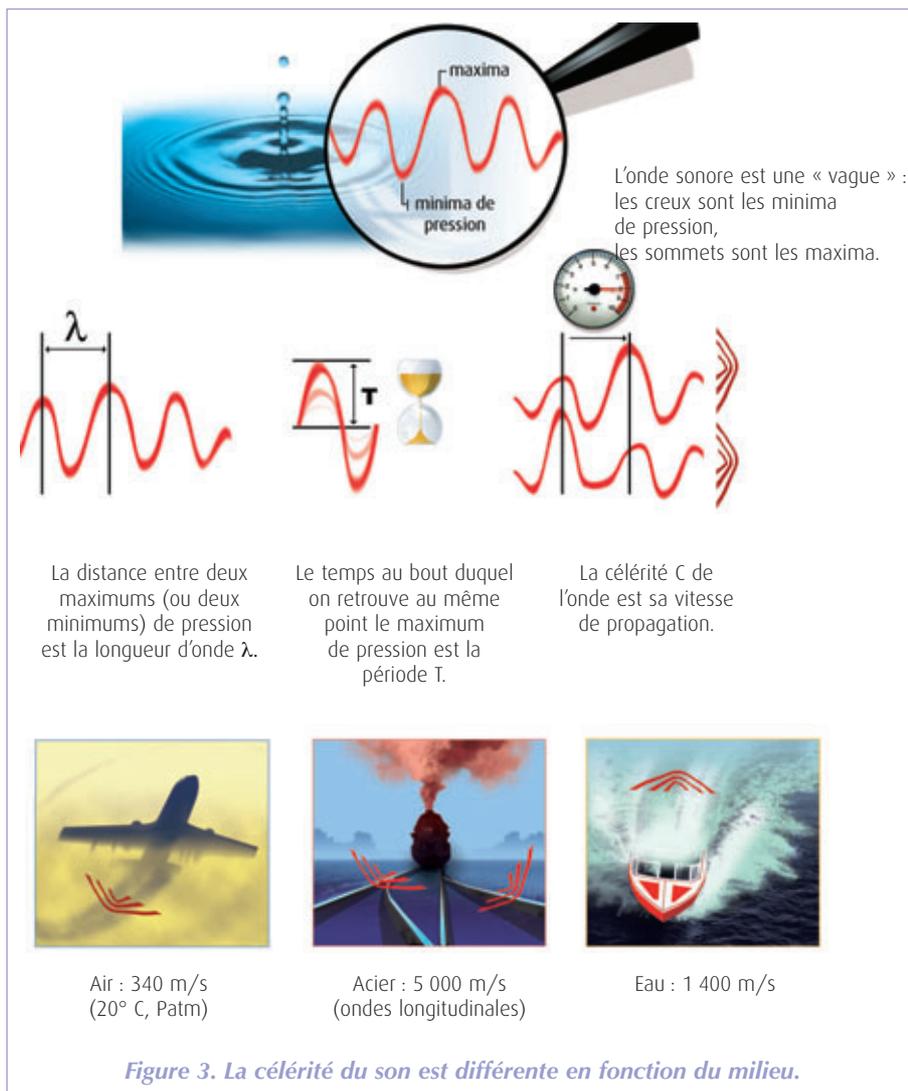
1.3. Célérité, longueur d'onde

La propagation du son correspond à la propagation d'une fluctuation de pression, et non pas à un déplacement de la matière constituant le milieu ambiant. Ce phénomène est analogue à celui d'une vague, qui correspond à une variation de pression de l'eau (générée, par exemple, par la chute d'un caillou). On voit les vagues avancer, mais si le bouchon du pêcheur oscille au passage de la vague, il n'avance pas : l'eau sur laquelle il repose ne suit qu'un mouvement vertical.

Ceci est la caractéristique d'une onde : un transfert d'énergie sans déplacement du milieu (dans le sens de la propagation) (figure 3).

Les paramètres caractéristiques décrivant cette propagation sont les suivants :

- la longueur d'onde λ correspond à la distance entre deux maximums (ou minimums) de l'onde ; celle-ci étant périodique, λ peut se mesurer entre deux maximums quelconques (unité : m) ;
- la célérité C de l'onde correspond à sa vitesse de propagation (unité : m/s) ;
- la fréquence f de l'onde est la fréquence de la variation de pression (unité : Hz).



λ et C sont liés à la fréquence f par la relation : $C = \lambda f$.

Pour un gaz, la célérité du son varie en fonction des conditions de température et de pression du milieu ; elle est également différente en fonction de sa masse molaire.

Le son se propage également dans les milieux liquides et solides, avec des célérités différentes selon leur nature.

On trouve dans les solides plusieurs types d'ondes sonores, en fonction de l'allure de la déformation qui accompagne l'onde : ondes longitudinales, de flexion, de cisaillement, de torsion... Chacune a sa propre célérité ; pour les ondes de flexion, la célérité varie avec la fréquence.

Le tableau 1 donne des ordres de grandeur de correspondance entre fréquence et longueur d'onde pour la propagation aérienne dans les conditions atmosphériques ambiantes.

Tableau 1

Fréquence (Hz)	1	10	100	1 000	10 000
Longueur d'onde	340 m	34 m	3,4 m	34 cm	3,4 cm

1.4. Exposition

L'exposition sonore sur une durée T prend en compte tous les événements sonores perçus pendant cette durée (figure 4). Ceux-ci sont différents en fonction de l'emplacement de l'individu, la tâche effectuée, etc. Chaque événement sonore doit être pondéré en fonction de sa durée.

Le calcul de l'exposition sonore s'effectue donc de la manière suivante :

🌀 Pour des événements sonores i de niveau acoustique équivalent L_{Aeq,T_i} :

– exposition globale pour une durée T_d :

$$L_{Aeq,T_d} = 10 \log (1/T_d \sum T_i 10^{0,1 L_{Aeq,T_i}})$$

– pour ramener à une exposition sur une durée de référence T_o :

$$L_{Ex,d} = L_{Aeq,T_d} + 10 \log (T_d/T_o)$$

La mesure de l'exposition peut être réalisée selon deux méthodes générales :

- la *sonométrie* : des relevés de L_{Aeq,T_i} sont réalisés auprès de l'opérateur par un technicien pendant les phases de travail jugées significatives. La durée réelle T_i de ces phases de travail est estimée pour une journée. La combinaison par calcul des durées T_i et des niveaux correspondants L_{Aeq,T_i} donne l'exposition quotidienne ;
- l'*exposimétrie* : un exposimètre (anciennement appelé dosimètre) est fixé sur l'opérateur. Cet appareil fait la mesure en continu du niveau sonore pendant la journée de travail. Il donne, en fin de mesure, la valeur de l'exposition sonore quotidienne et, pour certains appareils, l'évolution du niveau pendant la journée.

Il va de soi que, pour ces deux méthodes, des règles de mesure identiques sont appliquées : point de mesure près de l'oreille, vérification des chaînes de mesure...

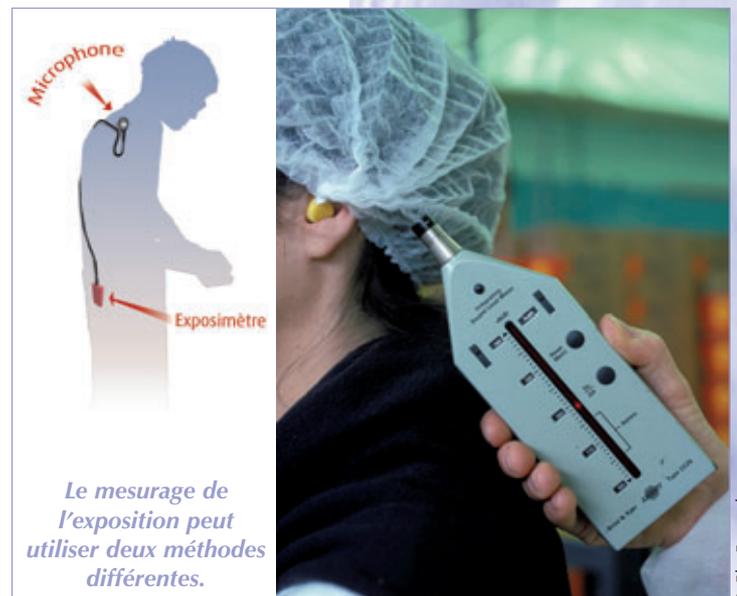
Chacune de ces deux méthodes a ses avantages :

- la sonométrie assure que les mesures sont fiables et ne comportent pas d'artefacts (frottements de microphones, souffles sur le microphone...). Ses résultats permettent de simuler par calcul différents scénarios d'exposition, en faisant varier les durées des tâches et en procédant à des assemblages de tâches divers : on peut ainsi utiliser les résultats de mesure pour l'étude d'une population élargie et également prendre en compte des éventuels changements d'activité dans une journée de travail ;
- l'exposimétrie assure que tous les événements bruyants de la journée ont été pris en compte.

Les événements de courte durée, mais de niveau élevé, ne doivent pas être sous-estimés : on sait par exemple que l'utilisation occasionnelle de soufflettes à air comprimé peut contribuer de manière importante à l'exposition sonore quotidienne. Le tableau 2 donne un exemple réel.



Figure 4. Le calcul de l'exposition combine les niveaux sonores des différentes tâches aux différents emplacements de travail au prorata de leurs durées.



Le mesurage de l'exposition peut utiliser deux méthodes différentes.

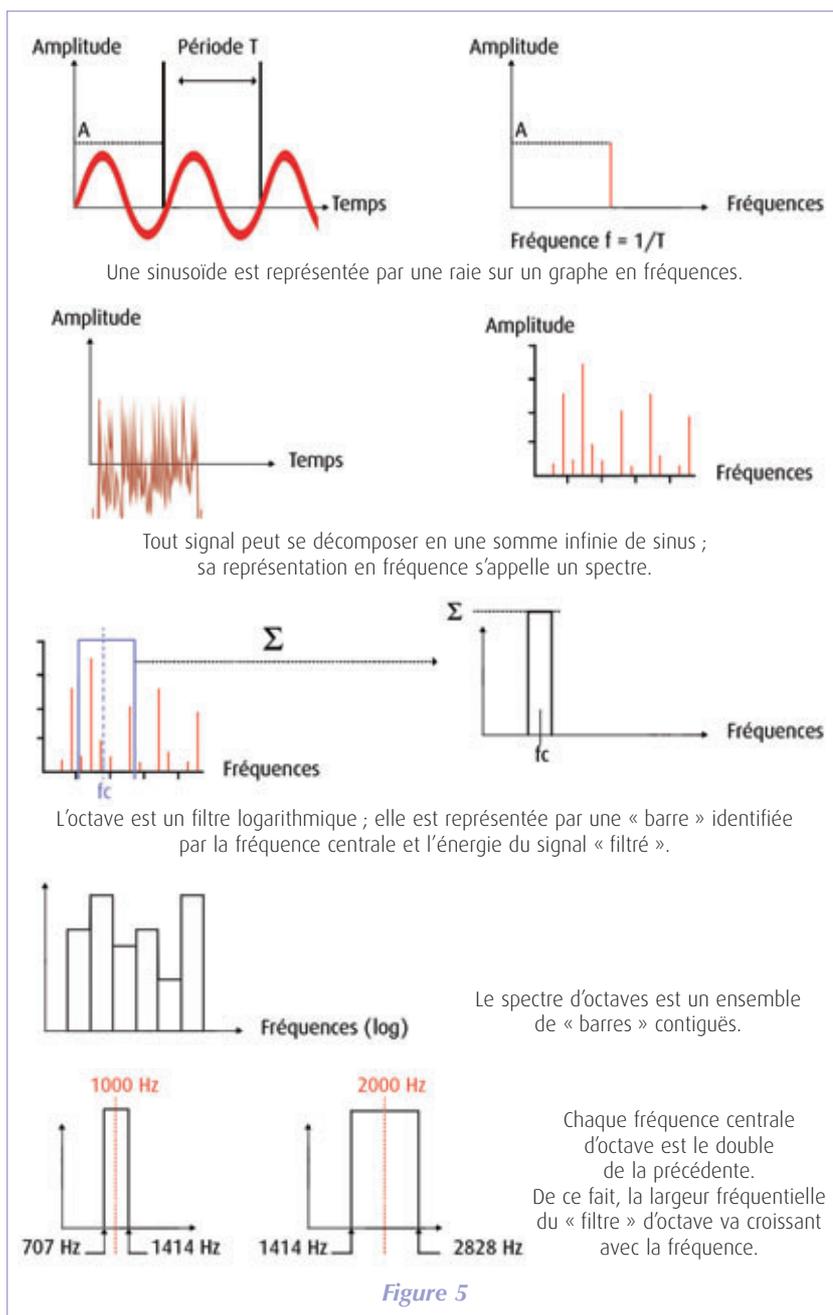
© Ph. Renaud

Tableau 2

Tâche	L_{Aeq,T_i}	Durée (min)
Meulage	100	45
Soufflage d'air comprimé	104	10
Réglage	80	120
Surveillance machine	76	305
$L_{Ex,d}$ résultant : 91,8 dB(A)		

1.5. Analyse spectrale. Octaves

(figure 5)



Le signal type représentant une fluctuation dans le temps est la sinusoïde. Son intérêt principal est que l'on peut la décrire par deux paramètres seulement :

- la période T est la durée séparant deux maximums (le sinus étant périodique, on peut voir que, à tout intervalle T , on retrouve un point identique du signal) ;
- l'amplitude A correspondant au maximum atteint par le signal.

La fréquence f du signal (la même que celle que nous évoquons pour traduire la hauteur d'un son) est reliée à T par : $f = 1/T$.

En effet, si un cycle de la sinusoïde s'effectue en T secondes, le nombre de cycles par secondes f est bien $1/T$.

Une sinusoïde se ramenant à un couple (A, f) , on peut la représenter par un point sur un graphe (amplitude, fréquence). Cette représentation est appelée spectre du signal.

Afin de visualiser ce point, il est repéré par un trait vertical : un sinus est donc représenté par une raie spectrale.

Des outils mathématiques permettent de ramener tout signal temporel à une somme (infinie) de sinus : c'est l'opération appelée « Transformée de Fourier ».

La représentation de tous ces sinus dans le domaine fréquentiel est le spectre du signal analysé.

Les sensations humaines étant logarithmiques, une échelle logarithmique est également utilisée pour les fréquences. On utilise pour cela l'octave.

Une octave est un intervalle de fréquence qui s'étend d'une fréquence à son double. En mesure, on peut l'assimiler à un « filtre » qui contient une partie des fréquences du signal. Elle est repérée par la fréquence centrale du filtre. L'octave s'étalant d'une fréquence à son double, la largeur fréquentielle du filtre d'octave va croissant avec la fréquence (elle double de l'une à l'autre). Les fréquences centrales successives suivent la même proportion (chaque fréquence centrale est le double de la précédente).

En acoustique, les fréquences centrales d'octave sont normalisées à partir de 1 000 Hz ; on retrouve ainsi les octaves inférieures : 500 Hz, 250 Hz, 125 Hz, etc., et supérieures : 2 000 Hz, 4 000 Hz, etc.

L'octave est un filtre logarithmique. Elle est représentée par une barre centrée sur la fréquence centrale du filtre et dont l'amplitude est la somme énergétique S du signal contenu dans ce filtre.

Les octaves sont contiguës ; la représentation de leur ensemble est le spectre d'octaves.

Les tiers d'octave correspondent à la division des octaves en trois bandes.

Par opposition à l'échelle des octaves, on appelle les spectres représentés sur une échelle linéaire des spectres « en bandes fines », où chaque filtre du spectre a une largeur constante, en principe beaucoup plus étroite qu'une octave.

Les spectres par octave sont utilisés pour analyser le bruit par rapport à la perception de l'oreille.

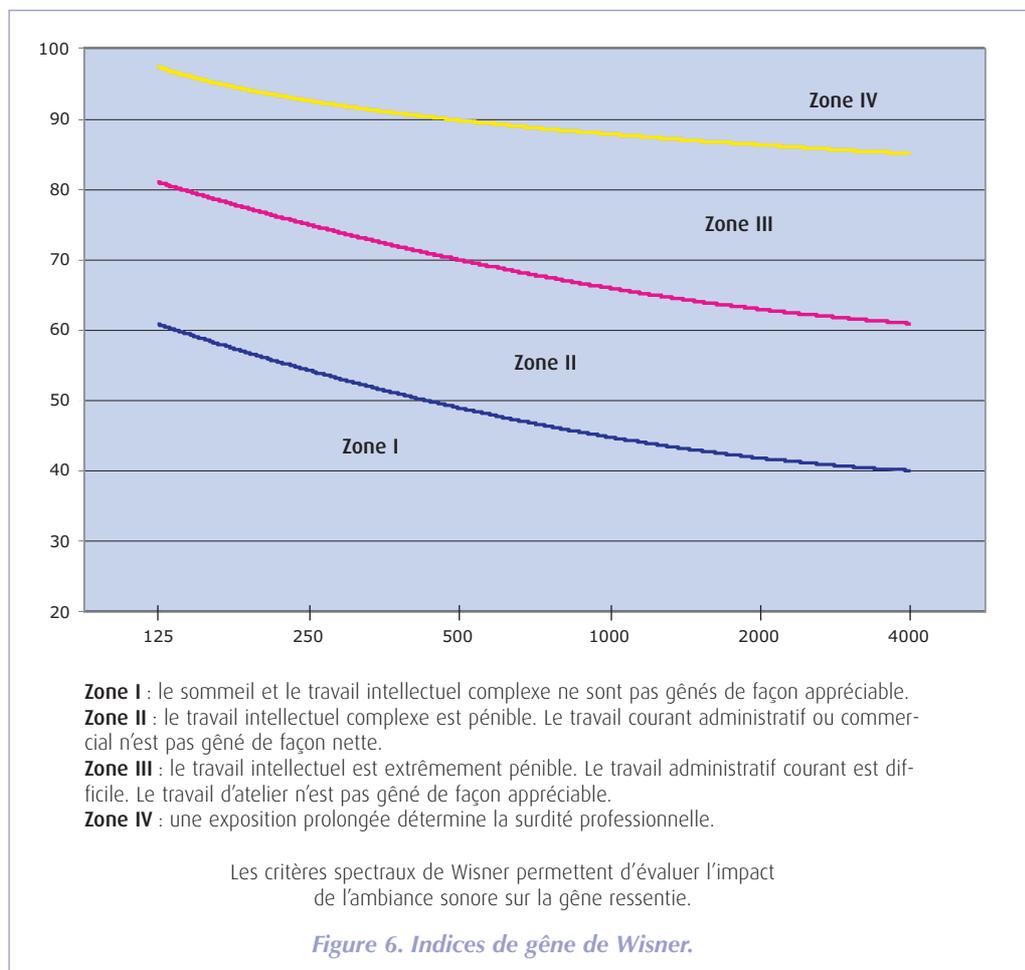
Les spectres en bandes fines sont utilisés pour analyser la composition fréquentielle du signal et rechercher ainsi ses origines ou ses sources. Les appareils nécessaires sont encore assez peu répandus dans le domaine de l'acoustique ; ils sont courants dans le domaine des vibrations mécaniques.

1.6. Critères spectraux de gêne

À des niveaux inférieurs aux seuils d'exposition, le bruit peut également être une nuisance. Il est susceptible d'affecter les facultés de concentration d'un opérateur, induire une fatigue nerveuse pouvant être un contributeur significatif au stress. Si ces effets sont susceptibles d'agir sur sa santé, ils peuvent également affecter selon le cas son rendement dans la réalisation de ses tâches professionnelles.

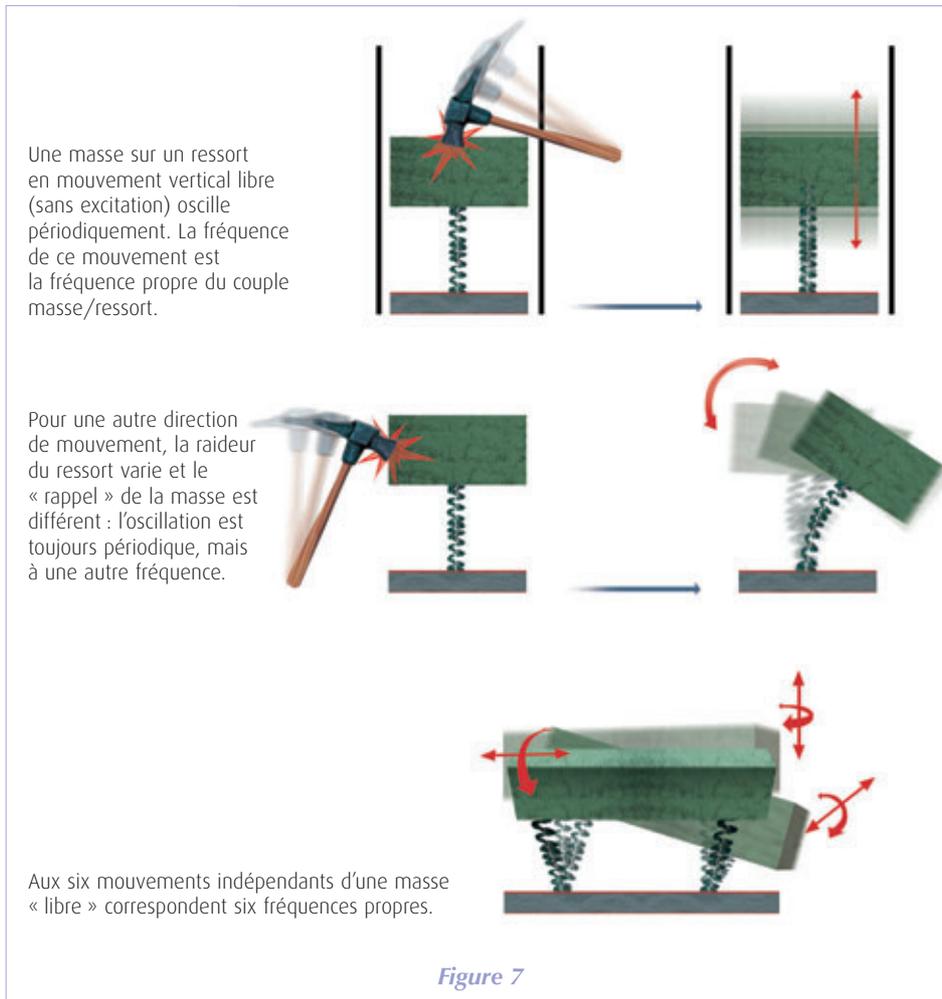
C'est pourquoi des études ont amené à établir des critères de gêne acoustique, avec des seuils qui se déclinent selon l'activité intellectuelle de l'individu.

Nous donnons *figure 6* les critères établis par A. Wisner, particulièrement dédiés à une activité professionnelle. Afin de prendre en compte au mieux les variations de sensibilité auditive en fonction de la fréquence, ces critères sont des courbes spectrales.



1.7. Vibrations

Fréquence et mode propres (figure 7)



Le système de base pour comprendre les vibrations est une masse reliée au sol par un ressort.

Supposons que l'on laisse la masse bouger librement, c'est-à-dire sans lui appliquer d'effort : c'est ce que l'on obtient après un choc, ou en tirant puis en relâchant la masse. On observe alors que la masse oscille, autour de la position qu'elle avait à l'arrêt, selon un mouvement périodique c'est-à-dire que ses allers-retours ont tous la même durée. La fréquence correspondant à ce mouvement, c'est-à-dire le nombre d'allers-retours par seconde, est sa *fréquence propre*. Cette fréquence correspond à son mouvement libre. Elle est donc totalement indépendante de l'effort qu'on lui applique ; elle est unique et spécifique à cet ensemble masse-ressort.

L'intuition fait sentir que cette fréquence va être :

- d'autant plus haute que la raideur du ressort est grande : plus une corde de guitare est tendue, plus elle est raide et plus la note est haute ;
- d'autant plus basse que la masse est grande : un camion chargé oscille plus lentement qu'un camion vide au passage d'un obstacle.

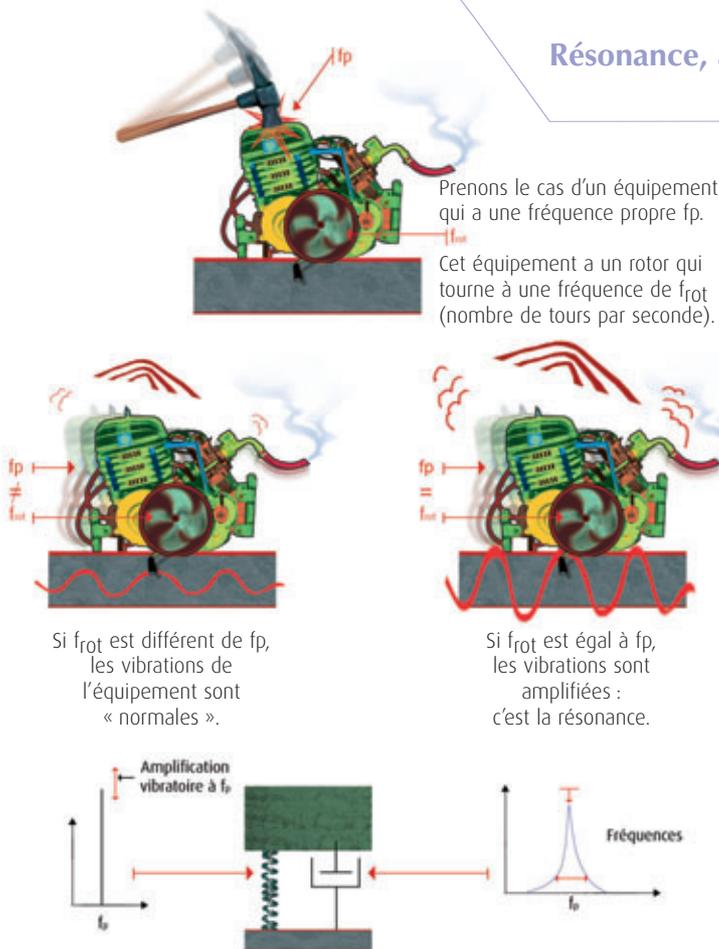
L'expression mathématique de la fréquence f_p est en effet :
 $f_p = 1/2\pi \sqrt{k/M}$,
 où k est la raideur du ressort, M la masse suspendue.

Ainsi, la fréquence propre dépend de la raideur de liaison entre la masse et le sol. Or cette raideur est différente, par exemple, selon la direction verticale et la direction horizontale : on obtient ainsi une deuxième fréquence propre, associée à un deuxième mouvement.

De même, la raideur est différente en rotation, etc. En réalité, à chaque mouvement indépendant des autres, correspond une fréquence propre spécifique. Une masse dans l'espace ayant six possibilités de mouvements indépendants (trois rotations et trois translations) a six fréquences propres. L'ensemble « fréquence propre, mouvement associé » s'appelle mode propre.

L'exemple montre que certaines fréquences propres peuvent être très proches, voire en théorie identiques : celles associées aux deux mouvements horizontaux par exemple. On parle alors de modes « couplés ». Tout mouvement selon une direction quelconque peut alors se décrire comme une combinaison des six déformées propres.

Résonance, amortissement (figure 8)



L'amortissement limite l'amplification du niveau à la résonance mais « étale » son influence en fréquence.

Figure 8

Si le mode propre correspond au mouvement et à la fréquence « naturels » du système, qu'en est-il lorsque celui-ci est sollicité par une excitation ?

Dans notre cas, une excitation est par exemple un effort, mais qui varie continuellement dans le temps. Pour simplifier, supposons qu'il soit appliqué au système périodiquement à une fréquence f_{exc} . Bien entendu, la masse va osciller en même temps que l'effort, donc à f_{exc} . Mais dès lors que f_{exc} égale f_p , le mouvement va s'amplifier dans des proportions importantes : c'est la résonance.

La limitation de l'amplification du niveau à la résonance est due à une caractéristique physique qui est l'amortissement. En réalité, celui-ci intervient déjà dans le mouvement libre du système : en effet, l'essai de choc ou de lâcher de masse laisse paraître le fait que l'amplitude de ses oscillations diminue dans le temps, jusqu'à l'arrêt. C'est l'amortissement qui atténue l'énergie du mouvement.

Celui-ci est toujours présent dans un système : soit par la déformation des éléments en jeu, soit par les frottements avec le milieu environnant, soit enfin par l'adjonction de dispositifs dédiés.

Les effets de l'amortissement à la résonance sont complexes, mais on peut les résumer en deux caractéristiques principales :

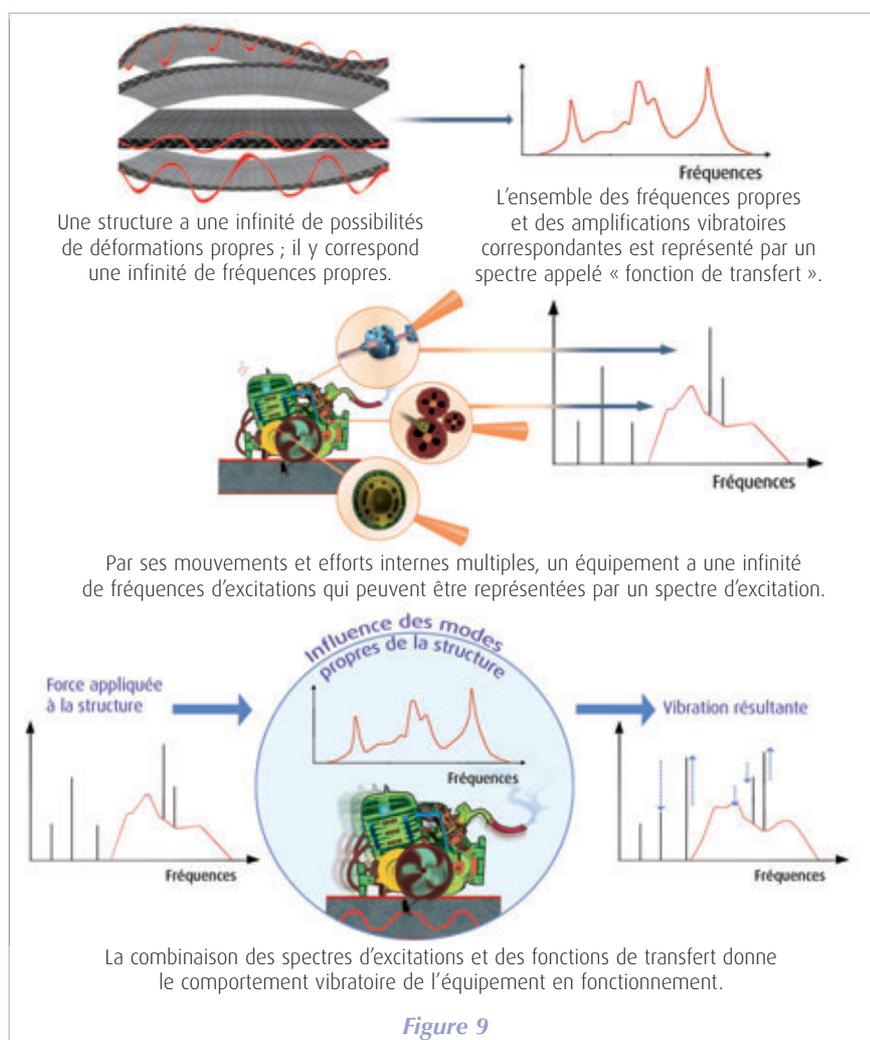
- il limite les oscillations du système,
- il étend les effets de la fréquence propre à proximité de celle-ci (pour des fréquences inférieures et supérieures).

L'amortissement joue très peu sur la valeur de la fréquence propre.

Si les caractéristiques d'amortissement sont quantifiables par des paramètres généraux d'une structure (coefficient d'amortissement de tel ou tel matériau, dû au frottement de tel ou tel fluide...), les modes propres font apparaître des amortissements spécifiques. Ces amortissements propres sont également des caractéristiques modales.

La correspondance entre excitation et mode propre, qui génère une résonance, s'appelle « appropriation modale » : elle nécessite une coïncidence entre fréquence d'excitation et fréquence propre, mais aussi que l'excitation s'approprie la déformée modale, c'est-à-dire qu'elle corresponde à ce mouvement. Ainsi, une excitation horizontale, même à la fréquence propre, ne créera pas une résonance sur un mode de mouvement vertical.

Déformée propre, transfert vibratoire (figure 9)



Les vibrations d'une structure ne correspondent pas qu'à des mouvements d'ensemble, comme une masse sur un ressort : elles présentent également des déformations. Or, les possibilités de déformation d'une structure sont infinies. On peut ramener chacune à une combinaison de déformations

élémentaires, dont le nombre est également infini (voir l'exemple d'une plaque en figure 9). Au même titre que les mouvements d'ensemble (non déformés) du système masse-ressort, ces déformations élémentaires correspondent à des modes propres de la structure : ce sont les mouvements qui répondent de manière combinée lorsque la structure est libérée.

À chacune de ces fréquences propres est associé un amortissement : le spectre de l'amplification vibratoire correspondante a donc une certaine largeur. On peut ainsi tracer le spectre d'assemblage de ces fréquences et des amplifications vibratoires correspondantes : c'est la « carte d'identité vibratoire » qui représente ses caractéristiques dynamiques.

Par ailleurs, une excitation réelle a également dans la majeure partie des cas une infinité de fréquences d'excitation. En effet, même si, par exemple, une machine a une vitesse de rotation de 50 tours par secondes, donc 50 Hz, ses mouvements et forces internes génèrent d'autres fréquences, dont le spectre s'étend couramment à 20 000 Hz ou plus.

Chacune de ces fréquences est susceptible de coïncider avec une des fréquences propres de l'équipement. De plus, du fait de l'amortissement, l'influence de la fréquence propre est déjà présente aux fréquences (proches) inférieures et supérieures. Ainsi, la vibration résultante ne peut être qu'une combinaison de l'excitation et du comportement modal de la structure : c'est cet effet combiné que l'on appelle le transfert vibratoire.

Les excitations et les amplifications vibratoires varient tout au long de la structure. Leur représentation par des spectres n'est donc valable que point par point. Cette représentation est pratique pour comprendre les phénomènes et les méthodes d'analyse qui se réfèrent souvent à des assemblages de points : elles nécessitent alors d'intégrer les influences mutuelles de chacun.

1.8. Rayonnement

(figure 10)

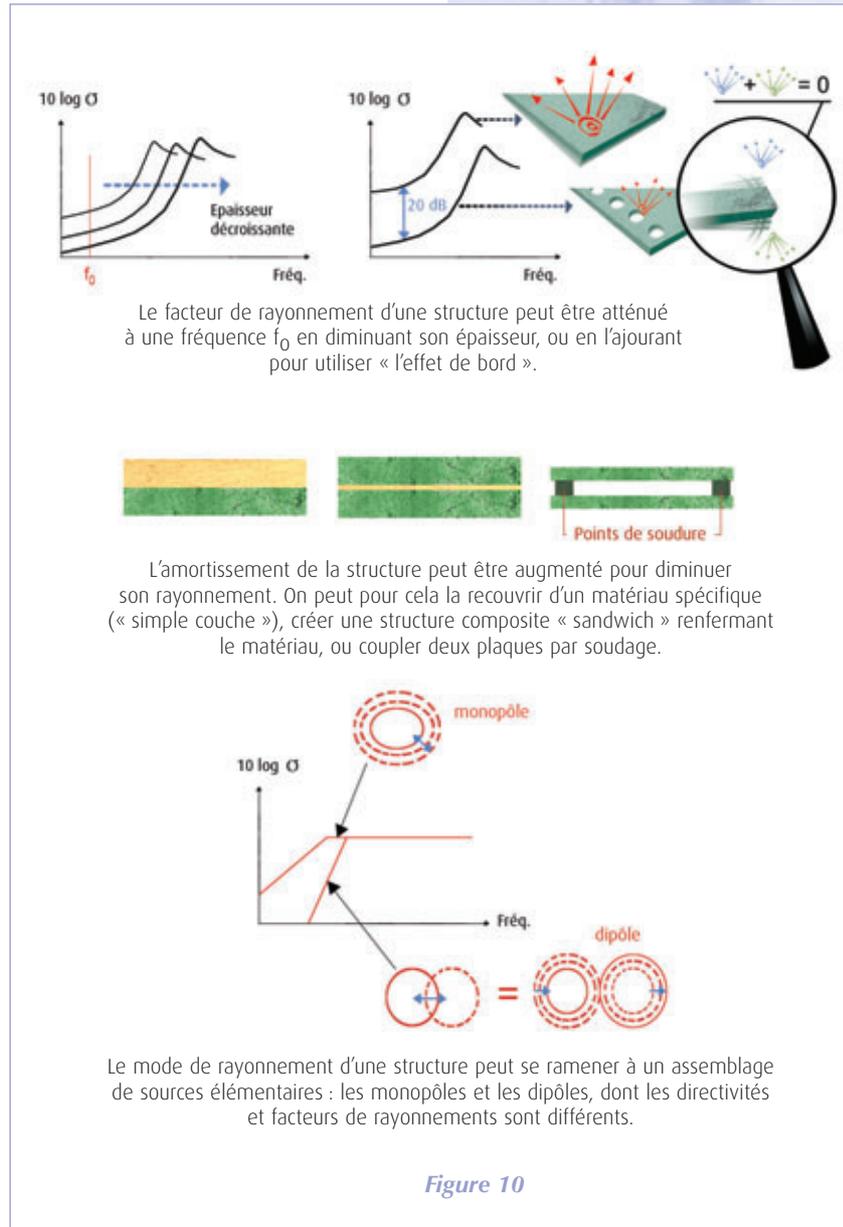
La capacité qu'a une structure à transformer sa vibration en bruit est illustrée par son facteur de rayonnement : on peut l'assimiler à un rapport entre le niveau sonore émis par cette structure et ce que serait ce niveau sonore pour un piston indéformable, de même surface, ayant la même vibration.

En basses fréquences, ce facteur σ croît avec la fréquence, puis atteint une valeur maximale à une fréquence dite critique et se stabilise autour d'une valeur moyenne s'approchant de l'unité. Il est toujours inférieur à 1, sauf à la fréquence critique. Pour une paroi, celle-ci correspond à la fréquence de plus faible isolement.

La valeur de σ dépend de la géométrie de la structure et de ses caractéristiques mécaniques (combinaison de masse et de raideur, amortissement). On peut noter par exemple que pour une même plaque et à une fréquence donnée inférieure à la fréquence critique, son facteur de rayonnement diminue lorsque son épaisseur diminue.

« L'effet de bord » peut être utilisé : de part et d'autre d'une extrémité libre, les fluctuations de pression s'annulent et donc le bruit émis tend vers zéro. Il s'agit alors d'augmenter la quantité de « bords » d'une structure, en la perforant par exemple. Comme ordre de grandeur, on peut considérer qu'une perforation de 30 % de la surface amène un facteur de rayonnement proche de zéro.

L'amortissement de la structure joue un rôle important : plus il est élevé, plus le rayonnement diminue. Par exemple, le plomb est plus amortissant que l'acier. Le choix du matériau de l'équipement n'étant pas toujours possible, l'amortissement de sa structure peut être augmenté par l'ajout de matériaux spécifiques de type viscoélastiques, par apposition d'une couche en surface (procédé « simple couche »). La déformation de ce matériau pendant le mouvement vibratoire contribue à la dissipation de l'énergie de l'ensemble. Pour accroître cet effet, ou lorsque ce matériau ne doit pas paraître en extérieur (problème de contact, d'aspect...), on peut concevoir des parois complexes le prenant en sandwich : à la déformation de flexion du matériau viscoélastique, s'ajoute un mouvement de cisaillement induit par le mouvement relatif des deux plaques.



Par son effet sur le matériau viscoélastique, la température joue un rôle important dans les capacités d'amortissement de tels systèmes. Par ailleurs, on peut citer le fait que l'assemblage de plaques par points de soudage peut, dans certaines configurations, augmenter l'amortissement de l'ensemble.

Le rayonnement d'une structure peut être modélisé par un assemblage de sources élémentaires fictives simples. Il s'agit en particulier de deux types de sources :

- les monopôles, qui se comportent comme des sphères pulsantes (qui respirent),*
- les dipôles, assemblage de deux monopôles respirant de manière opposée (en opposition de phase).*

Les caractéristiques de rayonnement (puissance rayonnée, directivité) sont différentes pour ces deux sources, mais elles sont bien maîtrisées théoriquement. Une prise en compte plus précise du rayonnement d'un équipement associe ses caractéristiques monopolaires et bipolaires.

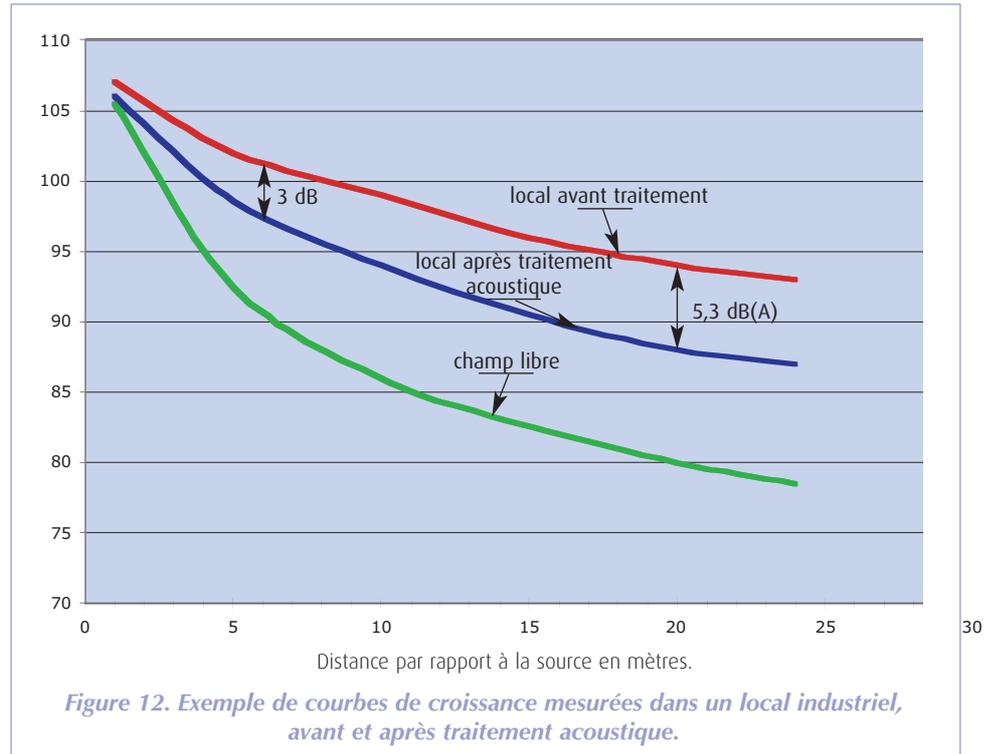


Figure 12. Exemple de courbes de croissance mesurées dans un local industriel, avant et après traitement acoustique.

En France, la législation donne des critères de seuil pour la valeur de DL_2 en fonction du type de local industriel.

Une autre utilisation de la loi de décroissance est de comparer à une distance donnée la différence entre la loi du local et la loi en champ libre : cette valeur appelée « amplification du local » est notée DL_f ; elle est spécifiée par rapport à une distance donnée.

Comme toutes les caractéristiques acoustiques, les paramètres de caractérisation de locaux varient avec la fréquence.

À partir de la loi de décroissance, on peut distinguer différentes zones dans le local : à proximité de la source, l'amplification du local croît, puis elle atteint une valeur quasiment constante : on dit que l'on est alors dans le « champ réverbéré » du local.

2.2. Isolation aux bruits aériens

L'isolation aux bruits aériens est le principe physique qui décrit la quantité d'énergie sonore transmise de l'autre côté d'une paroi par rapport à l'énergie émise face à celle-ci. Elle est quantifiée par l'indice d'affaiblissement R s'exprimant en dB par la relation :

$$R = L_{p1} - L_{p2} - 10 \log A/S, \text{ où :}$$

L_{p1} est le niveau de pression moyen de la paroi côté source,

L_{p2} est le niveau de pression moyen du local de l'autre côté de la paroi,

$\log A/S$ permet de prendre en compte l'effet de l'amplification acoustique éventuelle d'un local de l'autre côté de la paroi.

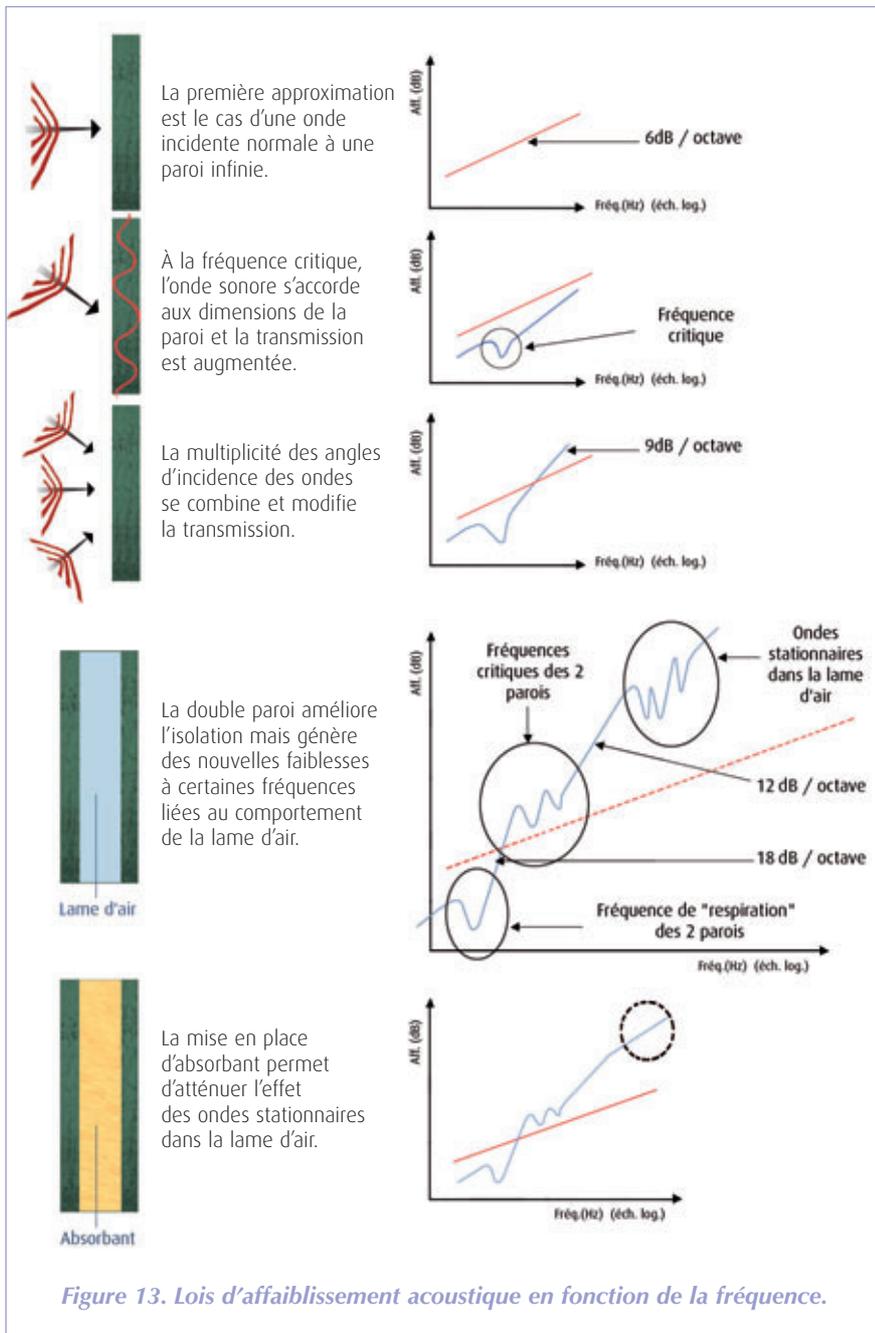


Figure 13. Lois d'affaiblissement acoustique en fonction de la fréquence.

A est l'aire d'absorption équivalente du local : $A = \sum \alpha_i S_i$, où α_i est le coefficient d'absorption acoustique de chaque surface S_i constitutive du local ; S est la surface totale de toutes les parois du local.

Les phénomènes physiques mis en jeu font intervenir la longueur d'onde du son et le comportement dynamique de la paroi : l'isolation varie donc avec la fréquence du son.

En première approximation, on peut considérer que l'isolation croît avec la masse de la paroi et avec la fréquence. Ainsi, les basses fréquences ne pourront être isolées qu'avec des parois très lourdes alors qu'une feuille de papier atténue les ultrasons.

En réalité, l'évolution de l'indice d'affaiblissement R varie de manière particulière en fonction de la fréquence (*figure 13*). On représente cette variation par une courbe, qui se complexifie au fur et à mesure que l'on prend en compte la réalité physique de l'isolation aérienne et la constitution de la paroi. On peut décomposer la construction de cette courbe selon différentes étapes :

① en première approximation, on considère une onde sonore arrivant perpendiculairement sur une paroi infinie : R augmente alors de 6 dB par octave ;

② pour un angle d'incidence donné de l'onde sonore, sa longueur d'onde s'accorde avec celle de la longueur d'onde de propagation du son au sein de la paroi : cette condition s'opère à une fréquence dite critique. L'affaiblissement chute dans cette zone fréquentielle ;

③ la multiplicité des angles d'incidence des ondes se combine et modifie la transmission de telle sorte qu'on distingue trois zones fréquentielles dans l'évolution de R :

– en dessous de la fréquence critique, R suit approximativement la loi d'évolution de 6 dB/octave,

– à la plus basse des fréquences critiques, R diminue,

– au-delà, R augmente approximativement de 9 dB par octave.

C'est cette loi qu'il faut en réalité prendre en compte pour toute paroi simple.

La double paroi améliore l'isolation mais génère des nouvelles faiblesses à certaines fréquences liées au comportement de la lame d'air présente entre les parois :

④ les deux parois sont « couplées » par l'intermédiaire de la lame d'air (selon un phénomène souvent appelé « résonance masse – air – masse ») et l'affaiblissement chute à la fréquence correspondante ; celle-ci est appelée fréquence de respiration ;

⑤ en hautes fréquences, la longueur de certaines ondes s'accorde avec l'épaisseur de la lame d'air ; il s'ensuit que ses réflexions successives « s'ajoutent » et que le niveau sonore est augmenté à la fréquence correspondante. C'est un phénomène d'ondes stationnaires qui génère également une diminution de l'affaiblissement acoustique ;

⑥ l'évolution de R se décrit alors comme suit :

– un premier « creux » à la fréquence de respiration,

– une évolution générale de l'ordre de 18 dB par octave jusqu'aux « creux » des fréquences critiques des deux parois,

– une évolution générale de l'ordre de 12 dB par octave jusqu'aux « creux » des ondes stationnaires.

La mise en place d'absorbant permet d'atténuer l'effet des ondes stationnaires dans la lame d'air.

En résumé, les lois de principe d'évolution de l'affaiblissement acoustique en fonction de la fréquence ne doivent pas occulter l'influence fondamentale des différentes fréquences de diminution de cet affaiblissement : une coïncidence entre l'une de celles-ci et une fréquence dominante du bruit à atténuer annihilerait complètement l'effet d'isolation recherché.

La détermination de ces fréquences de plus faible affaiblissement acoustique (ou de plus grande transparence acoustique) s'obtient par des calculs complexes. On peut cependant obtenir des valeurs approchées à partir de calculs simplifiés. Le plus efficace est de se procurer des procès-verbaux de mesure d'indice d'affaiblissement, souvent disponibles auprès des fournisseurs.

Les lois ci-dessus sont établies pour des parois de dimensions infinies ; la réalité de la limitation des surfaces de paroi fait intervenir l'influence de leur comportement modal. Cependant, celle-ci devient vite négligeable au-delà des très basses fréquences et donc dans la zone dominante de l'audition humaine.

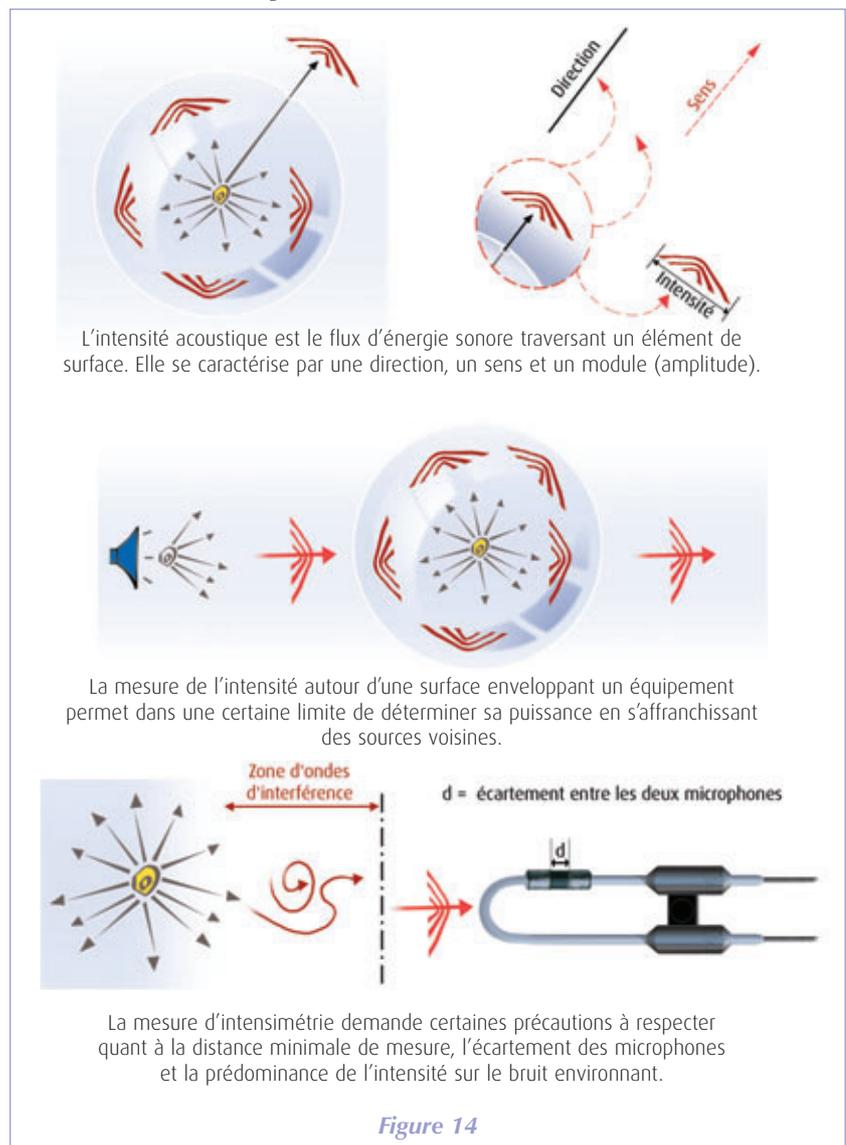
La fréquence critique évoquée ici est la même que celle qui correspond au maximum de rayonnement évoqué par ailleurs.

3. Méthodes de mesure et d'analyse

3.1. Méthodes d'expertise de mesure acoustique

L'intensimétrie

L'intensité acoustique est le flux de l'énergie acoustique qui traverse une unité de surface. Ce paramètre physique est analogue à un vecteur mathématique, c'est-à-dire qu'il est associé à une direction, un sens et un module (son amplitude). Ainsi, l'intensimétrie – mesure de l'intensité – permet de déterminer le « chemin » des énergies sonores, bien sûr sous certaines conditions (figure 14).



Les applications sont multiples. La première est la mesure de la puissance acoustique d'un équipement : en effet, la difficulté de cette mesure est de s'affranchir des niveaux sonores parasites issus de sources voisines. Supposons que l'on mesure l'intensité acoustique autour d'une surface enveloppant l'équipement étudié. Toutes les énergies sonores émises par celui-ci sortent de la surface, alors que celles en provenance des sources parasites entrent d'un côté et ressortent de l'autre. L'intensité prenant en compte le sens des énergies, la somme des énergies des sources parasites s'annule. La somme des énergies restantes sur toute la surface enveloppe donne alors la puissance acoustique de l'équipement.

Cette association d'une énergie sonore à une direction donnée peut aussi être utilisée dans la localisation de sources : le tracé des intensités émergentes d'un équipement permet, dans certains cas, de localiser géographiquement la source de bruit dominante de cet équipement. Cette méthodologie suppose de respecter certaines conditions de mesure et de situation physique et, en particulier, une nette séparation géographique des sources en cause. Sur le même principe, l'intensimétrie peut être utilisée pour la recherche de fuites sonores.

Le capteur utilisé en intensimétrie suivant une direction est une sonde constituée de deux microphones appariés positionnés tête-bêche. Si l'intensimétrie est performante, elle suppose certaines précautions dans son utilisation. On citera en particulier que :

- la gamme de fréquence mesurée dépend de l'écart entre les microphones de la sonde,
- le niveau d'intensité mesuré doit être dominant par rapport au bruit environnant,
- la mesure n'est facilement interprétable qu'à partir d'une certaine distance de la surface de la source.

La zone très proche de la surface source est une zone dite d'interférence, où les ondes sonores suivent des chemins complexes. Comme tout vecteur, l'intensité se décompose en une partie réelle et une partie imaginaire, appelées respectivement intensités « active » et « réactive ». L'intensité active est prépondérante lorsque l'on est éloigné de la source ; c'est elle qui est principalement utilisée.

L'antennerie

L'antennerie est une méthode de mesure qui permet de reconstituer un champ acoustique à partir de mesures effectuées sur une antenne et d'un modèle théorique de propagation du son.

L'antenne elle-même est constituée d'un ensemble de microphones assemblés selon une certaine géométrie ; elle est associée à un système d'acquisition mesurant le signal provenant de tous les microphones. Un logiciel adapté traite ces signaux (figure 15).

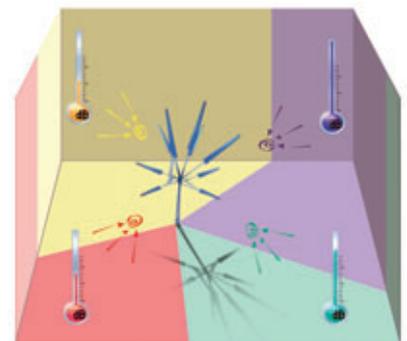
Différents résultats peuvent être obtenus :

- analyse de l'émission sonore : tracer une cartographie de l'émission sonore d'un équipement,



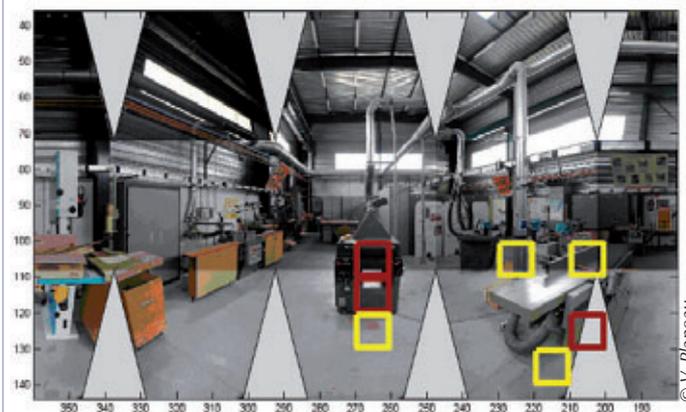
© V. Planeau

Une antenne acoustique est un assemblage de microphones répartis selon une géométrie particulière. Ce dispositif est relié à un système d'acquisition et de traitement des signaux mesurés simultanément.



L'espace environnant est « découpé » en parties élémentaires par le système.

Niveau global 82.4 dB(A) 86.1 dB lin



© V. Planeau

Cette décomposition spatiale permet de déterminer la contribution de chaque partie élémentaire au bruit total reçu au niveau de l'antenne. Les contributions sont hiérarchisées par niveaux de couleur.

Figure 15. Antennerie (illustrations à partir de l'application « ISIT » développée par l'INRS).

- analyse de la réception sonore : estimer, à partir d'un endroit donné, les niveaux sonores provenant d'une certaine direction.

Dans cette dernière application, le traitement des signaux permet de déterminer l'énergie sonore d'une zone spatiale définie (un angle solide). La comparaison des énergies mesurées dans l'espace permet d'identifier la direction privilégiée suivie par le niveau acoustique reçu à la position de l'antenne. Les applications sont donc l'identification des chemins acoustiques (aériens) prépondérants et, par voie de conséquence, les sources prépondérantes pour un poste de réception donné.

*La représentation graphique de champs acoustiques dans l'espace amène à utiliser parfois le terme « d'holographie acoustique ».
Pour l'analyse de sources, l'antennerie a l'avantage d'être plus performante en champ proche que l'intensimétrie.*

3.2. Le diagnostic vibratoire de machines

Le diagnostic vibratoire de machines est une méthode répandue dans le milieu de la maintenance de machines tournantes stratégiques. Il s'agit de procéder à une analyse des vibrations émises par l'équipement pour « remonter » à ses efforts internes et, par là, porter un jugement sur son bon ou mauvais fonctionnement (figure 16).

On sait que le niveau vibratoire varie avec l'évolution des forces internes à la machine. Le diagnostic vibratoire ajoute à cette observation le fait que certaines fréquences sont associées aux différents efforts internes : alignement, roulement, balourd, effets hydrauliques... Ainsi, l'observation du spectre vibratoire de la machine et de son évolution dans le temps permet de dissocier les évolutions de fréquences identifiées et donc des phénomènes associés.

En analyse acoustique, cette méthodologie peut être appliquée dans la recherche de sources sonores prépondérantes, soit en comparant le spectre vibratoire de différentes machines et le spectre acoustique mesuré en un point, soit en identifiant directement sur le spectre de bruit l'origine des fréquences dominantes par rapport aux fréquences attendues sur chaque machine.

Le diagnostic vibratoire de machines est compliqué dans la réalité par différents phénomènes :

- les forces internes peuvent être de différentes natures et se combiner : effort continu permanent, en interaction avec un autre effort, ou effort d'apparition transitoire, éventuellement périodique (choc). Les manifestations spectrales correspondantes peuvent ainsi aller d'une fréquence simple à une modulation entre plusieurs fréquences, ou la présence d'harmoniques ou sous-harmoniques ;
- les phénomènes non périodiques se manifestent par des courbes spectrales réparties sur des plages de fréquence difficiles à identifier ;
- le transfert vibratoire affecte le niveau des vibrations et doit être pris en compte pour hiérarchiser les forces internes qui en sont à l'origine.

De ce fait, dans les cas difficiles, l'expérience est très importante et l'utilisation d'outils d'analyse du signal dits de deuxième niveau peut s'avérer nécessaire : temps-fréquence, démodulation d'amplitude ou de phase, analyse spectrale, analyse temporelle, mesure d'orbites, outils d'analyse dynamique de structures, outils statistiques, mesure de paramètres physiques complémentaires...

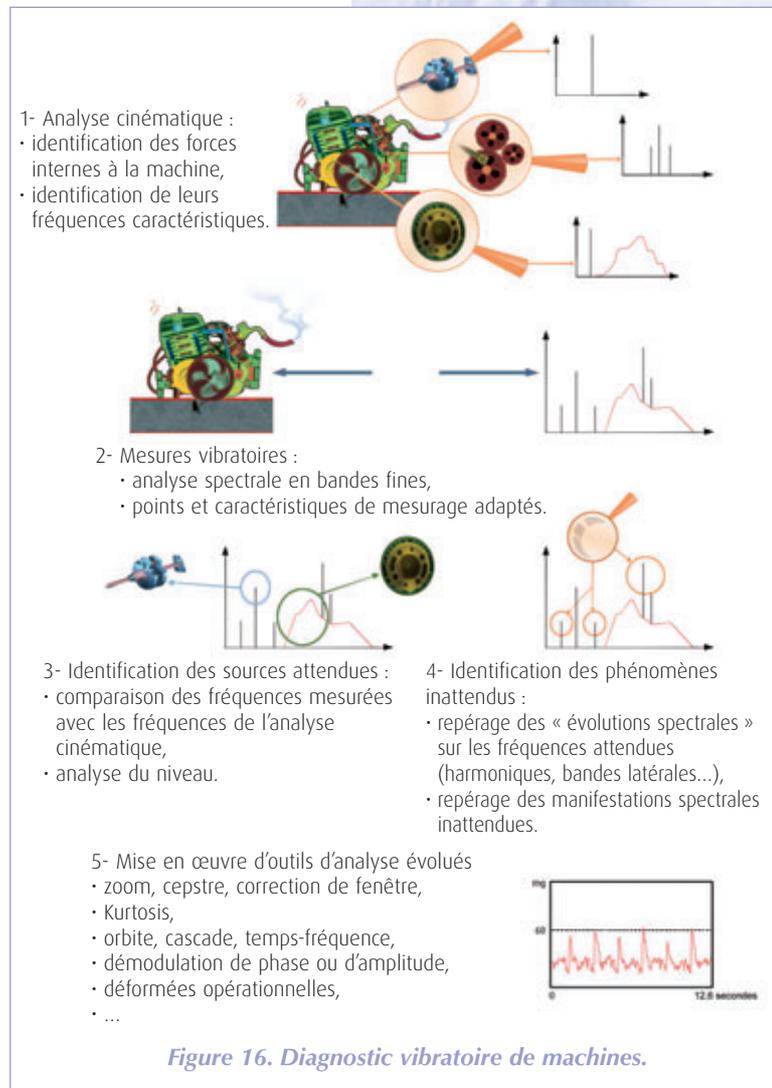


Figure 16. Diagnostic vibratoire de machines.

4. Méthodes de simulation acoustique des locaux

Le principe d'une simulation est de construire un modèle théorique d'une situation pour pouvoir appliquer des variations sur ce modèle et en déduire les nouveaux résultats qui en découle. Cela permet de simuler des modifications sans avoir à procéder à des essais sur un système réel.

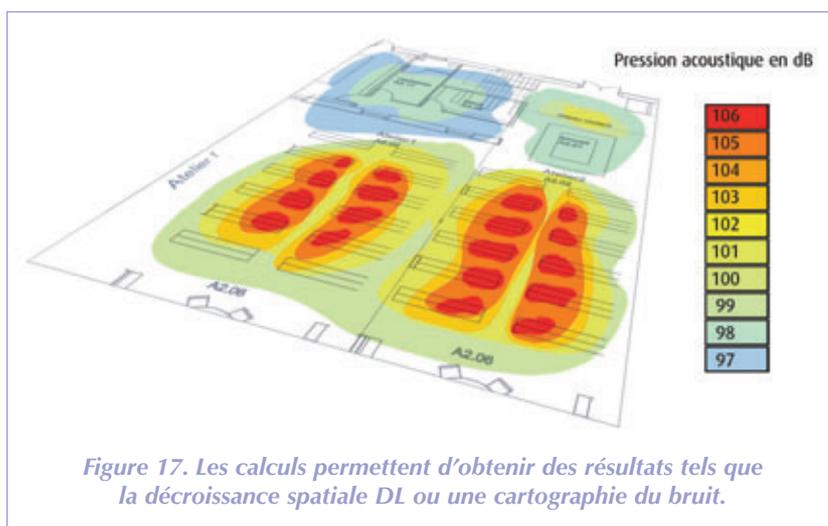
Comme dans tous les domaines physiques, les méthodes de simulation en acoustique sont nombreuses. Elles visent à établir des modèles de comportement mécanique, de comportement modal, de rayonnement, de propagation, d'isolation, d'absorption... On peut citer les outils de calcul utilisés, qui vont des plus classiques [méthode des éléments finis, méthode des éléments frontières, analyse statistique d'énergie (SEA)], à des applications particulières (logiciel RAMO®, développé par l'INRS, pour calculer un champ acoustique à partir de mesures vibratoires...).

La plupart de ces logiciels sont du domaine des spécialistes. Aussi, nous ne présentons ici qu'un type de simulation dont l'utilisation est simple et courante et qui est d'une grande utilité dans la résolution des problèmes de bruit en entreprise : c'est la modélisation de la propagation acoustique dans les locaux.

Les objectifs de la simulation en acoustique des locaux sont les suivants :

- prévoir l'ambiance sonore d'une future installation, nouvelle ou sujette à des modifications importantes ;
- évaluer les caractéristiques acoustiques du local (décroissance spatiale DL, temps de réverbération Tr...);
- prévoir l'évolution de l'ambiance sonore en modifiant certains paramètres (au niveau des sources ou du local) et rechercher ainsi une solution optimale entre moyens mis en œuvre et gain prévisible.

Le résultat de ce type de logiciels est en particulier la représentation des cartographies de niveaux de bruit correspondant à chaque situation étudiée. Le passage à l'exposition sonore se fait en tenant compte des différentes positions des personnes exposées dans le local et des durées associées (figure 17).



Nous donnons ci-après une démarche de simulation basée sur le logiciel RayPlus® (*) mais qui reste générale. Le local est modélisé à partir des données suivantes :

- géométrie des parois,
- encombrement interne (volumes, écrans), détails architecturaux,
- caractéristiques d'absorption des parois,
- emplacement et caractéristiques d'émission sonore des sources.

La propagation du bruit est modélisée par la méthode des rayons. Un grand nombre de rayons sont émis depuis la source et se réfléchissent sur les parois jusqu'au récepteur. À chaque réflexion, l'absorption des parois atténue l'énergie des rayons. On calcule le niveau de bruit aux points de réception désirés en sommant les énergies résiduelles des rayons aboutissant en ce point.

Les modifications apportées au modèle permettent d'évaluer leur impact : ajout ou remplacement de sources, déplacement de sources ou récepteurs, diminution des émissions des sources, modification des absorptions... On peut ainsi rechercher de manière simple l'aménagement optimal, entre moyens mis en œuvre et objectifs de gain acoustique.

Le type de modélisation présenté ici implique certaines hypothèses simplificatrices : en particulier, les modes acoustiques du local ne sont pas pris en compte, ainsi que les phases entre les différentes sources et rayons, la diffraction sur les arêtes ou les discontinuités géométriques des parois... Ces simplifications n'ont pas une incidence importante en moyennes fréquences, qui est la zone prépondérante pour l'exposition des travailleurs. La méthode permet ainsi une modélisation simple et des calculs rapides. Il existe différents logiciels de calcul d'acoustique prévisionnelle dans les locaux. Ils peuvent varier au niveau de certains critères tels que : facilité d'utilisation, rapidité des calculs, richesse des données disponibles (données géométriques, caractéristiques d'absorption de matériaux), hypothèses et précision du calcul...

(*) RayPlus Acoustique, développé par l'INRS, est un logiciel de prévision des niveaux sonores dans les locaux industriels.

Annexes

Glossaire

En gras, les mots définis ailleurs dans le glossaire.

Absorption

Dissipation de l'énergie sonore par un système adapté, en principe recouvrant les parois ; voir **coefficient d'absorption**.

Aérien

Propre à l'air ambiant ; une **source** aérienne produit directement la variation de pression dans l'air ambiant ; une **propagation** aérienne traverse l'air ambiant.

Aléatoire

Dont on ne peut pas prévoir l'évolution dans le temps. Opposé à « déterministe ».

Amortissement

Grandeur caractérisant la dissipation d'énergie dans un système mécanique, tout système mécanique étant un assemblage d'un élément massique (masse), d'un élément dissipatif (amortisseur) et d'un élément élastique (ressort).

Analyse modale

Méthode de calcul et/ou de mesure permettant de déterminer les caractéristiques **modales** d'une **structure** : **fréquences**, **amortissements** et **déformées propres**.

Analyse spectrale

Méthode permettant d'obtenir la décomposition en **fréquences** d'un **signal** (bruit, vibration, etc.).

Antenne (acoustique)

Ensemble de microphones assemblés selon une géométrie précise associée à un système de mesure d'**antennerie**.

Antennerie

Méthode de mesure permettant de localiser des **sources** sonores dans l'espace ; selon la performance du système, l'antennerie peut permettre de réaliser des cartographies sonores, hiérarchiser ou quantifier la participation de sources spatiales dans un niveau sonore global.

Atténuation

Différence entre un niveau d'entrée et un niveau de sortie (émission/réception, entrée/sortie d'un appareil de mesure...). S'exprime en **décibel**.

Bande fine

Représentation **spectrale** correspondant à une largeur fréquentielle très étroite ; la bande fine « idéale » correspond à un sinus, elle est théoriquement infiniment étroite (une seule **fréquence**).

Bruit

Fluctuation de pression dans un milieu ambiant, perceptible par l'oreille humaine. On oppose parfois un son à un bruit, le premier étant constitué de **bandes fines**, le second étant de nature **aléatoire**. Par extension, le mot bruit est utilisé pour identifier des phénomènes très divers : bruit électronique d'appareillage, bruit d'ambiance...

Bruit ambiant

Niveau sonore pour un endroit, une situation et un instant donnés. Il prend en compte tout l'environnement de la mesure : l'ensemble des sources, l'influence du local, les conditions d'opération du moment...

Capotage

Dispositif de recouvrement d'un équipement destiné à limiter la **propagation** du bruit qu'il émet. Analogue à un **encoffrement**, mais dans le langage usuel, de dimensions plus réduites ou d'épaisseur moindre.

Champ diffus

Champ sonore fréquentiel dans lequel la densité des **modes** acoustiques du local est telle que son amplification est constante avec la fréquence.

Champ libre

Zone géographique dans laquelle le niveau sonore décroît de la même manière qu'en plein air, sans influence de l'environnement ou du local.

Champ lointain

Zone géographique comprenant le **champ réverbéré** et la zone de transition entre le champ proche et le champ réverbéré.

Champ proche

Zone proche d'une **source** dans laquelle le niveau sonore provient principalement directement de celle-ci, sans influence du local.

Champ réverbéré

Zone éloignée de **sources** dans laquelle le niveau sonore est dû principalement aux réflexions du local.

Chemin (du bruit)

Trajet de **propagation** du bruit entre la **source** et le **récepteur**.

Coefficient d'absorption α d'un matériau

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance sonore absorbée par le matériau et la puissance sonore incidente (plus α se rapproche de 1 et plus le matériau est absorbant).

Contrôle actif

Procédé consistant à atténuer l'énergie acoustique ou vibratoire émise par la mise en œuvre d'une source artificielle générant un bruit ou une vibration « opposée », c'est-à-dire en **opposition de phase**.

Correction (acoustique)

Traitement d'un local pour améliorer son acoustique intérieure et, en particulier, éviter les réflexions de ses parois.

Décibel

Quantification du bruit par un rapport logarithmique entre le niveau mesuré et un niveau de référence. En acoustique, les références de niveau sont normalisées et le décibel est (abusivement) considéré comme une unité de mesure.

Déformée (vibratoire)

Mouvement oscillatoire d'une **structure** vibrante. Ce peut être la déformée d'un **mode propre** (associée à une fréquence propre), ou une déformée dite opérationnelle sous l'effet des forces générées par le fonctionnement d'un équipement.

Déphasage

Décalage entre deux sinus qui s'exprime par un angle ; en faisant correspondre 360 degrés à la période d'un cycle du mouvement, on ramène ce décalage à un « retard » entre les mouvements sinusoïdaux.

Diffraction

Diffusion d'un rayon dans plusieurs directions au passage d'une arête. En acoustique, phénomène caractéristique affectant les ondes sonores sur les côtés d'un **écran**.

Directivité

Répartition géographique de l'**émission** sonore d'une **source** ; cette « cartographie » met en évidence les directions privilégiées d'émission. La directivité est propre à chaque source et varie avec la **fréquence**.

DL

Abréviation pour « décroissance de local » : paramètre caractérisant la loi de décroissance sonore au travers d'un local. La DL correspond à l'atténuation du niveau sonore par doublement de distance.

Écran

Paroi qui n'est pas jointive sur ses 4 côtés, mise en place auprès d'un opérateur pour atténuer le niveau sonore reçu. C'est en général une cloison amovible.

Éléments finis (méthode de simulation par -)

Méthode de calcul numérique basée sur la décomposition d'une **structure** en petits éléments de géométrie simple. Les équations physiques sont appliquées à ces petits éléments et l'assemblage des résultats sur l'ensemble de la structure permet de simuler son comportement global.

Émission

Phénomène physique à l'origine du **bruit**, généré au niveau de la **source**.

Encoffrement

Structure enveloppant une **source** sonore (machine) conçue pour protéger l'environnement de cette source sonore.

EPI

Équipement de protection individuelle ; en acoustique, voir « **PICB** ».

Évanescentes (ondes -)

Ondes sonores très proches de la surface d'**émission** du bruit. Leur chemin complexe rend difficile l'interprétation de leur mesure.

Excitation

Ensemble des sollicitations appliquées à une **structure** : forces, moments, pressions...

Exposition

Quantité de **bruit** reçu par un opérateur, même mobile, pendant une durée donnée ; par défaut, cette durée correspond à 8 heures.

Exposition sonore quotidienne

Niveau de pression acoustique continu équivalent pour une durée correspondant à une journée de travail de 8 heures, exprimé en dB(A) (noté **L_{Ex,d}**). C'est le paramètre de référence de la réglementation.

Fréquence

Nombre de cycles ou d'oscillations par secondes.

Fréquence critique

Fréquence à laquelle l'**isolation** acoustique d'une paroi est la plus faible.

Fréquence propre

Fréquence d'oscillation **libre** d'une **structure**, par exemple après un choc ou un essai de lâcher. À la fréquence propre, la **structure** vibre « naturellement » et est susceptible d'entrer en **résonance**. Une structure a une infinité de fréquences propres.

Fuites acoustiques

Défauts d'**isolation** dus à la présence d'ouvertures dans une paroi ou un **encoffrement**. On peut définir un coefficient de fuite qui est le rapport entre la surface de toutes les ouvertures de l'encoffrement non traitées du point de vue acoustique et la surface totale intérieure de l'encoffrement (ouvertures comprises).

Harmonique

Multiple fréquentiel ; 100 Hz est l'harmonique 2 de 50 Hz.

Hertz (Hz)

Unité de mesure de la **fréquence**, correspondant à un cycle ou une oscillation par seconde.

Holographie

Détermination d'une cartographie de bruit autour d'une source ; les mesures utilisent un système d'**antennerie**.

Indice d'affaiblissement R d'une paroi

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance sonore incidente et la puissance sonore qui traverse la paroi (puissance transmise).

Cette grandeur, dont la valeur est obtenue en laboratoire, fait abstraction des **transmissions** latérales et ne prend pas en compte les conditions réelles de pose du matériau.

L'indice d'affaiblissement est exprimé en **décibels**.

Intensimétrie

Méthode de mesure de l'**intensité** acoustique.

Intensité (acoustique)

Quantité de bruit passant par une unité de surface ; mathématiquement, l'intensité acoustique est le produit de la vitesse de l'onde sonore par sa pression.

Isolation (acoustique)

Ensemble des procédés mis en œuvre pour obtenir des **isolements** acoustiques déterminés.

Isolation active

Expression ambiguë pour « **contrôle actif** ».

Isolation vibratoire

Ensemble des procédés mis en œuvre pour atténuer la **transmission** vibratoire (**solidienne**) entre deux points. Les dispositifs correspondants sont en principe des éléments très souples. L'isolation vibratoire n'a pas pour objectif de diminuer les vibrations d'une **source**, mais leur transmission dans le milieu environnant.

Isolement aérien

Atténuation sonore obtenue par un dispositif placé entre deux milieux aériens. Se caractérise par un **indice d'affaiblissement** pour une paroi, une **perte par insertion** pour un **encoffrement**.

L_{Aeq,T}

Niveau de pression acoustique continu équivalent pour une durée de mesure T, exprimé en dB(A). Ce peut être une exposition sonore à un poste de travail. La combinaison des L_{Aeq,T} de tous les postes de travail d'un opérateur, sur 8 heures, donne le **L_{Ex,d}**.

Leq

Niveau (anglais « Level ») équivalent : niveau correspondant à la moyenne énergétique du **signal** fluctuant.

L_{Ex,d}

Voir « **exposition sonore quotidienne** ».

Libre

Se dit : – d'une **structure** en mouvement, qui n'est pas sollicitée par une **excitation** ;
– d'une liaison sans contrainte d'une structure avec son environnement (structure désolidarisée).

Lp

Niveau (anglais « Level ») de pression acoustique, homogène au **bruit** perçu par l'oreille. Le Lp varie dans le temps. Le terme de « Niveau » implique que c'est un rapport positif dans lequel la pression est ramenée à une référence (en l'occurrence 20 µPa).

Liquidien

De nature liquide. Se dit d'une **source** ou d'un chemin de **propagation**.

Loi de décroissance

Évolution du niveau sonore perçu au travers d'un local selon une droite définie, pour une **source** sonore placée à une extrémité. Caractérise l'influence acoustique d'un local. Voir « **DL** ».

Lw

Niveau (anglais « Level ») de **puissance** acoustique. Le terme de « niveau » implique que c'est un rapport positif dans lequel la pression est ramenée à une référence (en l'occurrence 10^{-12} Watt).

Maillage

Découpage virtuel d'une surface (ou d'un volume) en éléments géométriques le plus souvent réguliers, les points communs aux éléments étant appelés « **nœuds** » ; le maillage permet de localiser des points (de mesure ou de calcul) dans l'espace (par rapport à la géométrie de l'équipement par exemple).

Masse surfacique

Masse par unité de surface (en kg/m^2).

Modal

Relatif à un **mode propre**. « Comportement modal » : se dit d'un comportement vibratoire très influencé par un mode propre.

Mode propre

Caractéristique du comportement vibratoire d'une **structure**, comprenant la **fréquence**, la **déformée** et l'**amortissement** propres. Une structure a une infinité de modes propres qui lui sont spécifiques.

C'est le comportement vibratoire « naturel » de la structure qu'elle suivra préférentiellement si l'**excitation** appliquée le permet.

Nœud

Point singulier ; un « nœud acoustique ou vibratoire » est un point de niveau nul. Un « nœud de **maillage** » est un point géométrique défini par l'intersection des lignes du maillage.

Niveau

Quantification relative d'une quantité : on divise sa valeur par une valeur de référence et on en fait le logarithme.

Octave

Domaine fréquentiel compris entre une **fréquence** et le double de cette fréquence.

En pratique, les octaves sont normalisées.

Elles sont désignées par leur fréquence centrale (octave à 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, etc.).

Onde sonore

Caractérise le trajet d'un **son**, avec sa trajectoire et les fluctuations de pression en chaque point.

Onde stationnaire

Onde sonore dont la longueur s'accorde avec une des dimensions du milieu qui la contient (local, tuyau...); il s'ensuit que ses réflexions successives « s'ajoutent » et que le niveau sonore est augmenté à la fréquence correspondante.

Opposition de phase

Déphasage de 180 degrés entre deux sinusoïdes qui a pour conséquence de faire coïncider le maximum de l'une avec le minimum de l'autre ; les mouvements correspondants sont alors opposés, c'est-à-dire en sens contraires.

Périodique

Se dit d'un phénomène continu qui se reproduit de manière identique au bout d'un certain temps appelé « période ».

Perte par insertion

Réduction du niveau sonore due à l'**encoffrement**. Elle correspond à la différence du niveau sonore mesuré sans l'encoffrement et du niveau sonore mesuré avec l'encoffrement.

La perte par insertion exprimée en **puissance** acoustique représente une réduction globale sur l'ensemble des faces de l'encoffrement.

La perte par insertion exprimée en pression acoustique représente la réduction en un point spécifié.

La perte par insertion est exprimée en **décibels**.

Phase

Décalage temporel entre deux **signaux**.

PICB

Protecteur individuel contre le bruit (coquilles, bouchons d'oreille...). C'est l'EPI du bruit.

Propagation

Trajet suivi par le son entre une **source** et un **récepteur**.

Puissance acoustique

« Capacité d'émission sonore » d'une source, indépendante du point, du moment de mesure et de l'environnement de la **source**. Voir **Lw**.

Raideur

Caractéristique physique représentée par un ressort ; pour une même force appliquée, plus la raideur est grande, plus le déplacement est petit.

Raie (spectrale)

Représentation d'un sinus sur un spectre.

Récepteur

Point ou personne auquel le bruit parvient.

Rayonnement

Transformation de la vibration d'une structure en **bruit** dans l'air ambiant. Par extension, émission de bruit en limite d'une **source** (paroi ou ouverture).

Résonance

Amplification vibratoire apparaissant lorsqu'une **fréquence** de l'effort appliquée à une **structure** correspond à une **fréquence propre** de celle-ci.

Réverbération

Réflexion des **ondes sonores** sur les parois internes d'un local.

Signal

Résultat du mesurage d'un phénomène physique, en général sous forme électrique ou numérique : un signal de **bruit** illustre le bruit mesuré.

Signal temporel

Représentation de l'évolution d'un **signal** dans le temps.

Silencieux

Dispositif mis en place au niveau d'une **source aérienne** pour diminuer son niveau d'**émission**.

Solidien

Propre à un milieu solide. Une source solidienne produit la variation de pression dans l'air ambiant par le contact entre deux pièces solides ; une propagation solidienne parcourt un milieu solide.

Son

Fluctuation de pression du milieu ambiant à une ou plusieurs **fréquences** bien définies (**bandes fines**).

Source

Phénomène ou élément à l'origine du **bruit** émis.

Source apparente

Élément considéré comme **source** mais comprenant en son sein des **sources primaires** dont le bruit se transmet jusqu'aux limites de la source apparente. Ces limites génèrent du bruit **solidien** par des vibrations (parois) et des bruits **aériens** par des variations de pression (ouvertures).

Source primaire

Première **source** dans la chaîne d'**émission** du bruit ; se manifeste par une force en bruit **solidien**, par une variation de pression en bruit **aérien**.

Spectre

Représentation fréquentielle du signal vibratoire ou acoustique. Peut être par bandes d'**octaves** ou en **bandes fines**.

SSR

Source Sonore de Référence : **source** sonore répondant à des spécifications minimales en directivité, stabilité, répartition **spectrale** et puissance. Les SSR sont utilisées en qualification de locaux (mesure de **DL**) et pour certaines méthodes de détermination de **puissance** acoustique d'équipements.

Structure

Élément ou ensemble d'éléments solides reliés entre eux : châssis, carter, charpente, bâtiment, rotor...

Transfert (vibratoire)

Caractérise le lien entre une force appliquée à une **structure** et la vibration qui en résulte. Le transfert dépend essentiellement des **modes propres** de la structure.

Transmission

Passage d'un phénomène physique d'un point à l'autre : transmission d'effort de part et d'autre d'une liaison, **propagation** vibratoire ou acoustique le long d'un chemin donné...

Transparence

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance sonore qui traverse le matériau (puissance transmise) et la puissance sonore incidente. Il caractérise la quantité de puissance sonore qui « traverse » une paroi. Il s'agit de l'inverse de l'**indice d'affaiblissement** acoustique, paramètre que l'on utilise de préférence.

Liste d'institutions et d'organismes

Vous trouverez des informations sur le bruit sur les sites suivants.

- L'**INRS** (Institut national de recherche et de sécurité) a pour rôle de contribuer à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles afin d'assurer la protection de la santé et de la sécurité de l'homme au travail. Site Internet : www.inrs.fr
- Le **CIDB** (Centre d'information et de documentation sur le bruit) est une association loi 1901 dont la mission est d'informer, sensibiliser, documenter et former sur le thème de la protection de l'environnement sonore. Créé en 1978 à l'initiative du ministère de l'Environnement, le CIDB est l'interlocuteur privilégié tant du grand public que des quelque 1 000 organismes publics ou privés intervenant dans le domaine de la lutte contre le bruit. Partenaire naturel du ministère de l'Écologie et du Développement durable, le CIDB bénéficie également depuis sa date de création du soutien du ministère de l'Équipement. Site Internet : <http://www.infobruit.org>
- Le **CERTU** (Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques) est un service technique à compétence nationale du ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement. Sa mission principale est la contribution au progrès des connaissances et des pratiques professionnelles dans tous les domaines liés à l'aménagement, l'environnement urbain et les transports. Site Internet : <http://www.certu.fr/>
- L'**INRETS** (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) : créé par décret interministériel du 18 septembre 1985, l'INRETS est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la double tutelle du ministère de la Recherche et du ministère chargé des Transports. L'INRETS a pour mission d'effectuer, de faire effectuer ou d'évaluer toutes recherches et tous développements technologiques consacrés à l'amélioration pour la collectivité, des systèmes et moyens de transports et de circulation du point de vue technique, économique et social. Site Internet : <http://www.inrets.fr/>
- L'**INERIS** (Institut national de l'environnement industriel et des risques) a pour mission d'évaluer et de prévenir les risques accidentels ou chroniques pour l'homme et l'environnement liés aux installations industrielles, aux substances chimiques et aux exploitations souterraines. Créé en 1990, l'INERIS est un établissement public à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de l'Écologie et du Développement durable. Site Internet : <http://www.ineris.fr/index.htm>

- **EurLex** est le portail d'accès au droit de l'Union européenne ; on y trouvera les directives européennes sur le bruit. Site Internet : <http://europa.eu.int/eur-lex/fr/index.html>

- **Legifrance** est le service public de la diffusion du droit français. Site Internet : <http://www.legifrance.gouv.fr/>

- L'**Afnor** (Association française de normalisation) a été créée en 1926 ; elle est reconnue d'utilité publique et est placée sous la tutelle du ministère chargé de l'Industrie. L'Afnor est aujourd'hui un groupe de services dont l'objectif est d'assurer la compétitivité et l'influence du système français de normalisation dans le contexte de la construction européenne et de la mondialisation de l'économie.

« Normes en ligne » est un service de l'Afnor qui permet par le biais d'Internet de retrouver une norme puis de se la procurer. « Infonorme » est un service téléphonique de renseignement. N° de tél. : 01 41 62 70 44. Site Internet : <http://www.afnor.fr/portail.asp>

- L'**Iso** est un réseau d'instituts nationaux de normalisation de 146 pays, selon le principe d'un membre par pays, dont le secrétariat central situé à Genève (Suisse) assure la coordination d'ensemble. Parce que le nom de l'Organisation internationale de normalisation donnerait lieu à des abréviations différentes selon les langues (« IOS » en anglais et « OIN » en français), il a été décidé d'emblée d'adopter un mot dérivé du grec *isos*, signifiant « égal ». La forme abrégée du nom de l'organisation est par conséquent toujours ISO. Site Internet : <http://www.iso.ch/iso/fr/ISOOnline.frontpage>

- Le **CSTB** : créé en 1947, le CSTB (Centre scientifique et technique du bâtiment) est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle du ministère du Logement, de la direction générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction. Le CSTB décline son expertise globale du bâtiment dans les métiers de la recherche, du conseil, de l'évaluation et de la diffusion du savoir. Site Internet : <http://www.cstb.fr/>

Pour commander les films (en prêt), les brochures et les affiches de l'INRS, adressez-vous au service prévention de votre CRAM ou CGSS.

Services prévention des CRAM

ALSACE-MOSELLE

(67 Bas-Rhin)
14 rue Adolphe-Seyboth
BP 10392
67010 Strasbourg cedex
tél. 03 88 14 33 00
fax 03 88 23 54 13
www.cram-alsace-moselle.fr

(57 Moselle)
3 place du Roi-George
BP 31062
57036 Metz cedex 1
tél. 03 87 66 86 22
fax 03 87 55 98 65
www.cram-alsace-moselle.fr

(68 Haut-Rhin)
11 avenue De-Lattre-de-Tassigny
BP 70488
68018 Colmar cedex
tél. 03 89 21 62 20
fax 03 89 21 62 21
www.cram-alsace-moselle.fr

AQUITAINE

(24 Dordogne, 33 Gironde,
40 Landes, 47 Lot-et-Garonne,
64 Pyrénées-Atlantiques)
80 avenue de la Jallère
33053 Bordeaux cedex
tél. 05 56 11 64 00
fax 05 56 39 55 93
documentation.prevention@cramaquitaine.fr

AUVERGNE

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,
63 Puy-de-Dôme)
48-50 boulevard Lafayette
63058 Clermont-Ferrand cedex 1
tél. 04 73 42 70 22
fax 04 73 42 70 15
preven.cram@wanadoo.fr

BOURGOGNE et FRANCHE-COMTÉ

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs, 39 Jura,
58 Nièvre, 70 Haute-Saône,
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,
90 Territoire de Belfort)
ZAE Cap-Nord
38 rue de Cracovie
21044 Dijon cedex
tél. 03 80 70 51 22
fax 03 80 70 51 73
prevention@cram-bfc.fr

BRETAGNE

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)
236 rue de Châteaugiron
35030 Rennes cedex
tél. 02 99 26 74 63
fax 02 99 26 70 48
www.cram-bretagne.fr

CENTRE

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)
36 rue Xaintrailles
45033 Orléans cedex 1
tél. 02 38 81 50 00
fax 02 38 79 70 30
prev@cram-centre.fr

CENTRE-OUEST

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)
4 rue de la Reynie
87048 Limoges cedex
tél. 05 55 45 39 04
fax 05 55 79 00 64
doc.tapr@cram-centreouest.fr

ÎLE-DE-FRANCE

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne,
78 Yvelines, 91 Essonne,
92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)
17-19 place de l'Argonne
75019 Paris
tél. 01 40 05 32 64
fax 01 40 05 38 84
prevention.atmp@cramif.cnamts.fr

LANGUEDOC-ROUSSILLON

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault,
48 Lozère, 66 Pyrénées-Orientales)
29 cours Gambetta
34068 Montpellier cedex 2
tél. 04 67 12 95 55
fax 04 67 12 95 56
prevdoc@cram-lr.fr

MIDI-PYRÉNÉES

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne,
32 Gers, 46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées,
81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)
2 rue Georges-Vivent
31065 Toulouse cedex 9
tél. 05 62 14 29 30
fax 05 62 14 26 92
doc.prev@cram-mp.fr

NORD-EST

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne,
52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle,
55 Meuse, 88 Vosges)
81 à 85 rue de Metz
54073 Nancy cedex
tél. 03 83 34 49 02
fax 03 83 34 48 70
service.prevention@cram-nordest.fr

NORD-PICARDIE

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise,
62 Pas-de-Calais, 80 Somme)
11 allée Vauban
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex
tél. 03 20 05 60 28
fax 03 20 05 63 40
www.cram-nordpicardie.fr

NORMANDIE

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche,
61 Orne, 76 Seine-Maritime)
Avenue du Grand-Cours, 2022 X
76028 Rouen cedex
tél. 02 35 03 58 21
fax 02 35 03 58 29
catherine.lefebvre@cram-normandie.fr
dominique.morice@cram-normandie.fr

PAYS DE LA LOIRE

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire,
53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)
2 place de Bretagne
BP 93405, 44034 Nantes cedex 1
tél. 02 51 72 84 00
fax 02 51 82 31 62
prevention@cram-pl.fr

RHÔNE-ALPES

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme,
38 Isère, 42 Loire, 69 Rhône,
73 Savoie, 74 Haute-Savoie)
26 rue d'Aubigny
69436 Lyon cedex 3
tél. 04 72 91 96 96
fax 04 72 91 97 09
preventionrp@cramra.fr

SUD-EST

(04 Alpes-de-Haute-Provence,
05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes,
13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse Sud,
2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)
35 rue George
13386 Marseille cedex 5
tél. 04 91 85 85 36
fax 04 91 85 75 66
documentation.prevention@cram-sudest.fr

Services prévention des CGSS

GUADELOUPE

Immeuble CGRR
Rue Paul-Lacavé
97110 Pointe-à-Pitre
tél. 05 90 21 46 00
fax 05 90 21 46 13
lina.palmon@csgs-guadeloupe.fr

GUYANE

Espace Turenne Radamonthe
Route de Raban, BP 7015
97307 Cayenne cedex
tél. 05 94 29 83 04
fax 05 94 29 83 01

LA RÉUNION

4 boulevard Doret
97405 Saint-Denis cedex
tél. 02 62 90 47 00
fax 02 62 90 47 01
prevention@cgss-reunion.fr

MARTINIQUE

Quartier Place-d'Armes
97210 Le Lamentin cedex 2
tél. 05 96 66 51 31
05 96 66 51 32
fax 05 96 51 81 54
prevention@cgss-martinique.fr

Ce guide a été rédigé à l'intention des personnels d'entreprises et de préventeurs non spécialistes, mais motivés soit pour analyser un problème, soit pour être à même de suivre son analyse par un intervenant expert. Il a été rédigé en concertation avec des intervenants sur site issus de Centres de mesures physiques de CRAM afin d'assurer son adaptation aux préoccupations du terrain.

Le guide couvre l'ensemble du périmètre concerné (machines, local, salarié). La présentation d'un problème de bruit est structurée (génération, propagation et réception) de manière à aider les lecteurs à comprendre les interactions entre les différents phénomènes physiques. Les solutions de réduction du bruit sont placées dans ce contexte afin d'avoir un fil directeur dans l'analyse d'un problème. Une méthodologie et des éléments sont donnés afin d'aider au choix des solutions les plus appropriées en fonction de la situation. La conception de ce guide permet de l'utiliser comme un document de référence simple, utilisable au cas par cas.

