



Lutte contre le bruit des machines et des installations

**Instructions pour les concepteurs et
les ingénieurs de développement**

Suva

Secteur Physique
Case postale, 6002 Lucerne

Renseignements

Tél. 041 419 61 34
akustik@suva.ch

Lutte contre le bruit des machines et des installations**Auteur**

Walter Lips

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

1^{ère} édition - 1983

Édition complètement remaniée - novembre 2009

Édition actuelle - mai 2010

Téléchargement

Cette publication n'est disponible que sous la forme d'un fichier informatique PDF.

Téléchargement: www.suva.ch/waswo-f/66076

Sommaire

1	Introduction	2	7	Réduction du rayonnement acoustique	53
2	Terminologie	6	7.1	Rayonnement de son aérien par les ouvertures	53
3	Méthodologie de construction et aspects acoustiques	12	7.2	Rayonnement de son solidien	53
3.1	Aperçu des tâches et de la méthodologie de la construction	12	7.2.1	Généralités	53
3.2	Modélisation du flux acoustique	13	7.2.2	Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles	53
3.3	Mécanisme de génération du bruit	15	7.3	Exemples	55
3.4	Mécanismes de transmission du son	15	7.3.1	Apport de matériaux	55
3.4.1	Aperçu	15	7.3.2	Bâti de machine	57
3.4.2	Transmission du son solidien et du son dans les liquides	15	8	Exigences acoustiques pour les différents composants	58
3.4.3	Transmission du son aérien	15	8.1	Introduction	58
3.5	Mécanismes du rayonnement du son	15	8.2	Principe	58
4	Modélisation du flux acoustique	16	8.3	Exigences pour les composants individuels	59
4.1	Principe	16	9	Essais sur prototype	60
4.2	Analyse acoustique des points faibles	19	9.1	Généralités	60
4.3	Règles de construction en acoustique des machines	19	9.2	Détermination des sources de bruit	60
5	Réduction de la génération de bruit	21	9.3	Évaluation des sources de bruit	63
5.1	Principes de l'insonorisation	21	9.4	Modifications du prototype	63
5.2	Sources de son aérien	21	9.5	Estimation de l'efficacité	64
5.2.1	Turbulence	21	10	Limites des possibilités techniques	66
5.2.2	Chocs et pulsations	24	Annexe A	Condensé des règles de construction	67
5.3	Sources de bruit dans les liquides	25	Annexe B	Exigences pour la conception de machines peu bruyantes	71
5.3.1	Règles de construction	25	Annexe C	Contrôle des performances	74
5.3.2	Cavitation	26	Bibliographie	76	
5.4	Sources de son solidien	27			
5.4.1	Classification de l'excitation: aperçu	27			
5.4.2	Chocs	28			
5.4.3	Roues dentées	30			
5.4.4	Bruits de roulement	32			
5.4.5	Forces dues à la masse	32			
5.4.6	Frottement, auto-excitation	33			
5.4.7	Champs magnétiques	34			
5.4.8	Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles	34			
6	Réduction de la transmission de bruit	39			
6.1	Transmission du son aérien	39			
6.1.1	Capotages insonorisants	39			
6.1.2	Parois mobiles	40			
6.1.3	Silencieux	41			
6.2	Transmission du bruit par les liquides	43			
6.3	Transmission du son solidien	45			
6.3.1	Généralités	45			
6.3.2	Isolation vibratoire	46			
6.3.3	Amortissement	48			
6.3.4	Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles	49			

1 Introduction

Nombre d'utilisateurs et de fabricants de machines et d'installations consentent des efforts importants pour réduire l'émission sonore de leurs produits. En partie, cela a abouti à des succès remarquables. Cependant, dans de nombreuses entreprises assurées par la Suva, on observe des immissions de bruit importantes, mettant en danger l'ouïe des personnes. La lutte contre le bruit demeure donc une préoccupation majeure.

La lutte contre le bruit sur le plan technique se déroule essentiellement à trois niveaux :

- Mise en œuvre de méthode de travail, de machines et d'installations nouvelles, plus silencieuses
- Capotage des machines et des installations très bruyantes
- Mesures d'insonorisation dans les locaux de travail

Cette publication concerne essentiellement le premier point, soit la conception de machines et d'installations moins bruyantes, c.-à-d. la lutte contre le bruit à la source.

Objectifs de la présente publication

Lutter contre le bruit à la source est judicieux et, également possible. Ceci implique des mesures constructives. Les méthodes, moyens et démarches à disposition pour atteindre cet objectif sont connus de longue date. Toutefois, dans le monde des concepteurs de machines, ces connaissances sont trop peu répandues. Aussi, la présente publication expose les connaissances indispensables, ainsi que de nombreux exemples tirés de la pratique.

Dans de nombreux domaines, des mesures sont entreprises en vue d'améliorer la qualité de vie à la place de travail, pourtant dans aucun secteur on conçoit et l'on réalise autant de mesures inappropriées que dans la lutte contre le bruit – souvent par méconnaissance des mécanismes de génération du bruit et des voies, respectivement, de transmission et de propagation du son. Pourtant, la lutte contre le bruit n'est pas si compliquée, qu'un profane motivé ne puisse identifier les problèmes essentiels.

C'est pourquoi, la présente publication expose les relations les plus importantes du point de vue de l'acoustique, transmet les bases méthodologiques et présente les interactions entre les divers types de bruit. Il s'agit d'évoquer les notions fondamentales. Dans les parties théoriques, des formules mathématiques ne sont introduites que là où cela est vraiment nécessaire. Sinon, une présentation des méthodes de calcul, parfois très élaborées, est omise. Ce qui est plus important, ce sont les nombreux exemples tirés de la pratique qui illustrent l'efficacité des mesures mises en œuvre.

À l'intention des personnes intéressées aux détails des méthodes de calcul permettant d'optimiser du point de vue acoustique les éléments de machines, nous les renvoyons à la bibliographie figurant en fin de publication.

La lutte contre le bruit sur le plan technique a ses limites

La lutte contre le bruit faisant appel à des mesures constructives a ses limites. Même le spécialiste en insonorisation le plus éclairé n'est pas à même de trouver une solution technique à chaque problème acoustique.

Souvent, le succès des mesures techniques de réduction contre le bruit est entravé par les accroissements de la production, avec comme corollaire une augmentation de la puissance d'entraînement, de la vitesse ou du régime. Sortir de ce cercle vicieux – du point de vue du concepteur soucieux de la protection contre le bruit – n'est pas une mince affaire, mais bien plutôt un travail de Sisyphe; néanmoins, une telle tâche constitue aussi un défi à relever.

Informations complémentaires

La Suva offre toute une série d'autres publications concernant la lutte contre le bruit sur le plan technique, lesquelles sont indiquées à la Fig. 1 (commandes par www.suva.ch/waswo).

En outre, il existe une série de check-lists relatives à des sujets d'actualité de l'acoustique (www.suva.ch/waswo, titre: Listes de contrôle). Vous trouverez également toutes les publications et les liens concernant la thématique de la protection contre le bruit sous www.suva.ch/acoustique.

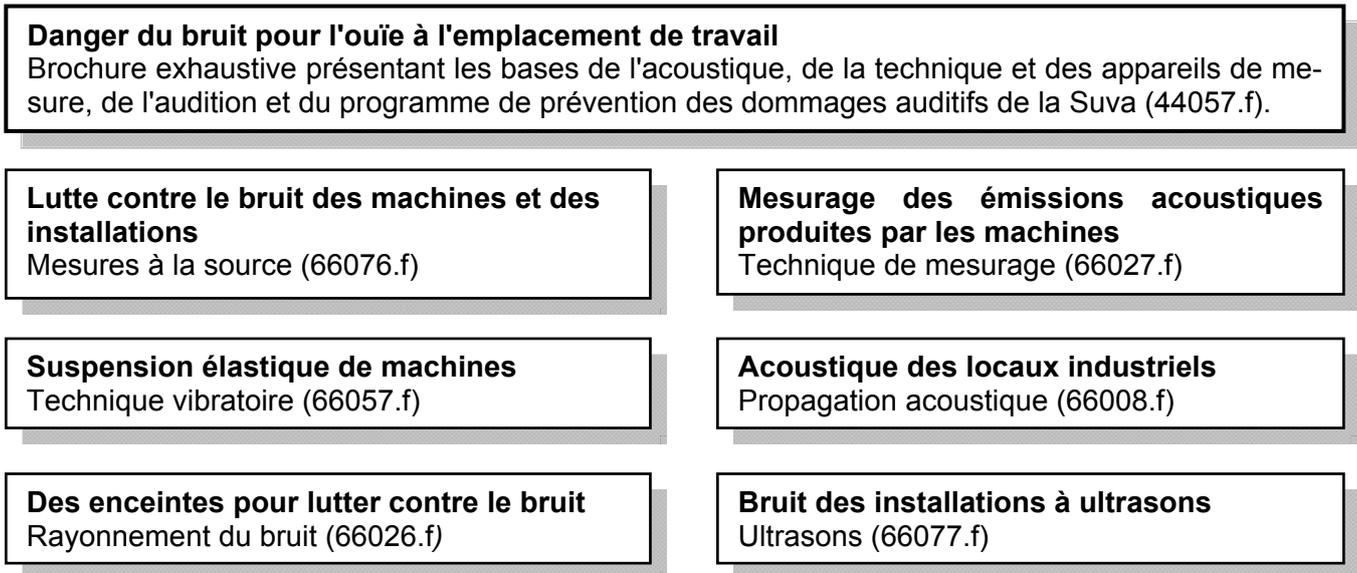


Fig. 1
Publications de la Suva sur le thème du bruit

La norme SN EN ISO 11688-1 (1998) constitue un document de référence utile, réunissant tout une série de directives et de recommandations sur le thème "Construire à bruit réduit". Cette norme présente dans le détail la méthodologie à appliquer dans la pratique. La Partie 2 de la norme (2001) expose les bases physiques de l'insonorisation à l'aide de mesures constructives.

Autres remarques concernant la présente publication

Si cette publication se fonde, en partie, sur des informations provenant des deux normes citées, elle ne doit pas être assimilée à un résumé de ces normes, étant donné que les multiples exemples y figurant sont autant de références à des cas concrets. Les concepteurs, les ingénieurs de développement et les ingénieurs mécaniciens y trouveront les indications nécessaires à l'élaboration de mesures d'insonorisation les meilleures à chaque phase du développement et à concevoir ainsi un produit final optimisé du point de vue acoustique.

On notera, à titre informatif, que tant le terme de "protection contre le bruit" (usité surtout en Suisse), que celui d'"insonorisation" (plus répandu en France) est utilisé. La signification de ces deux termes est équivalente.

En acoustique des machines le domaine du "Sound Engineering" et plus particulièrement le sous-domaine "Sound Design" constituent un défi particulier. Le domaine "Sound Design" concerne les mesures visant à améliorer l'aspect subjectif du bruit, en particulier dans les divers véhicules servant au transport de personnes (p. ex. ascenseurs, véhicules routiers, wagons de chemin de fer, avions). Cette thématique n'est pas traitée dans les chapitres suivants.

Un coup d'œil rétrospectif

Les machines et les installations modernes se différencient des anciens modèles tant par le bruit produit, que par leur morphologie. Les figures 2 à 5 montrent deux exemples frappants provenant de l'industrie des matières plastiques.



Fig. 2
Presse d'injection ancienne

Le groupe hydraulique, très bruyant, ainsi que toutes les soupapes et conduites nécessaires à la commande de la machine, sont placées à l'extérieur de la machine. Un opérateur doit retirer les pièces finies de la machine bruyante et les entasser dans des boîtes en carton.



Fig. 3
Presse d'injection moderne

Le groupe hydraulique et la majorité des éléments de commande se trouvent dans la partie inférieure de la machine, complètement capotée. Aujourd'hui ces machines fonctionnent souvent de manière entièrement automatisée: les pièces finies sont acheminées par un ruban transporteur dans un conteneur ou sont entassées par un robot.



Fig. 4
Presse d'emboutissage ancienne

Deux personnes travaillent à proximité de la sortie bruyante de la machine, afin de d'entasser et d'emballer manuellement les pièces usinées. La zone bruyante d'emboutissage des tôles et le broyeur à déchets sont situés à proximité immédiate des places de travail.



Fig. 5
Presse d'emboutissage moderne

Cette installation est complètement capotée. Tant le groupe hydraulique, que la zone d'emboutissage se trouvent à l'intérieur du capotage. Les pièces usinées sont entassées automatiquement. L'emballage manuel a lieu dans une zone calme, à l'extérieur du capotage.

En guise de conclusion à cette introduction, quelques réminiscences historiques montrant sous quelle forme, des chercheurs, poètes et philosophes s'exprimaient à propos du bruit, il y a de cela des siècles :

Une ordonnance sur les constructions datant d'un siècle avant J.-C. interdisait que des chaudronniers s'établissent dans une rue d'une ville romaine où habitait un "professeur".

En 1684 paraît le premier ouvrage spécialisé d'Athanasius Kirchers (1601–1676) intitulé "Neue Hall-und Thon-Kunst" (Nouvel art de la réverbération et du son).

Le philosophe et lève-tôt Emmanuel Kant (1724–1804) trouva une solution radicale au désagrément causé par le cri du coq de son propriétaire, qui le gênait dans son travail matinal. Il établit le calme souhaité en achetant le coq et en le consommant avec ses amis lors d'une agape.

L'écrivain Richard Katz écrit vers 1908 dans son ouvrage "Les trois visages de Lucifer": "l'homme civilisé, assourdi par les trains passant sur sa tête, assomé par la meute des klaxons, passe sa vie dans un véritable roulement de tambours".

2 Terminologie

Le Tableau 1 présente succinctement quelques termes utilisés en acoustique, sans entrer dans des détails tels que relations physiques ou formules. Cette énumération n'est pas exhaustive et elle prend particulièrement en compte des grandeurs que l'on rencontre dans les chapitres suivants. Les grandeurs de base de l'acoustique ne sont pas présentées ici (elles sont décrites en détail dans la brochure Suva N° 44057.f). Pour faciliter la recherche d'un terme particulier, on a choisi l'ordre alphabétique, renonçant ainsi à une classification thématique.

Terme	Description
Admittance	L'admittance est l'inverse de l'impédance et s'applique essentiellement pour des raisons mathématiques à l'excitation mécanique.
Bruit	<p>Le terme "bruit" apparaît continuellement dans ce fascicule. Qu'est-ce donc que le bruit?</p> <p>On appelle bruit tout type de son provoquant une gêne chez l'homme ou causant même une atteinte à sa santé. Cette définition comprend l'ensemble des immissions sonores portant atteinte au bien-être corporel, psychique ou social de l'homme.</p> <p>Le concept de bruit n'est pas une notion physique, mais socio-psychologique. On peut illustrer ce fait, par exemple, dans le cas de l'appréciation d'une musique à niveau élevé, qui est perçue par d'aucuns comme un plaisir et une détente, et qui est ressentie comme une gêne et une nuisance par d'autres.</p>
Bruit à large bande	Un bruit à large bande est caractérisé par un spectre fréquentiel s'étendant de façon continue sur une grande plage de fréquences. Ce type de bruit est produit soit par des chocs isolés, p. ex. des sauts de pression ou des chocs mécaniques, soit par des turbulences dans un écoulement d'air ou de liquide.
Bruit périodique	Un bruit se répétant périodiquement. Les engrenages ou les machines à piston en sont des exemples typiques.
Bruit tonal	Bruit caractérisé par un ou plusieurs tons nettement identifiables. On utilise également dans un tel contexte l'expression "bruits à fréquences discrètes".
Cavitation	Dans les liquides, des vitesses d'écoulement (localement) importantes produisent une dépression dynamique qui se propage, en particulier aux interfaces. Les bulles ainsi créées sont toutefois instables et elles finissent par implorer. Lors de l'éclatement des bulles, dépendant de la pression critique et de la température, des pressions de plusieurs dizaines de kbar sont produites, engendrant des bruits de cavitation.
Choc	Des chocs sont produits avec les techniques de martelage (p. ex. estampage, rivure à martelage, dressage au marteau, alimentation par gravité). Des chocs inhérents à la conception des machines se produisent p. ex. à cause de jeu ou de butées de positionnement. Des chocs peuvent se produire dans des milieux solides, liquides ou gazeux. En milieu solide, les chocs sont produits par de processus mécaniques. En milieu liquide ou gazeux, ce sont des variations rapides de pression qui occasionnent des chocs.
Comportement à la résonance	Comportement de la transmission vibratoire dans la zone des fréquences propres discrètes. Le terme "discret" s'utilise en physique pour un intervalle bien délimité ou séparé ; en technique vibratoire, il se définit au moyen de la transformée de Fourier discrète (TFD).
Comportement quasi statique	Propriétés de transmission d'une machine aux fréquences inférieures à la fréquence propre la plus basse.

Terme	Description
Composants générateurs de bruit	On appelle "composants générateurs de bruit" les éléments de machines qui produisent du bruit. Souvent, il s'agit d'agrégats dans lesquels l'énergie est convertie. Un travail mécanique est alors produit à partir de sources d'énergie, telles qu'énergie électrique, mécanique ou magnétique, ou bien à partir de la pression hydraulique. Il peut exister d'autres "générateurs de bruit", p. ex. des zones d'écoulement non-stationnaire ou des surfaces de contact entre des pièces mobiles.
Composants transmetteurs de bruit	Ces composants transmettent des bruits ou des sons provenant des composants générateurs de bruit. Ils ne comprennent en eux-mêmes pas de sources de bruit, mais peuvent cependant agir comme des émetteurs importants de bruit. Des éléments structurels de machines ou des parties de boîtier (p. ex. des tôles de capotage) constituent souvent d'importants composants générateurs de bruit.
Densité modale	Nombre de fréquences propres dans une plage de fréquences déterminée.
Écoulement	Les écoulements sont sources de forces non stationnaires, p. ex. dans les machines hydrauliques et dans les tuyauteries fermées (compresseurs, ventilateurs, turbines, robinetterie, conduites tubulaires).
Excitation par voie solidienne	On distingue trois sortes d'excitation par voie solidienne : <ul style="list-style-type: none"> • vibrations provoquées par le support p. ex. roues en mouvement sur des rails rugueux • vibrations provoquées par une force p. ex. balourd d'un axe • vibrations de nature impulsive p. ex. granulats dans un coude de tube
Facteur de perte	Le facteur de perte décrit la capacité d'un matériau homogène et monocouche à conduire le bruit solidien. Plus petit est ce facteur, meilleure sera la conduction du son solidien. Exemples: facteur de perte de l'acier: 0,0001; du bois: 0,01; du plomb: 0,1.
Facteur de rayonnement	Le facteur de rayonnement décrit le rapport entre la puissance acoustique rayonnée et la puissance rayonnée par une surface dont les éléments vibreraient avec la même phase et la même vitesse.
Force de masse libre	Il faut distinguer les forces de masse indésirables (p. ex. les rotors de turbines, de moteurs électriques) des forces utiles (p. ex. excitation vibratoire dans les rubans transporteurs, les cribles, les compacteurs). La force de masse ne dépend pas de la propriété de la structure excitée. On peut prendre l'exemple d'une structure mobile légère excitée par une source relativement rigide et lourde.
Fréquence d'excitation	Fréquence à laquelle un système vibrant (p. ex. pendule masse-ressort) est entraîné à effectuer une oscillation forcée.
Fréquence propre ou fréquence de résonance	Fréquence avec laquelle un système au repos se met à osciller à lorsqu'il est mis en mouvement par une excitation unique et livré alors à lui-même.
Impédance mécanique	L'impédance mécanique est la résistance opposée par un système à des forces externes. Elle permet de calculer la puissance à fournir pour exciter un tel système.
Indice de rayonnement	L'indice de rayonnement s'obtient à partir du logarithme de l'efficacité de rayonnement; il est la grandeur la plus utilisée dans la pratique.

Terme	Description
Niveau de puissance acoustique	Le niveau de puissance acoustique est une mesure du son émis et rayonné par une machine dans son intégralité. La puissance acoustique (en Watt) peut alors être comparée à d'autres formes de puissance, par exemple à la puissance de propulsion d'un moteur, qui s'exprime aussi en Watt. Le niveau de puissance acoustique constitue une des grandeurs les plus importantes de la technique d'insonorisation. La brochure Suva " Mesurage des émissions acoustiques produites par les machines" (N° 66027.f) présente la question de la puissance acoustique dans le détail.
Niveau de vitesse particulaire	Le niveau de vitesse particulaire en dB se calcule à partir de la vitesse vibratoire en m/s (vitesse particulaire) de même manière que les autres niveaux, la grandeur de référence étant $5 \cdot 10^{-8}$ m/s.
Pulsation	Variation de la pression en fonction du temps.
Rendement acoustique	Le rendement acoustique constitue une grandeur importante pour la lutte contre le bruit, car il met en évidence la quantité d'énergie nécessaire pour produire un son et, donc, un bruit. Le rendement acoustique se définit comme le rapport entre la puissance acoustique (en Watt) et la puissance mécanique (en Watt). Quelques exemples pertinents dans le Tableau 2.
Résonance	Si la fréquence d'excitation est égale ou très proche de la fréquence propre du système, un phénomène de résonance se produit. L'amplitude oscillatoire s'accroît.
Son aérien, hydraulique et solide	Son se propageant respectivement dans l'air, dans un liquide ou dans une structure solide.
Spectre	Présentation graphique du résultat de la décomposition d'un signal acoustique en bandes de fréquence partielles, en majorité en bandes de tiers d'octave ou en bandes étroites.
Turbulence	Forme particulière d'écoulement dans lequel les particules des couches s'écoulant les unes à côté des autres se mélangent en permanence.
Vitesse d'excitation	La vitesse, avec laquelle une structure mobile est excitée, est dénommée vitesse d'excitation. Elle ne dépend pas de la propriété de la structure que l'on excite. On peut prendre l'exemple d'une structure mobile légère excitée par une source relativement lourde.
Vitesse particulaire	Vitesse alternée avec laquelle une particule d'un milieu acoustiquement conducteur effectue des mouvements d'aller et retour autour de sa position de repos sous l'action du son.

Tableau 1
Termes et descriptions

Source de bruit	Indice de rayonnement acoustique
Sirène	10^{-1}
Trompette	10^{-2}
Réacteur FA-18	10^{-2}
Chaîne stéréo avec gros haut-parleurs	5×10^{-3}
Avion à hélices	10^{-3}
Moteur Diesel	10^{-4}
Turbine à gaz	10^{-5}
Métier à tisser	10^{-7}
Centre d'usinage mécanique	10^{-8}

Tableau 2
Valeurs d'indice de rayonnement acoustique (exemples sélectionnés)

Isolation et amortissement

Ces deux notions, utilisées en isolation au son aérien et en technique vibratoire, font fréquemment l'objet de confusions, même dans les milieux spécialisés. Afin d'éviter des malentendus dans le contexte des développements qui suivent, il y a lieu de fournir quelques explications :

Isolation

En acoustique, on parle d'isolation lorsque la transmission du son est atténuée ou arrêtée. Les tôles épaisses ou les éléments multicouches présentent une bonne isolation au son aérien, car ils réduisent la transmission du son (Fig. 6). Une bonne isolation vibratoire freine la transmission des vibrations d'une machine à la structure du bâtiment, p. ex. la suspension d'une voiture à l'effet d'un isolateur de vibrations (Fig. 8).

Amortissement

Dans le cas de l'amortissement acoustique, on a affaire à des mesures réalisant une absorption du son ou des vibrations. C'est pourquoi on utilise le terme d'amortisseur de bruit (Fig. 7). De même, les mesures appliquées en acoustique des locaux et qui font appel à des panneaux phonoabsorbants sont appelées mesures d'amortissement du son. Les amortisseurs de vibrations ont pour fonction de réduire le plus rapidement possible l'énergie vibratoire, comme, par exemple, dans le cas d'un amortisseur de voiture (Fig. 8). Du point de vue de la physique, l'amortissement consiste à convertir une énergie en chaleur. Toutefois, en acoustique, les énergies concernées sont très faibles, de sorte qu'un échauffement ne se produit qu'exceptionnellement (p. ex. dans des éléments en caoutchouc d'appuis élastiques).

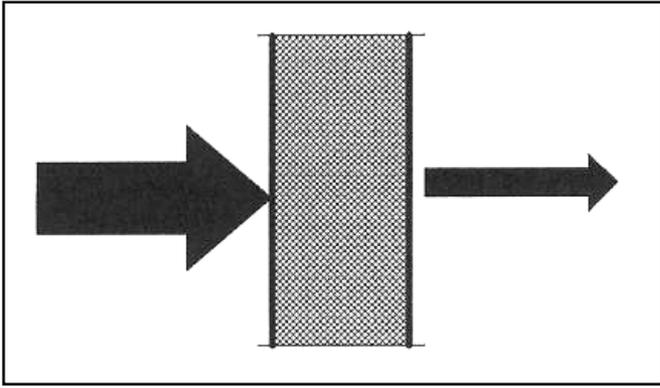


Fig. 6
Bonne isolation au son aérien par une paroi lourde

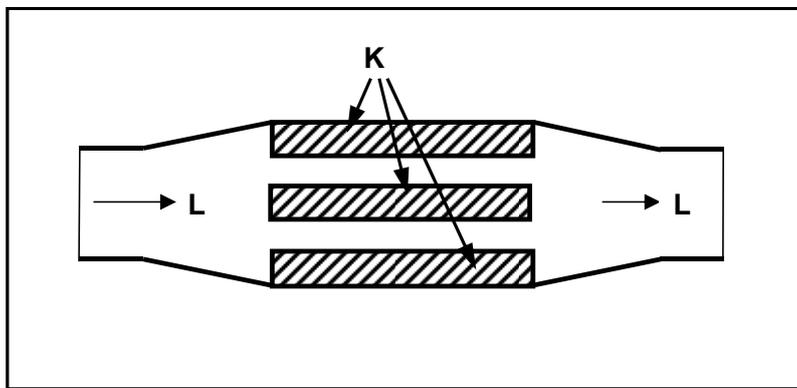


Fig. 7
Amortisseur de bruit pour atténuer la conduction du son aérien
(Coupe longitudinale à travers un amortisseur à coulisses)
K: coulisses absorbantes L: écoulement d'air

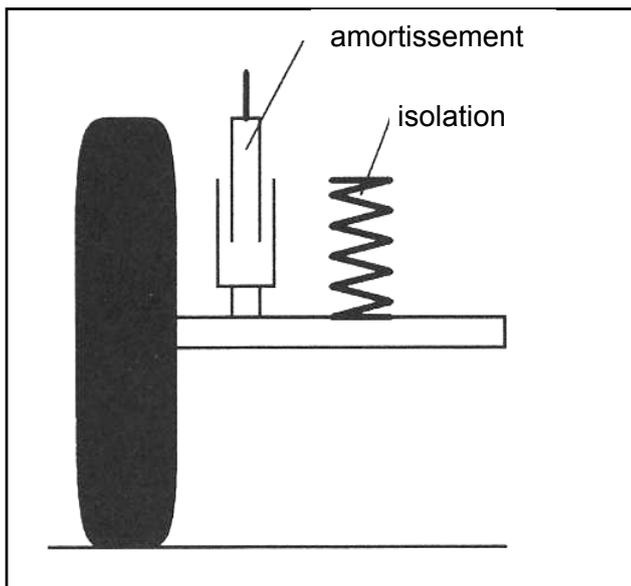


Fig. 8
Représentation schématique de l'isolation et de l'amortissement dans le cas d'une voiture
Remarque: Certains systèmes de suspension réunissent les deux fonctions dans un seul élément

Cas particulier: Amortissement et isolation du son aérien

Lorsqu'un son aérien atteint une paroi, on utilise simultanément les deux effets isolation et amortissement (absorption). Selon le résultat recherché, on adaptera les deux fonctions entre elles (Fig. 9).

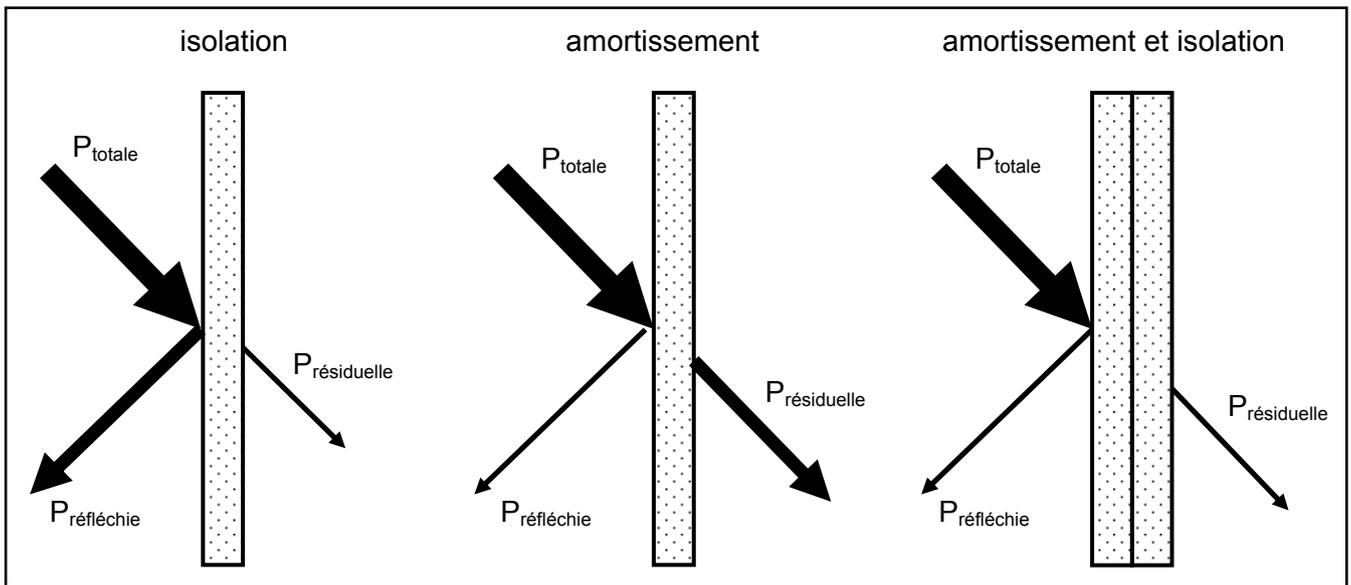


Fig. 9
Isolation et amortissement du son aérien

3 Méthodologie de construction et aspects acoustiques

3.1 Aperçu des tâches et de la méthodologie de la construction

La méthodologie de la construction est un concept opérationnel qui fait appel à des informations relevant de nombreuses disciplines, comme p. ex. l'acoustique des machines. Sur cette base, il est possible de réaliser les objectifs de construction et de prendre en compte des options déterminantes durant les phases de la conception et du développement.

Le déroulement des opérations du développement méthodique d'un produit comprend les phases présentées à la Fig. 10. Le concepteur pourra, au cours de la première phase, exercer une influence déterminante sur le comportement optimal d'un produit en matière de bruit et de vibrations, les possibilités s'amenuisant de plus en plus au cours des phases suivantes.

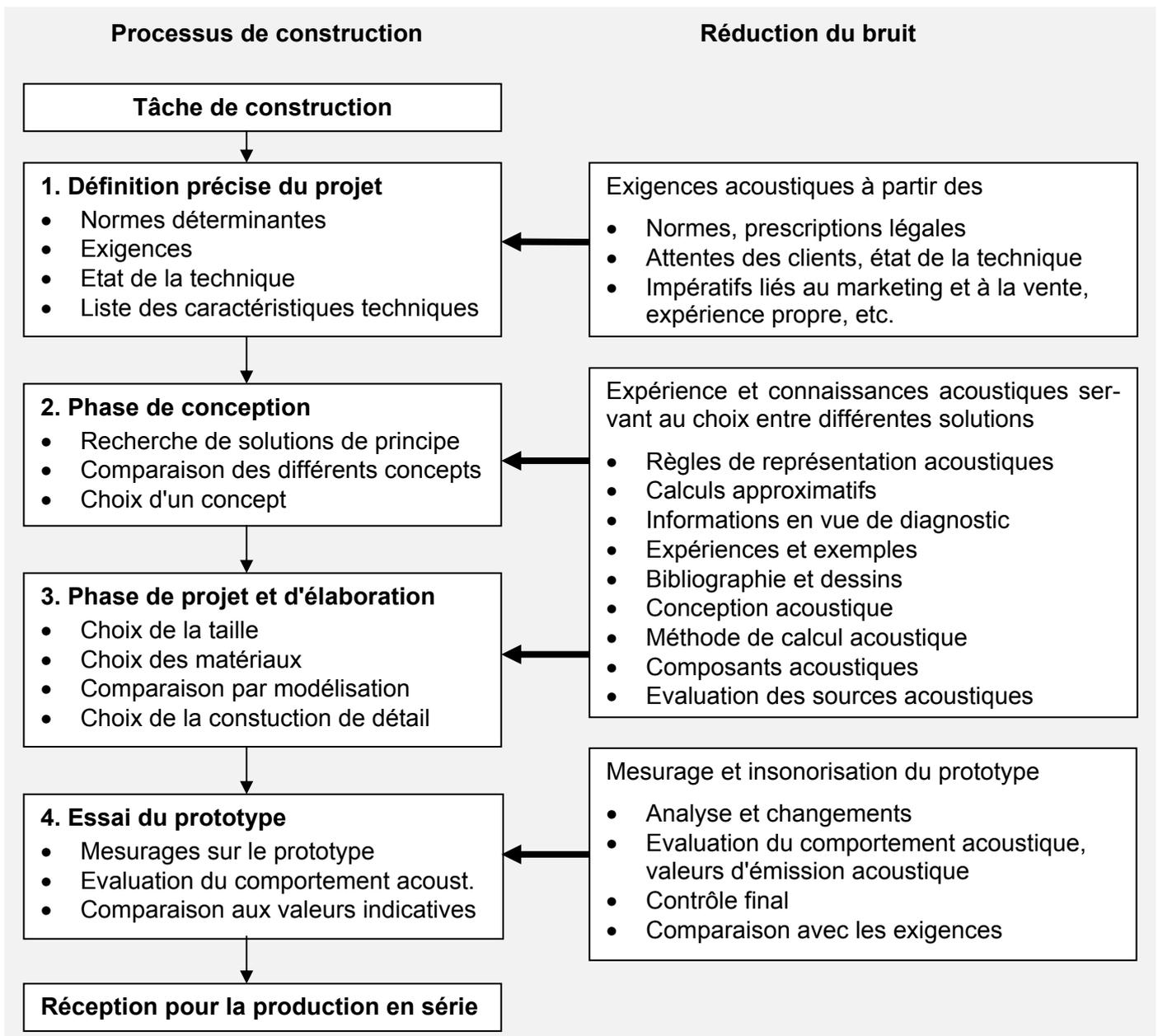


Fig. 10
Corrélation entre les connaissances de l'acoustique des machines et la méthodologie de la construction.

La production, la propagation et le rayonnement du son dépendent autant de la gestion des interactions fonctionnelles, que de la conception de détail des éléments structurels. Du point de vue de l'acoustique des machines, les différentes phases doivent être évaluées comme suit :

1. Définition précise du projet

On dresse une liste des exigences réglant le déroulement de la globalité du processus de conception. Cette liste définit les exigences acoustiques dictées par les lois, l'état de la technique, la situation de concurrence, les attentes du client ou l'appréciation du bruit de la machine en tant qu'argument commercial. C'est à ce stade que la marge de manœuvre pour l'implémentation de mesures constructives d'insonorisation est la plus grande.

2. Phase de conception

Au cours de cette phase, l'effort porte surtout sur la performance des installations ou des machines (fonction), indépendamment de la production de bruit. Étant donné que l'information disponible quant à la production de bruit du produit final demeure lacunaire, on estime généralement les performances acoustiques par comparaison avec des produits existants analogues.

La phase de conception est caractérisée surtout par la formulation d'idées concernant la machine ou l'installation, soit par la définition, dans les grandes lignes, des procédés et des technologies.

3. Phase de projet et d'élaboration

À ce stade, interviennent, entre autres, le choix des matériaux, le dimensionnement, la configuration et le choix des pièces en provenance de sous-traitants. La quantité relativement importante d'information concernant la production de bruit des divers composants permet une estimation et une prévision du bruit émis par calcul de simulation. Il peut alors être nécessaire de développer des solutions alternatives remplissant les mêmes fonctions, mais produisant moins de bruit.

À l'issue de cette phase, les possibilités d'intervention sur le bruit au niveau de la construction et de la conception des divers composants s'amenuisent.

4. Mesurages sur le prototype, réception de la machine

Les mesurages sur les prototypes permettent une évaluation quantitative des sources et voies de transmission acoustique dominantes. Des mesures spécifiques peuvent alors être mises en œuvre et des modifications constructives peuvent être réalisées. Un nouveau mesurage permettra de confirmer le respect des exigences applicables.

Cette phase de développement d'un produit, la plus captivante pour tous les intervenants, offre un potentiel non négligeable d'interventions permettant de diminuer la production de bruit.

3.2 Modélisation du flux acoustique

Avant d'entreprendre l'insonorisation d'une machine, il est nécessaire de déterminer quels éléments de la machine contribuent majoritairement à la production de nuisances sonores.

La modélisation du flux acoustique constitue un moyen simple d'identification de ces éléments. L'élément fondamental est constitué par la chaîne de production du bruit, composée de la génération, de la transmission et du rayonnement du bruit. Cette représentation sous la forme d'une chaîne de production du bruit permet d'affecter les mécanismes acoustiques aux éléments structurels de la machine (voir Fig. 11) et elle fournit des possibilités d'influencer de manière ciblée le bruit de la machine par des mesures constructives sur ses composants. Ces considérations simplifiées apportent les premières informations quantitatives concernant le comportement acoustique.

La méthodologie suivante, selon Fig. 11, a fait ses preuves s'agissant d'analyser le comportement acoustique :

1. Identification des principales sources de bruit de la machine.
2. Les sources de bruit majeures doivent être étudiées du point de vue des mécanismes possibles de génération de bruit.
3. Analyse et description de la propagation sonore à l'intérieur de la machine et jusqu'à l'endroit où a lieu le rayonnement.
4. Recherche des émetteurs potentiels de bruit de la machine.
5. Détermination d'une combinaison optimale de mesures techniques d'insonorisation.

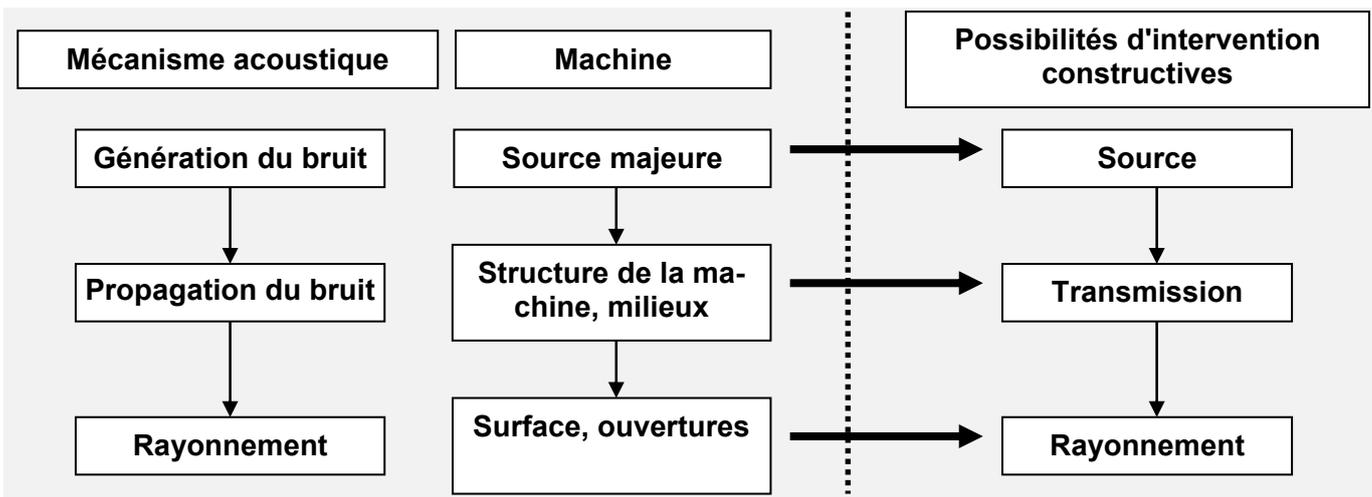


Fig. 11 Affectation des mécanismes acoustiques aux éléments de la machine selon la chaîne de production du bruit

La Fig. 12 montre la multiplicité des connexions entre les divers mécanismes acoustiques. En insonorisation, la première priorité est l'identification de la source.

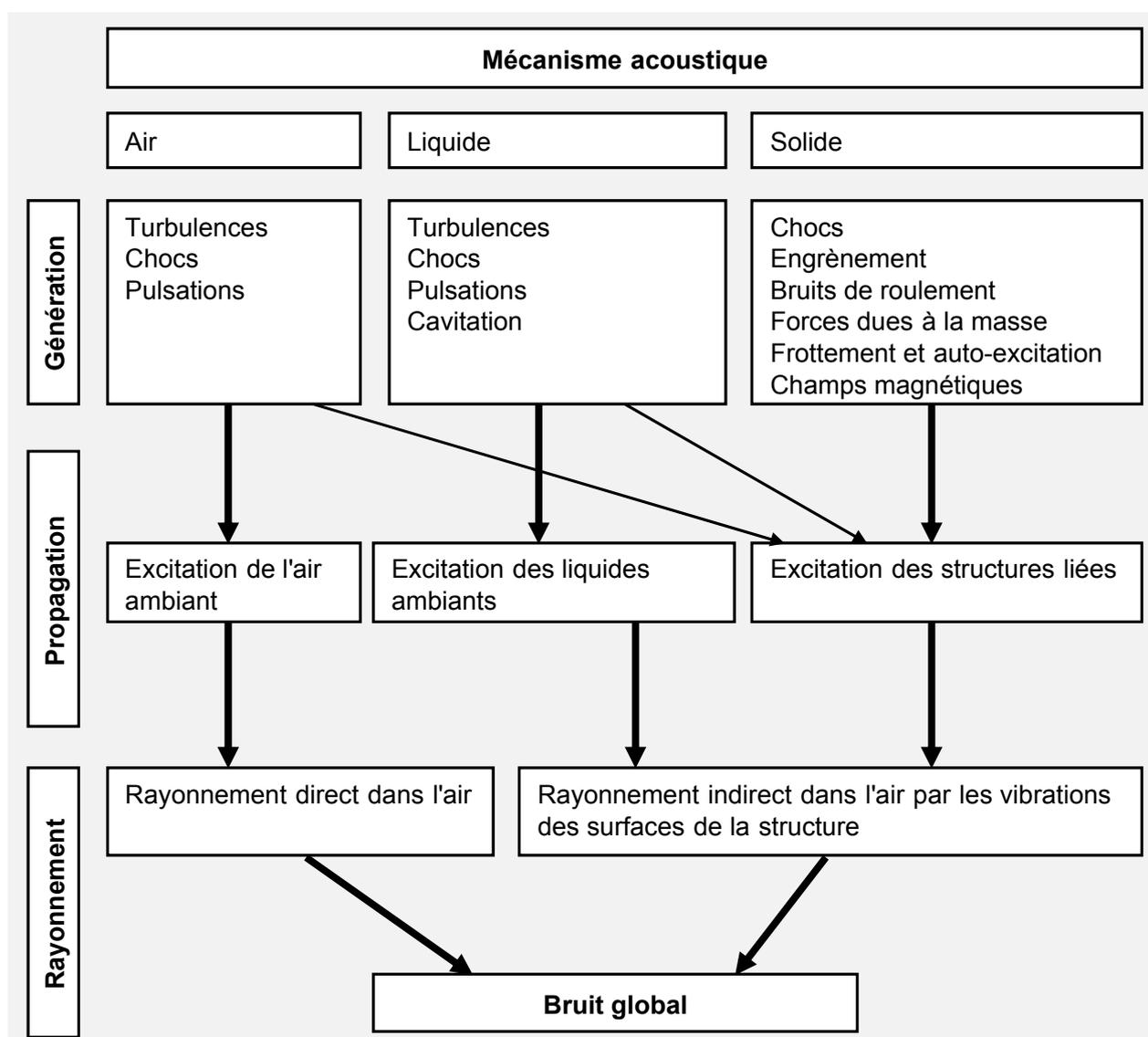


Fig. 12

Modèle de base de la génération de bruit par les machines

Selon le type de source sonore, les bruits se transmettent par l'air ambiant ou par les structures liées. En fin de compte, le son est rayonné dans l'air ou une structure est excitée. La figure montre que chaque source sonore présente des caractéristiques propres et des voies de transmissions spécifiques à travers la structure, jusqu'à la surface rayonnante. L'insonorisation d'une machine comprenant plusieurs types de sources sonores différentes requiert une analyse de chaque source, de chaque voie de transmission et de chaque surface rayonnante pour mettre en évidence l'importance de chacune d'entre elles.

3.3 Mécanisme de génération du bruit

Afin d'identifier et d'évaluer les sources sonores majeures au moyen du modèle du flux acoustique, il est impératif de connaître les relations physiques de la génération du bruit et leur influence sur le niveau de bruit résultant.

En principe :

1. Du bruit se produit partout où, respectivement, la transmission ou la conversion de l'énergie varie dans le temps (une pression constante ne produit pas de bruit, contrairement à un coup de marteau).
2. Les modes de fonctionnement des machines ont une influence sur le niveau sonore et la composition spectrale du bruit produit (changement du diagramme de force, accélérations, décélérations).
3. Pour une même action de la machine, le bruit produit croît lorsque l'énergie convertie est plus grande.

3.4 Mécanismes de transmission du son

3.4.1 Aperçu

Tous les mécanismes de production du bruit reposent sur le principe physique selon lequel un milieu (solide, liquide, gaz, comme l'air) est excité dynamiquement et que cette excitation se propage à l'intérieur du milieu concerné. Ces phénomènes obéissent aux lois de la physique des vibrations et des ondes, selon lesquelles des résultats différents sont produits pour les divers milieux, selon les effets qui s'appliquent en l'espèce. Ces relations ne seront pas traitées ici plus en détail.

3.4.2 Transmission du son solidien et du son dans les liquides

La transmission du son dans les solides et dans les liquides est fonction de la masse, de la rigidité et des propriétés d'amortissement. Généralement, d'importants changements de masse ou de rigidité dans une structure (p. ex. discontinuités de la rigidité, changements de section) péjorent la transmission du son.

3.4.3 Transmission du son aérien

À peu d'exceptions près, le son aérien est mesuré par un microphone ou perçu par l'oreille. Les machines rayonnent du son aérien par leurs surfaces vibrantes ou produisent directement du son aérien par leur fonctionnement (p. ex. les ventilateurs). On notera, en particulier, que le son aérien produit à l'intérieur d'une machine peut cheminer dans le milieu environnant même par de petites ouvertures.

3.5 Mécanismes du rayonnement du son

On entend par rayonnement du son la transmission du son d'une surface vibrante à l'air ambiant. Plus la surface est grande, plus important pourra être son rayonnement. Cela est vrai tant pour les surfaces de l'enveloppe, que pour les surfaces rayonnantes à l'intérieur de la machine. Un élément particulièrement critique est constitué par les ouvertures dans le corps de la machine, car le son est émis à l'extérieur par leur intermédiaire.

4 Modélisation du flux acoustique

4.1 Principe

La modélisation du flux acoustique a pour fonction de réaliser un lien entre le travail du concepteur et l'acoustique des machines; elle représente ainsi, pour le concepteur, un outil majeur pour l'analyse, la recherche de solutions et l'évaluation. L'objet en cours de construction est simulé sous forme abstraite au moyen d'un modèle, rendant ainsi possible l'accès à des informations qualitatives et quantitatives.

Le schéma de flux acoustique doit correspondre à la structure de l'objet imaginée par le concepteur et prendre en compte, pour l'essentiel, les aspects fonctionnels et géométriques. Le schéma du flux acoustique rend visible au concepteur le flux acoustique. Une représentation qui, acoustiquement parlant, suit la chaîne de génération du bruit est un outil approprié à l'élaboration de mesures efficaces d'insonorisation.

Cette coordination fait apparaître l'emplacement des sources majeures de bruit et les mesures nécessaires à minimiser la propagation du son.

Les bases et la démarche sont illustrées à partir d'un exemple. Le cas-type d'une transmission (Fig. 13) est tout d'abord analysé (sur la base de la liste des pièces) du point de vue des éléments acoustiquement significatifs. Cela peut se faire facilement à partir d'un dessin en coupe. Dans la coupe représentée, on a marqué les sources principales de bruit et indiqué les flux de bruit prévisibles (modèle du flux de bruit). Pour des raisons de lisibilité, seuls les éléments et chemins essentiels ont été indiqués.

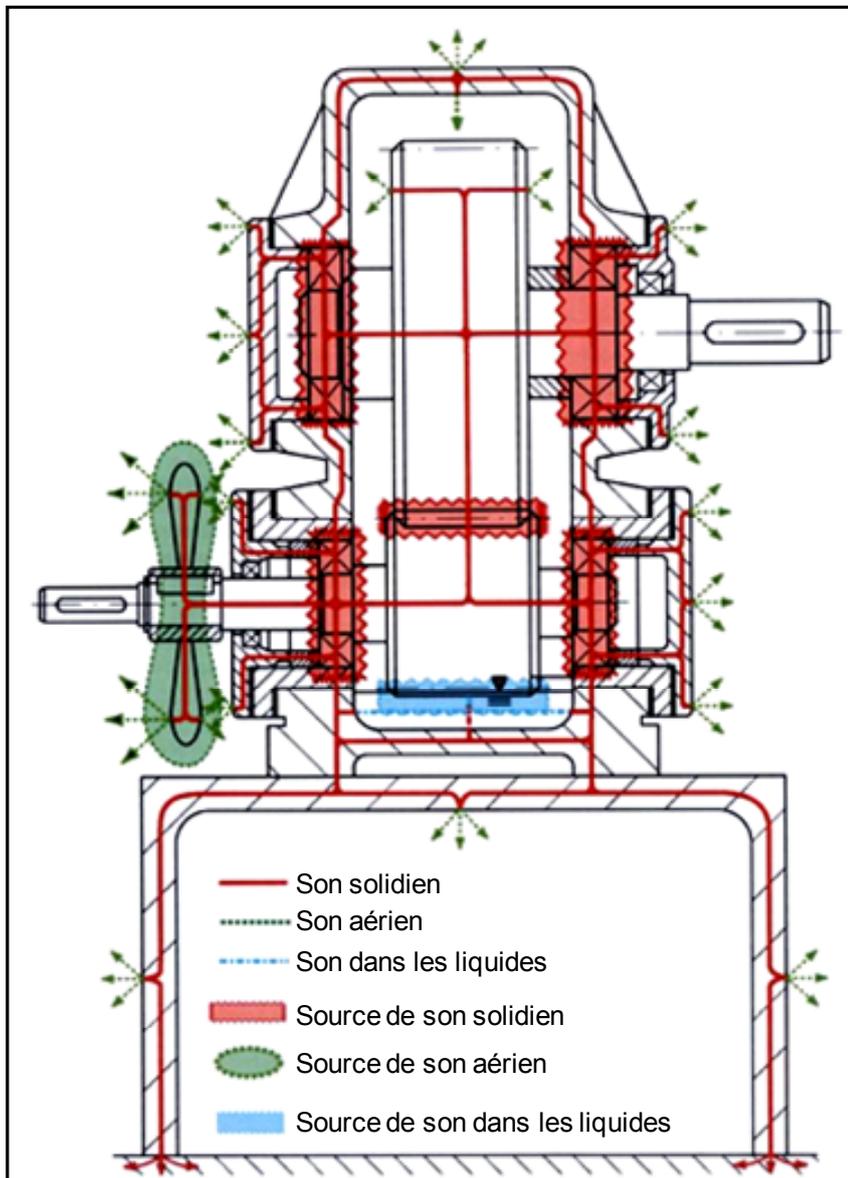


Fig. 13
Transmission avec indication des
voies de transmission du bruit
(modèle du flux acoustique)

Afin d'effectuer l'analyse du flux acoustique, on considérera d'abord les sources sonores. Il s'agit d'affecter les sources selon Fig. 13 à un milieu (air, solide ou liquide) et à un des mécanismes de production du bruit évoqués. Ensuite, les sources seront évaluées à partir de grandeurs mesurées connues, de valeurs empiriques ou d'une appréciation subjective. Le classement est alors réalisé sur la base d'une simple analyse ABC, répartissant les sources sonores selon une des catégories suivantes :

- A Fort
- B Moins fort
- C Négligeable

Il est indiqué d'ajouter un commentaire aux affectations. On peut ainsi retrouver la raison de tel ou tel choix. Le Tableau 3 ci-dessous présente le résultat d'une analyse de ce type.

Sources	Milieu	Mécanisme de production du bruit	Évaluation	Commentaire
Engrenage	S	Engrenure	A	Conversion d'énergie très importante, transmission discontinue
Roulement	S	Bruit de roulement	B	Selon construction
Pignon dans le carter	L	Chocs, turbulences	C	Les dents du pignon en rotation frappent dans l'huile
Ventilateur	A	Turbulences	B	Selon construction

Tableau 3
Affectation et évaluation des sources sonores

S: son solidien; L: son dans les liquides; A: son aérien; A: fort; B: moins fort; C: négligeable

Après l'affectation et l'évaluation des sources sonores, il y a lieu d'identifier et d'évaluer les voies de transmission du bruit. À l'intérieur de la machine, il s'agit essentiellement de voies de transmission dans les solides et les liquides. Si la structure présente des ouvertures permettant au son de s'échapper, celles-ci doivent également être prises en considération.

L'identification se fait sur la base de la jonction entre deux éléments. Selon la façon dont les pièces sont liées, fortement (p. ex. vissées), moins fortement (p. ex. appui sur roulement), selon le genre de couplage matériel (discontinuités de la rigidité) et de la géométrie du couplage (discontinuités de section), on classe les jonctions de manière analogue à celle du Tableau 3:

- A Conduction acoustique élevée
- B Conduction acoustique moins élevée
- C Conduction acoustique négligeable

Le Tableau 4 présente une telle identification.

Voie de transmission	Évaluation	Voie de transmission	Évaluation
Roue dentée - arbre	A	Pignon - arbre	A
Arbre - roulement	A	Arbre - roulement	A
Arbre - ventilateur	A	Pignon - carter	B
Arbre - boîtier	A	Carter - boîtier	B
Roulement – chapeau de palier	A	Boîtier - socle	A
Boîtier – chapeau de palier	B	Socle - sol	B
Roue dentée - pignon	B	Sol - voisinage	C

Tableau 4
Identification et évaluation des voies de transmission du son

A: fort B: moins fort C: négligeable

Lors de l'analyse des voies de transmission du son, il faut considérer que le bruit peut se transmettre aux machines reliées, comme c'est le cas, dans cet exemple à des moteurs et des machines de travail en amont et en aval de la transmission, ou que le bruit de ces dernières puisse se propager vers la transmission.

À la suite de l'évaluation des voies de transmission, on procède à l'évaluation du rayonnement (voir Tableau 5). Ce sont alors la grandeur et la rigidité des surfaces rayonnantes qui sont prises en compte.

Élément	Évaluation	Remarque
Boîtier	C	Surfaces réduites et massives
Nervures du boîtier	B	Les nervures constituent une grande surface, relativement mince.
Couvercle du boîtier	B	Surface assez grande non nervurée, peut vibrer librement
Chapeau de palier	B	Surtout les chapeaux de palier sans passage d'arbre présentent une grande surface rayonnante et sont excités directement par les roulements (haut-parleur).
Ventilateur	B	Intégré au boîtier.
Socle	A	Grandes surfaces rayonnantes, de par leur forme en caisson.

Tableau 5
Identification et évaluation du rayonnement

A: important B: moins important C: négligeable

Lorsque les sources sonores, les voies de transmission et les surfaces rayonnantes ont été identifiées et évaluées, on peut en représenter la synthèse sous forme d'un schéma de flux acoustique. À cet effet, on dessine les différents éléments du système sous forme de diagramme de flux correspondant à leurs relations et on les relie entre eux (Fig. 14).

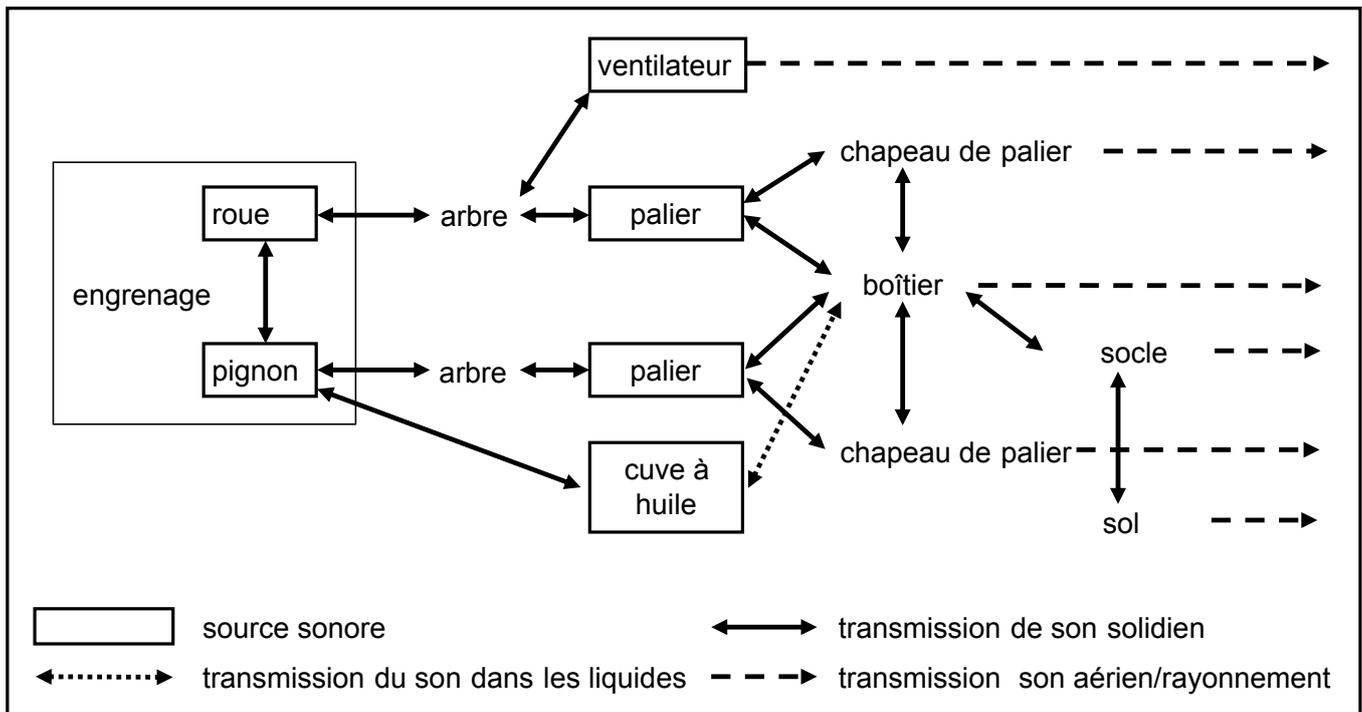


Fig. 14
Schéma de flux acoustique de la bête de vitesses selon Fig. 13

On désignera alors les différentes sources par un cadre plus ou moins large selon leur intensité respective. Les liaisons entre les divers éléments symbolisent les voies de transmission identifiées, l'épaisseur du trait pouvant mettre en évidence l'importance de la voie. La lisibilité du schéma de flux acoustique se trouve améliorée, lorsqu'on utilise des styles ou des couleurs différents pour les sons solidiens, aériens ou dans les liquides.

Il faut en outre noter que certains éléments peuvent assurer plusieurs fonctions, par exemple celle de source et, en même temps, contribuer au rayonnement du son (un ventilateur contribue faiblement au rayonnement du son solidien, mais il constitue une forte source de son aérien). On indiquera alors la part prédominante dans le schéma de flux acoustique.

Les épaisseurs de trait différentes des cadres et des flèches, correspondant aux importances différentes des sources sonores et des voies de transmission, facilitent au concepteur l'interprétation du schéma de flux acoustique. Dans la mesure du possible, l'insonorisation doit être d'abord entreprise sur la source la plus forte, dans l'hypothèse selon laquelle cette source est reliée à la structure voisine par des voies de transmission du son également importantes et qu'elle fournit une contribution majeure au bruit global rayonné. C'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une analyse ABC des sources, des voies de transmission et des surfaces rayonnantes du schéma de flux acoustique, afin de déterminer l'intensité de chaque source et d'évaluer le degré de liaison de celle-ci au reste de la structure. Par exemple, une source intense, transmettant faiblement à un élément rayonnant, ne doit pas être optimisée, étant donné que la surface rayonnante n'est que peu excitée.

Le schéma de flux acoustique de la Fig. 14 illustre la production et la transmission de bruit dans une boîte de vitesses, ainsi que son rayonnement acoustique. Il apparaît clairement que les sources sonores dominantes sont le ventilateur et l'engrenage. La transmission du son est due principalement aux arbres, aux paliers et au boîtier, tandis que le rayonnement se fait surtout par les chapeaux de palier, le boîtier et le socle. Le schéma de flux acoustique indique clairement quels éléments de construction ont une influence essentielle sur le bruit émis. On peut en déduire quelle source il y a lieu d'insonoriser en premier lieu ou bien à quel endroit quelque chose pourrait être entrepris pour réduire la transmission ou le rayonnement du son.

4.2 Analyse acoustique des points faibles

L'analyse acoustique des points faibles se fonde sur le rayonnement acoustique global d'un produit, elle analyse les contributions des divers groupes d'éléments et des composants et elle décrit les mécanismes de génération du bruit. Contrairement à la modélisation du flux acoustique, cette méthode s'applique quantitativement sans restriction à des machines, des installations et, également à des prototypes, à partir de mesurages acoustiques. S'agissant de produits dans la phase de conception, la méthode ne peut être utilisée que de manière approximative, en se basant sur des dessins de construction et de données d'exploitation.

Le principe fondamental de l'analyse acoustique des points faibles réside dans la détermination par mesurages ou par calculs du bruit émis par une machine ou par une installation. Dans le cas de mesurages acoustiques, on fera, selon les cas, appel à de simples mesurages de niveau sonore, à l'intensimétrie ou à des déterminations de puissance acoustique.

4.3 Règles de construction en acoustique des machines

Pour terminer ce chapitre, on indiquera les règles de construction en acoustique des machines, telles qu'elles sont présentées dans l'aperçu de la Fig. 15.

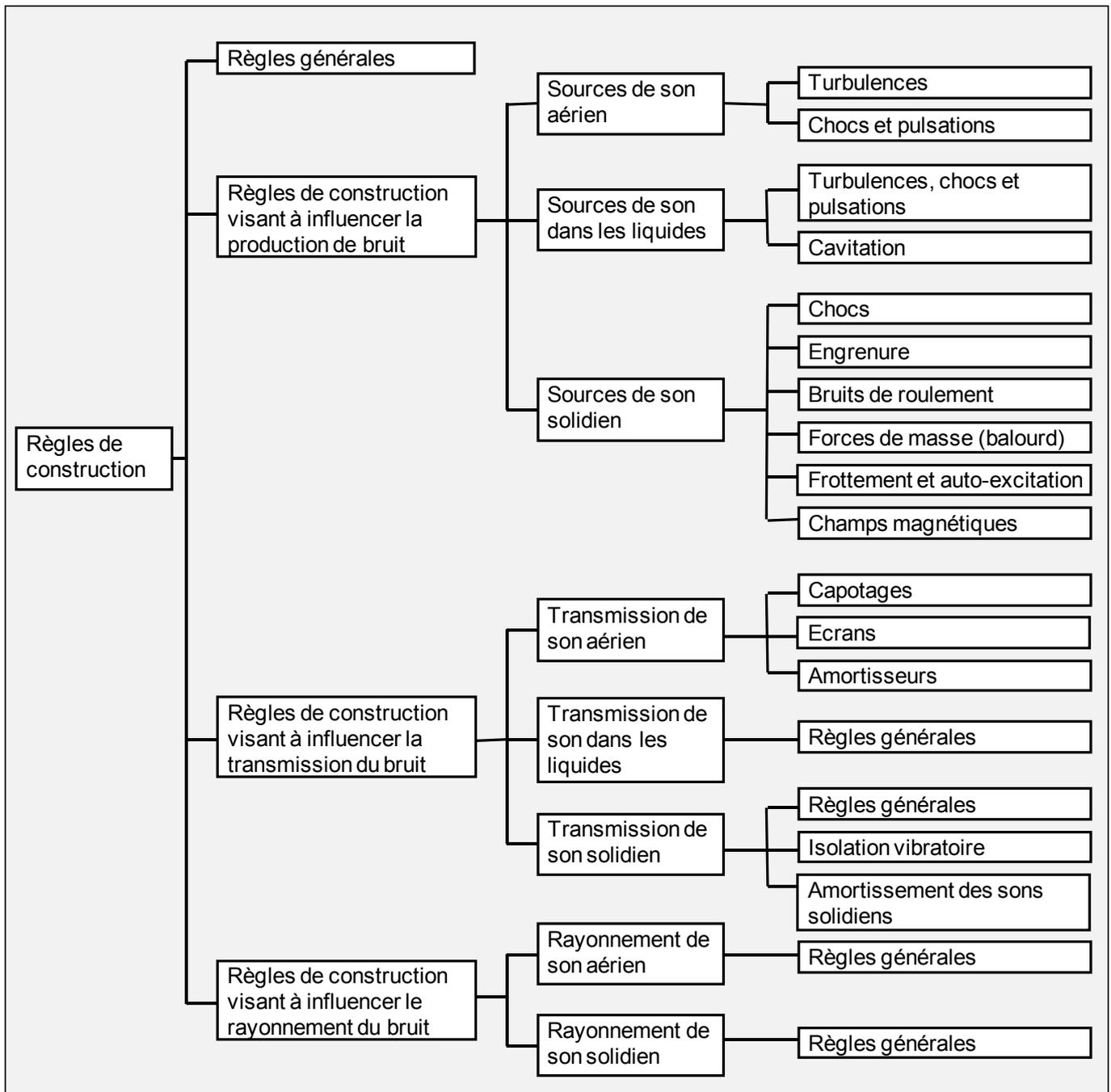


Fig. 15
Structure des règles de construction en acoustique des machines selon SN EN ISO 11688-1

5 Réduction de la génération de bruit

5.1 Principes de l'insonorisation

Sur la base du schéma de flux acoustique, on a identifié les sources sonores, les voies de transmission et les surfaces rayonnantes les plus importantes. Avant d'aborder les mesures d'insonorisation, il est indiqué de présenter quelques règles de base concernant la réduction du bruit.

L'insonorisation peut se décomposer en mesures primaires et mesures secondaires. Parmi les mesures primaires, on peut citer les actions visant à influencer la génération du bruit et la transmission / le rayonnement du bruit à l'intérieur de la limite du système considéré. Toutes les mesures ayant pour effet la réduction de la propagation du bruit sont à classer dans les mesures secondaires.

Le choix des mesures à réaliser dans un premier temps dépend, entre autres, des conditions marginales liées à la construction de la machine et de l'utilisation de celle-ci. La première priorité s'applique toujours aux mesures d'insonorisation sur les sources, car il est toujours plus efficace de juguler ou de réduire la production de bruit à la source. Malheureusement, cette démarche se révèle souvent impossible à cause de limitations, telles qu'un impératif lié au fonctionnement de la machine finale. Dans de tels cas, il faut réaliser une diminution de la transmission du son vers les surfaces de l'objet ou une réduction du son aérien rayonné.

Indépendamment du fait que l'insonorisation porte sur la source sonore ou sur la transmission ou le rayonnement du son, il faut toujours commencer par les composants dominants. En présence de plusieurs sources de même intensité, la contribution relative à l'insonorisation d'une des sources a un effet mineur sur la diminution globale du bruit. Dans de pareils cas, il est indiqué de mettre en œuvre une mesure secondaire, par exemple, un capotage.

5.2 Sources de son aérien

Tous les gaz pouvant s'écouler (p. ex. l'air) peuvent générer directement du bruit, par des turbulences, des chocs ou des pulsations.

5.2.1 Turbulence

Des turbulences peuvent générer du bruit de manières très différentes. Des turbulences peuvent être à la source de bruits à caractère tonal en circulant autour d'un contour fermé, p. ex. une cheminée. Un bruit tonal peut aussi se produire lorsqu'un courant passe au-dessus d'un corps creux, comme cela s'observe, par exemple, dans le cas de tuyaux ou des couteaux de machines à bois. Avec des flux canalisés, des bruits se produisent à l'endroit de brusques changements de direction, d'entretoises ou de soupapes.

Des flux à haute vitesse créent des tourbillons à la sortie de buses ou à l'extrémité des pales de ventilateurs, par le fait de forces de cisaillement dans la zone de transition entre l'air immobile à proximité de la buse et le courant excitateur. Un bruit à large bande est alors produit. Le niveau et le spectre du bruit dépendent de la vitesse du flux, de la viscosité du milieu et de la géométrie de la buse.

On peut diminuer l'émission sonore en réduisant la vitesse d'écoulement dans la zone de transition. Les possibilités techniques de mise en œuvre de cette stratégie consistent en une réduction des différentiels de pression, une augmentation des diamètres ou la création d'un flux dérivé de pression et de vitesse réduites (Bypass), p. ex. sur des buses ou des extrémités de tubes (Fig. 16).

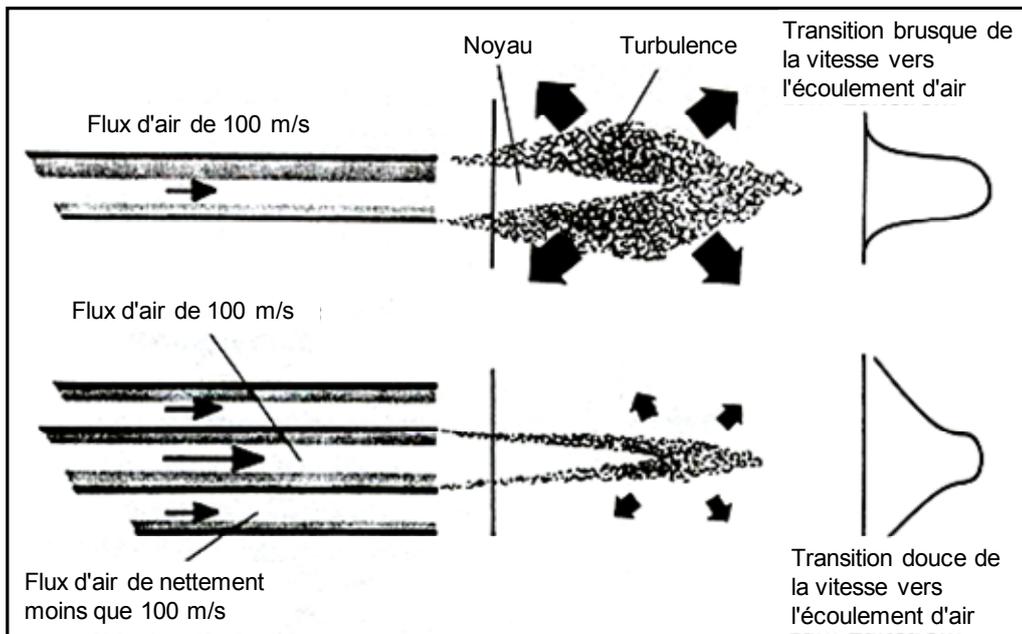


Fig. 16
Génération de bruit à une sortie d'air, en haut sans et en bas avec flux dérivé.
La réduction de niveau obtenue avec un flux dérivé est d'environ 20 dB.

On localise les sources de bruit en analysant le diagramme d'écoulement du point de vue des obstacles potentiels. Une réduction du bruit s'obtient en modifiant le diamètre des entretoises, en installant des dispositifs de guidage dans les cheminées, en optant pour une conception aérodynamiquement judicieuse ou en réduisant la vitesse d'écoulement.

S'agissant des turbulences, les ventilateurs comptent, à côté des pompes, parmi les sources sonores majeures. Les publications spécialisées présentent de nombreuses indications sur la manière de diminuer le bruit selon le type de construction.

On peut éviter la formation de turbulences en aval d'obstacles en réduisant au minimum leur nombre ou en optimisant leur forme aérodynamique (éviter les arrêtes vives) (Fig. 17).

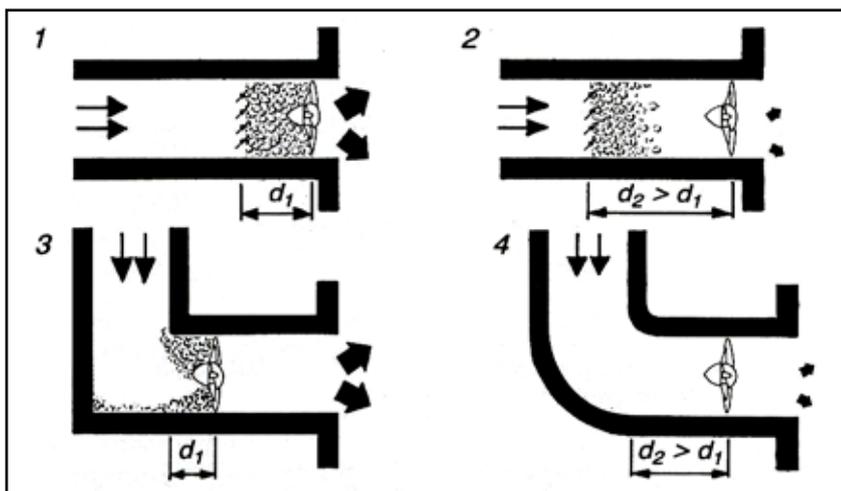


Fig. 17
Intégration d'un ventilateur dans un système de canaux

- 1,2 La distance entre les clapets et le ventilateur doit être suffisante pour que le flux puisse se stabiliser.
- 3 Il est déconseillé de placer un ventilateur à proximité des coudes: il en résulterait des turbulences et, donc, du bruit.
- 4 Disposition favorable du ventilateur: en aval du coude, à une distance suffisante de celui-ci.

Des modifications géométriques sur les buses ou les soupapes, faisant usage de systèmes en labyrinthe ou à fentes, produisent un décalage vers les plus hautes fréquences des bruits générés; ceci facilite l'application de mesures d'isolation ou d'absorption acoustique (Fig. 18).

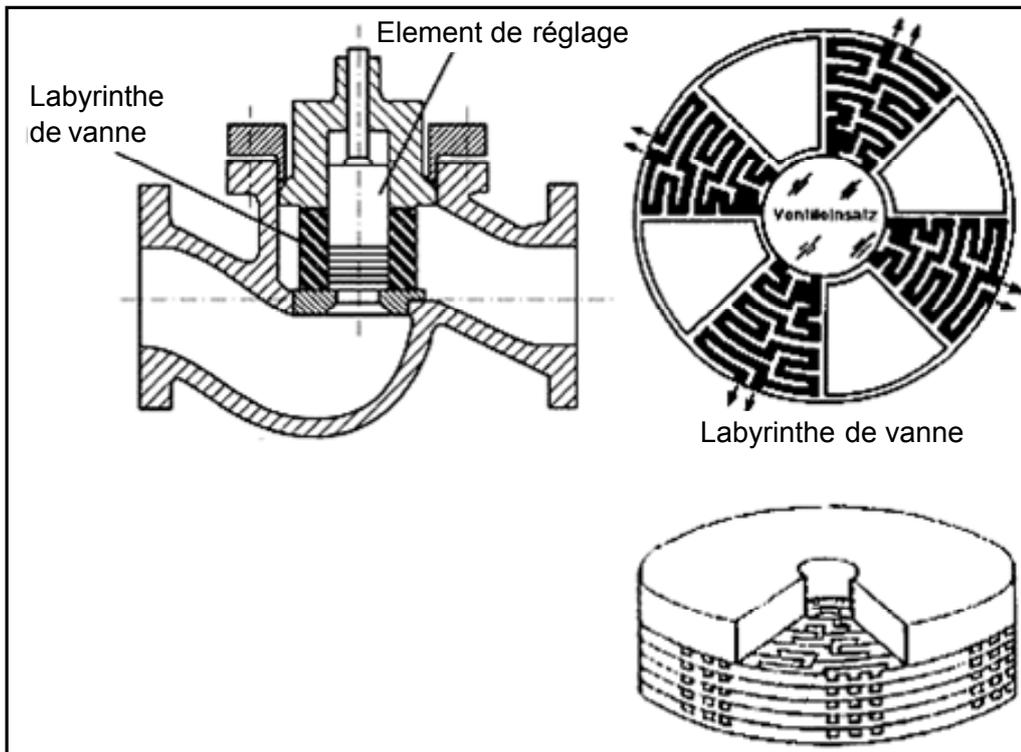


Fig. 18
Vanne de réglage avec labyrinthe de vanne

Tous les types de transmission à courroie constituent un groupe particulier de sources sonores. Selon la vitesse périphérique, la largeur et le diamètre des poulies, un bruit plus ou moins fort est généré. La Fig. 19 montre les possibilités d'intervention.

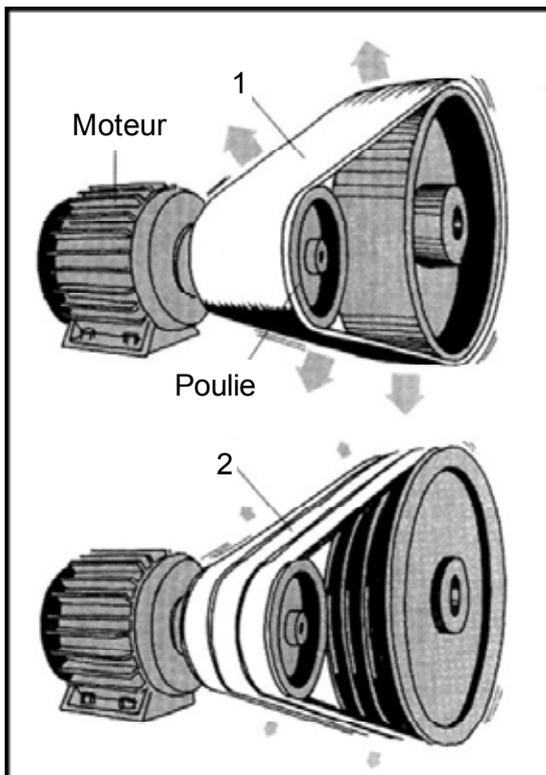


Fig. 19
La courroie d'entraînement large (1) est remplacée par plusieurs courroies séparées (2) appuyant sur des poulies séparées. Cette mesure permet de diminuer le rayonnement acoustique.

Règles de construction pour la réduction des turbulences dans les gaz :

- Réduction de la pression de marche
- Réduction des changements de pression
- Limitation de la vitesse d'écoulement au minimum admissible
Optimisation des sorties d'air, avec pour but de minimiser les changements de vitesse à l'ouverture du jet sortant (Fig. 16)
- Minimalisation de la vitesse périphérique des rotors
- Absence d'obstacles dans le flux
- Amélioration du guidage du flux (Fig. 20)

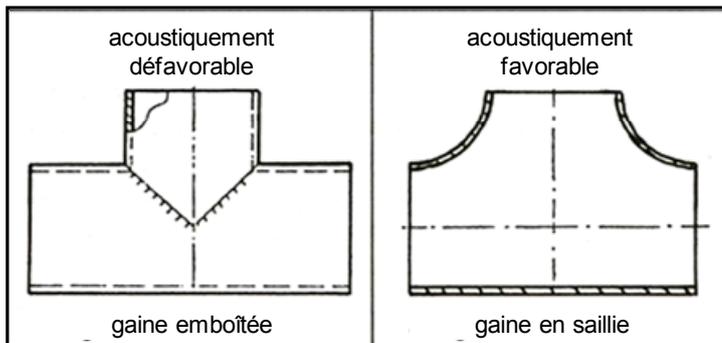


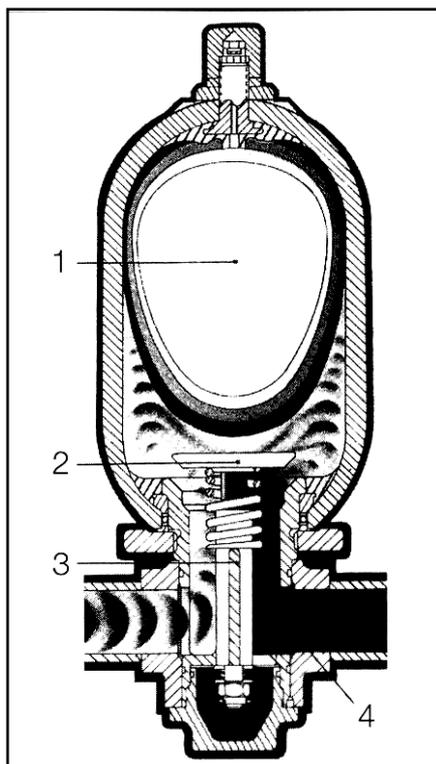
Fig. 20
Variantes pour la forme
des embranchements

D'autres informations concernant les turbulences figurent dans l'ouvrage „Strömungskustik in Theorie und Praxis“, expert-verlag.

5.2.2 Chocs et pulsations

Dans les machines à piston, des pulsations de volume et de pression se produisent à cause d'un flux volumique discontinu. Du fait que ces machines renferment des éléments tournants, la fréquence des pulsations est proportionnelle à la fréquence de rotation; d'où la production de bruit à caractère tonal. Une atténuation du bruit peut être obtenue soit par une diminution du régime, soit, dans le cas de machines à haute pression, par une diminution de la pression de marche.

Des chocs sont produits lorsqu'un milieu sous pression est subitement décomprimé dans un milieu présentant une pression plus basse. Ceci se produit lors de l'ouverture / de la fermeture des soupapes dans les moteurs à air comprimé ou les pompes.



Les bruits impulsifs peuvent être atténués en étirant la courbe pression-temps; cela peut se réaliser soit en réduisant la différence de pression, soit en augmentant le temps de montée. Des chocs quasi stationnaires se produisent dans les flux ultrasoniques, p. ex. dans les soupapes d'échappement. Ils peuvent être atténués en augmentant la section des soupapes, réduisant ainsi la vitesse d'écoulement. Une autre possibilité consiste à intégrer dans le circuit tubulaire un amortisseur de pulsation (Fig. 21).

Fig. 21
Amortisseur de pulsation "Pulse-tone" intégré dans la conduite

Le ballon rempli d'azote (1) se comprime ou se détend en fonction du choc hydraulique, Les pulsations sont lissées et amortissent tout le système côté pression. La chicane (3) installée dans le raccord (4) assure une déviation du fluide dans l'amortisseur. La protection du ballon se fait, comme c'est le cas pour tous les réservoirs du même type, au moyen d'une soupape à huile (2) ou d'une plaque métallique vulcanisée dans le ballon.

Une diminution du bruit des soupapes peut être obtenue en concevant celles-ci de telle manière que, au moment de l'ouverture, la section ne change que lentement. La compression d'un fluide confiné, p. ex. dans le cas de pompes à piston ou à engrenages, devrait être réduite par l'adjonction de canaux d'égalisation.

En particulier, parmi les agrégats hydrauliques, il existe des différences très importantes du point de vue acoustique (Fig. 22).

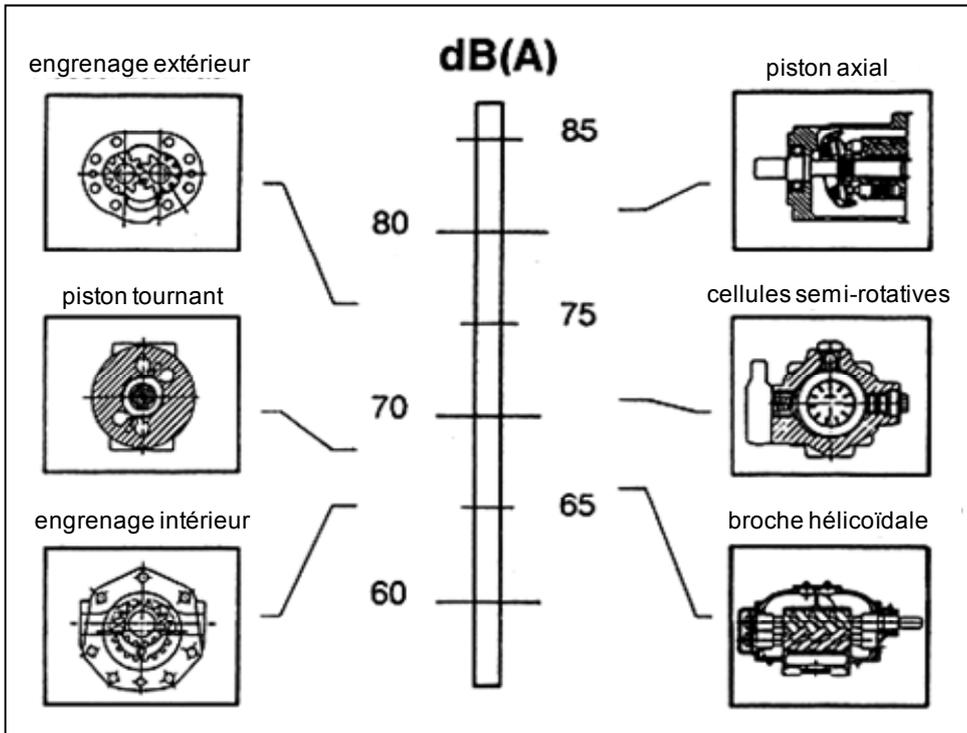


Fig. 22 Exemples de niveaux de puissance acoustique de pompes hydrauliques avec différents modes de déplacement

Des chocs isolés dans les soupapes sont synonymes de bruits à large bande (génération de fréquences multiples). Par contre, des chocs périodiques (p. ex. dans les pompes à haute pression ou les moteurs) il se produit des bruits périodiques de fréquences correspondant au régime et à ses harmoniques.

Des bruits stationnaires sont engendrés dans les soupapes d'échappement quand les vitesses sont supérieures à la vitesse normale du son dans l'air; des bruits intenses, à large bande, sont alors produits. Ils peuvent être évités en réduisant la vitesse d'écoulement.

Règles de construction pour la réduction des chocs et des pulsations dans les gaz :

- Réduction de la vitesse des variations de pression
- Absence d'obstacles à proximité d'un rotor

Pour ce sujet également, l'ouvrage „Strömungsakustik in Theorie und Praxis“, expert-verlag fournit des informations complémentaires.

5.3 Sources de bruit dans les liquides

5.3.1 Règles de construction

Comme dans l'air, des bruits peuvent être générés dans les liquides par des turbulences, des pulsations ou des chocs. C'est pourquoi les règles énoncées au paragraphe 5.2.1 s'appliquent aussi.

Règles de construction pour agir sur les sources de bruit dans les liquides :

- Réduction des variations de pression
- Limitation de la vitesse d'écoulement au minimum admissible
- Absence d'obstacles dans le flux
- Amélioration du guidage du flux
- Réduction de la vitesse des variations de pression

5.3.2 Cavitation

La cavitation se produit dans un liquide lorsque la pression statique devient inférieure à la pression de vapeur. On observe fréquemment des phénomènes de cavitation sur les soupapes ou les pompes. Dans les zones où la pression devient inférieure à la pression de vapeur, des bulles de cavitation apparaissent (Fig. 23). Ces bulles implosent lors de la recompression, occasionnant alors une forte augmentation de la pression locale. Étant donné que cette compression se produit souvent sur une surface à l'arrêt du flux, la cavitation peut non seulement générer du bruit, mais occasionner une très forte érosion des matériaux.

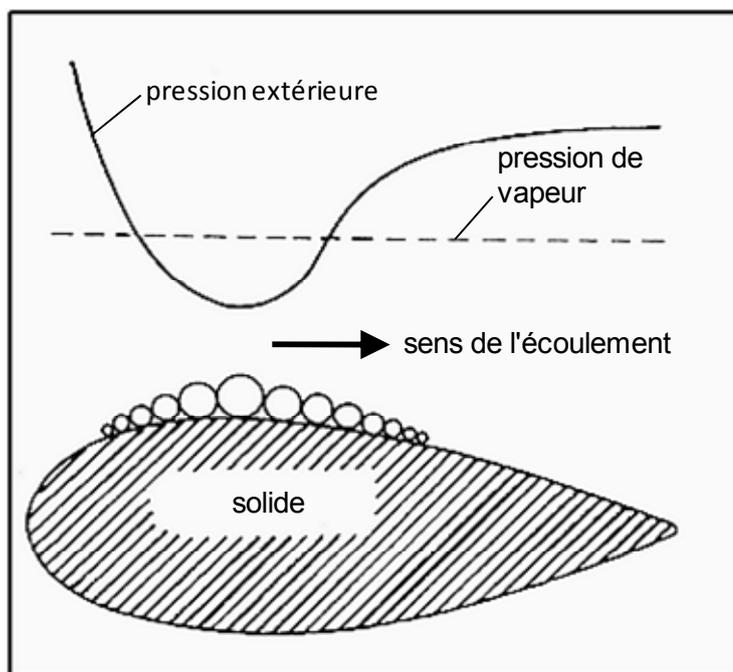


Fig. 23
Naissance et implosion de bulles de cavitation le long d'un profil longé par un flux

La cavitation peut être évitée, p. ex. en diminuant la chute de pression à chaque étage de soupape. En opérant avec plusieurs étages, on atteint la différence de pression souhaitée.

Les bruits de cavitation sont exclusivement des bruits à large bande.

Règles de construction pour diminuer la cavitation :

- Réduction des changements de pression
- Réduction de la vitesse d'écoulement
- Amélioration du guidage du flux, pour éviter la cavitation (Fig. 24)
- Éviter des vitesses d'écoulement de plus de 1,5 m/s pour les liquides, si les conditions de fonctionnement le permettent
- Utilisation de canaux d'aspiration courts
- Disposition du réservoir de liquide au-dessus de l'entrée de la pompe (augmentation de la pression statique)
- Utilisation de robinetterie et de soupapes à faible résistance à l'écoulement (Fig. 25)

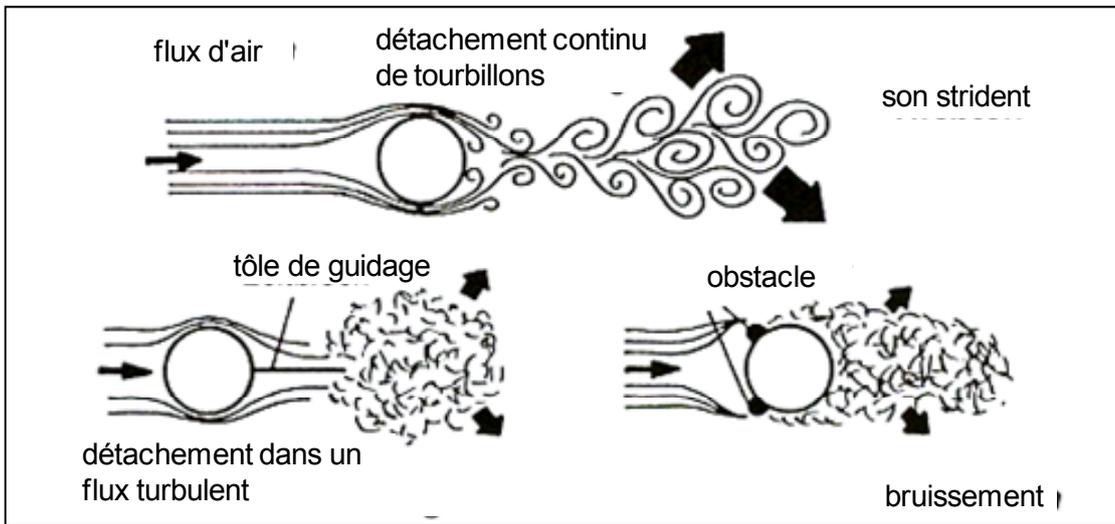


Fig. 24
Obstacle réduisant la zone tourbillonnaire et réduisant ainsi la cavitation

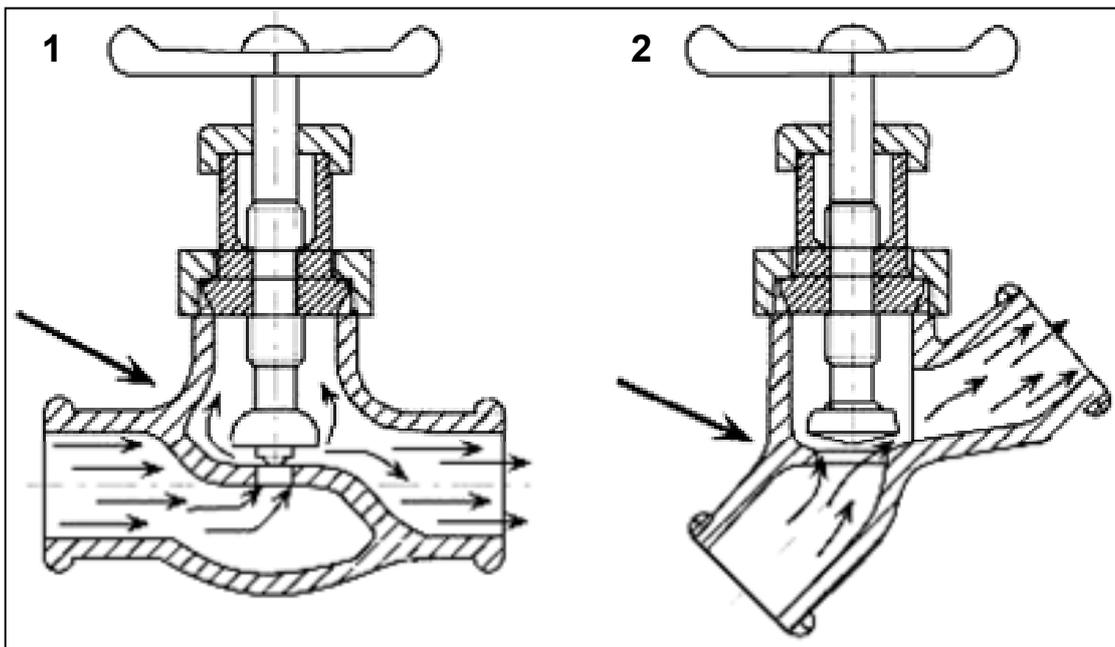


Fig. 25
Amélioration du guidage du flux sur une soupape à siège

- 1 Une garniture avec petit diamètre a pour effet une vitesse d'écoulement élevée dans l'orifice.
- 2 Une garniture avec grand diamètre a pour effet une vitesse d'écoulement réduite dans l'orifice.

5.4 Sources de son solide

5.4.1 Classification de l'excitation: aperçu

Le son solide peut se décomposer selon cinq types différents d'excitation, qui se distinguent nettement les unes des autres (Tableau 6).

Type d'excitation	Sous-groupes/exemples
1 Forces libres dues à la masse Spectre de raies	Forces non désirées dues à la masse Rotors (turbines, moteurs électriques) Forces désirées dues à la masse Application de la technique vibratoire, p. ex. rubans transporteurs, trémies, nettoyage, compactage
2 Choc Spectre continu pour les événements individuels	Technologies basées sur les chocs et les coups Estampage, rivure à martelage, compactage, transport d'objets rigides Chocs inhérents au principe de fonctionnement Butée, jeu
3 Diagramme de force irrégulier Processus périodique: Spectre de raies Événement bref et isolé : Spectre continu	Interaction entre les parties de la machine Engrenages, bruits de roulement (palier), moteurs électriques Interaction entre la machine et la pièce à travailler Détacher, couper, former Excitation de la machine par une pulsation à l'intérieur de celle-ci Machines à piston, machines à combustion interne et pompes
4 Forces inhérentes à des écoulements non-stationnaires Spectre continu, à large bande pour des phénomènes stochastiques: cavitation Sons purs: tourbillons Impulsion de pression à proximité de grilles périphériques	Générateurs de bruit dans des tubulures fermées Compresseurs, turbines, pompes
5 Auto-excitation Son pur: apparition ou disparition soudaine de l'émission à niveau élevé pour une variation minime d'un paramètre	Mouvements stick-slip Grincement des freins, grincement des outils lors de l'usinage, patinage, véhicules sur rail

Tableau 6
 Classification des types d'excitation de son solidien

5.4.2 Chocs

Les bruits de choc sont souvent les sources de bruit dominantes des machines. De nombreux mécanismes de production du bruit peuvent être considérés comme des chocs périodiques. Les principaux paramètres régissant la génération de bruits de chocs sont la masse et la vitesse des corps entrant en collision, ainsi que la durée du choc.

L'analyse spectrale d'un bruit de choc montre que l'on est en présence d'un bruit en large bande qui, à cause de la faible durée du choc, est dominé par les hautes fréquences. Les chocs périodiques produisent des composantes périodiques. Le spectre fait apparaître la fréquence du choc et ses harmoniques.

Règles de construction pour diminuer les bruits de choc :

- Allongement de la durée du choc (Fig. 26)
- Lissage de l'évolution temporelle de la force (Fig. 27, Fig. 28)
- Réduction de la vitesse d'impact
- Diminution de la masse du projectile effectuant un mouvement libre
- Augmentation de la masse du corps inerte
- Éviter le jeu entre des pièces soumises à des charges alternatives

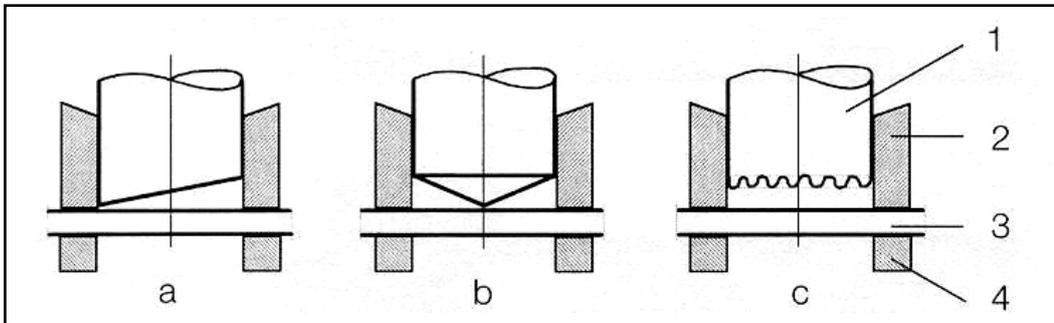


Fig. 26

Affûtage en biseau ou en ondulations d'un outil de découpage pour allonger la durée du choc

- | | | | |
|---|------------|---|-------------|
| a | oblique | 1 | estampe |
| b | en créneau | 2 | serre-flanc |
| c | ondulé | 3 | tôle |
| | | 4 | matrice |

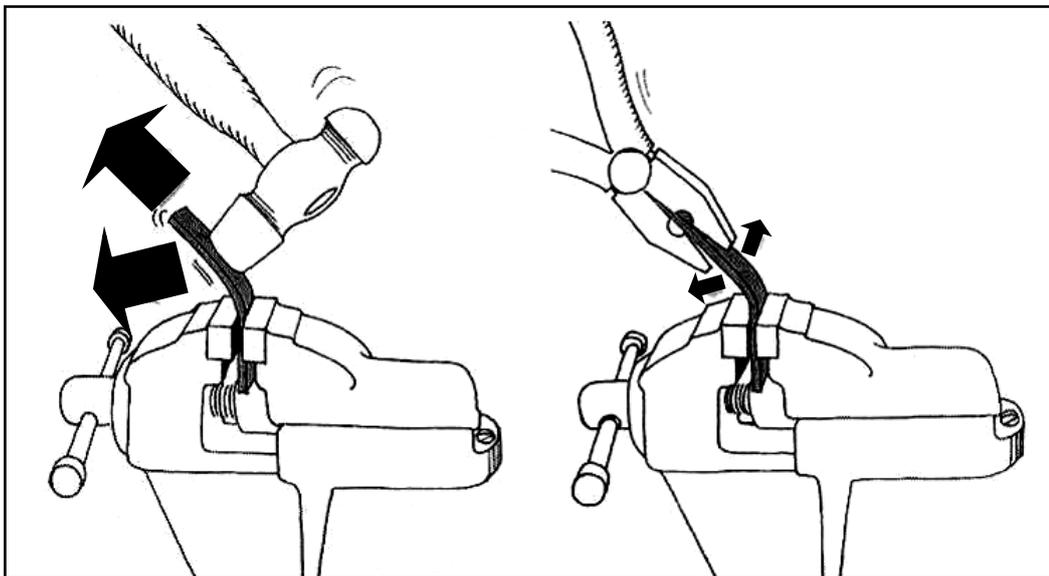


Fig. 27

Des modifications de la force, de la pression ou de la vitesse influencent l'émission sonore

Exemple: Plier une bande de tôle

À gauche : Opération bruyante au marteau de carrossier

À droite : Opération peu bruyante avec une pince ou, éventuellement, avec une machine à plier

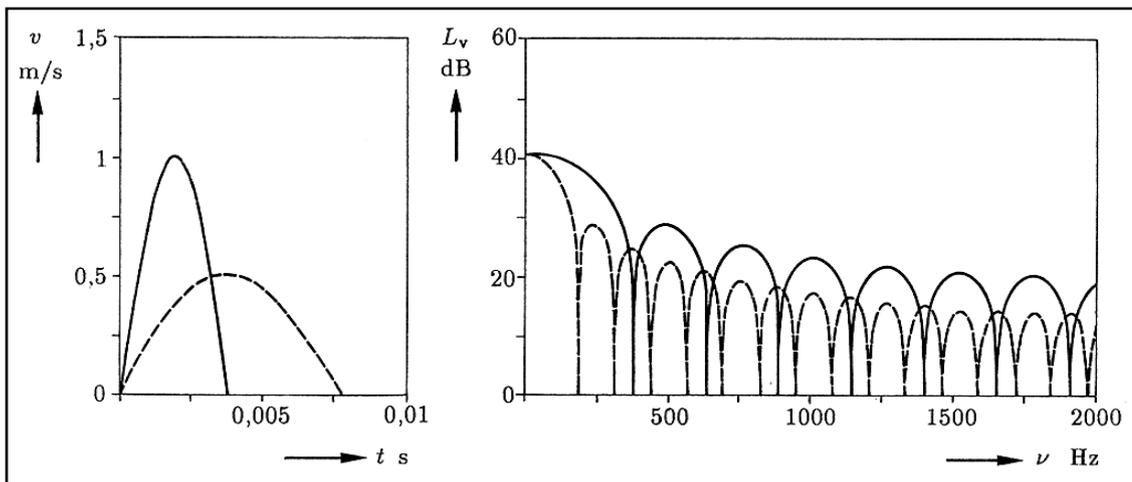


Fig. 28

Comparaison, dans les domaines temporel et fréquentiel, entre deux impulsions d'aire égale

Une des impulsions présente une durée double et une amplitude deux fois plus petite que l'autre. Sur la partie droite de la Fig 28, on a représenté les spectres de niveau. Il apparaît clairement que, pour l'impulsion la plus longue, la première retombée du spectre se produit à une fréquence nettement plus basse. Sur la totalité de la plage de fréquences, la densité modale est beaucoup plus grande que pour l'impulsion la plus courte.

5.4.3 Roues dentées

Souvent, le choix des roues dentées se fait sur la base de la documentation des fournisseurs, sans considération des caractéristiques acoustiques. Hélas, ce n'est qu'au moment de la mise en service de l'installation que l'on constate que la roue dentée utilisée constitue la source dominante du bruit.

Les bruits de roue dentée constituent une forme particulière de bruit de choc et ils se produisent, p. ex., avec les engrenages et les transmissions à chaîne. Les paramètres importants sont la durée d'engrènement des dents (rapport total de conduite), le diagramme force/temps au moment de l'engrènement et la rigidité des éléments en contact (dents). Des dents présentant des défauts peuvent provoquer une variation supplémentaire de la force et, ainsi, amplifier les bruits. En général, les bruits de roue dentées ont un caractère tonal (multiples de la fréquence d'engrènement).

Les mesures pouvant influencer le bruit de roue dentée consistent en des modifications de la géométrie des dents et des surfaces de contact, comme, p. ex., dépouille du flanc au sommet et aux pieds de la denture ou denture hélicoïdale (Fig. 29) dans le but d'augmenter la durée d'engrènement. Les bruits de roue dentée peuvent être également réduits en élevant la précision de la denture et son ajustage, de même qu'en accroissant le nombre de dents. L'augmentation du nombre de dents a pour effet une élévation de la fréquence d'engrènement, ce qui facilite la mise en oeuvre de mesures d'insonorisation. Le nombre de dents de deux pignons en contact devrait être choisi de manière que les contacts entre le couple de roues dentées soient le moins fréquent possible (p. ex. avec des nombres de dents n'ayant pas de diviseur commun). Il y a lieu de prendre en compte les déformations géométriques des dents et des arbres. Les profils des dentures peuvent être optimisés pour une zone de charges limitée, mais pas pour toutes les charges possibles.

Pour des faibles charges (p. ex. engrenages d'appareils ménagers) on peut utiliser des pignons en matière synthétique. Avec des charges très élevées, le changement de matériau n'influence pratiquement plus la production de bruit.

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant de l'engrènement :

- Augmentation de la durée d'engrènement avec un rapport de conduite total ou apparent selon un nombre entier (Tableau 7)
- Utilisation d'engrenages hélicoïdaux (Fig. 30)
- Augmentation du nombre de dents
- Amélioration de la qualité (alignement, précision de la denture)
- Utilisation de matières synthétiques avec de faibles charges

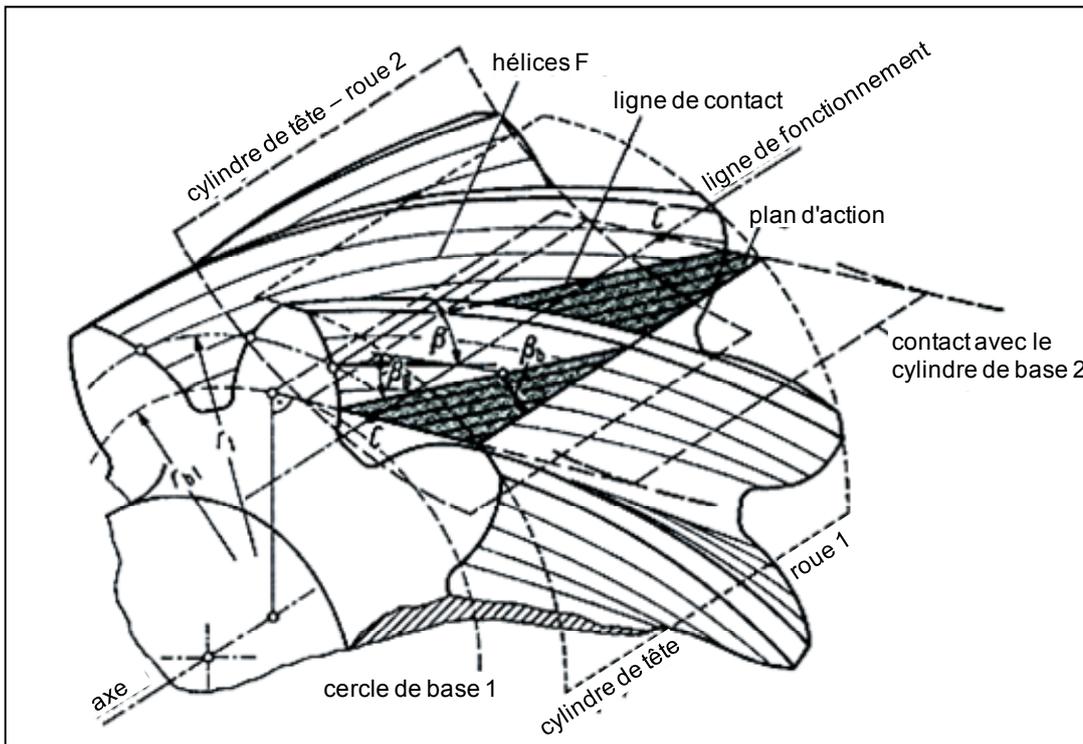


Fig. 29
Conditions d'engrènement dans un engrenage hélicoïdal

Type d'engrènement	Droit	Droit	Oblique	Oblique
Rapport de conduite apparent	1,4	2,0	2,0	2,0
Rapport de recouvrement	0	0	0,5	1,0
Réduction de bruit	0	- 4 ... - 8 dB	- 10 ... - 12 dB	- 14 ... - 16 dB

Tableau 7
Effet du rapport de conduite apparent et de recouvrement sur la production de bruit des engrenages industriels

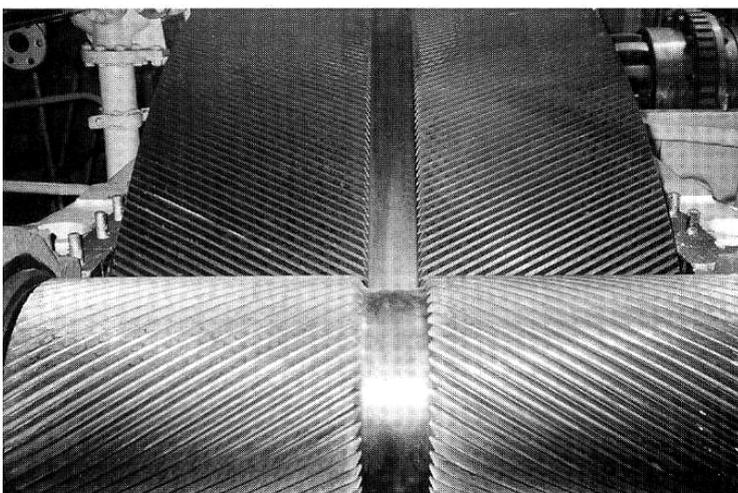


Fig. 30
Un excellent exemple d'engrenage hélicoïdal double pour compenser les forces axiales!
Il s'agit de la transmission principale sur un ancien navire de guerre, propulsé par des turbines à vapeur (HMS Belfast, construit en 1938, puissance env. 110 000 kW, 10 500 BRT).

Comme les transmissions comprennent toujours des roues dentées, la conception des engrenages en rapport avec les paliers et les arbres a une influence importante sur le bruit généré. La Fig. 31 présente les concepts de base en la matière.

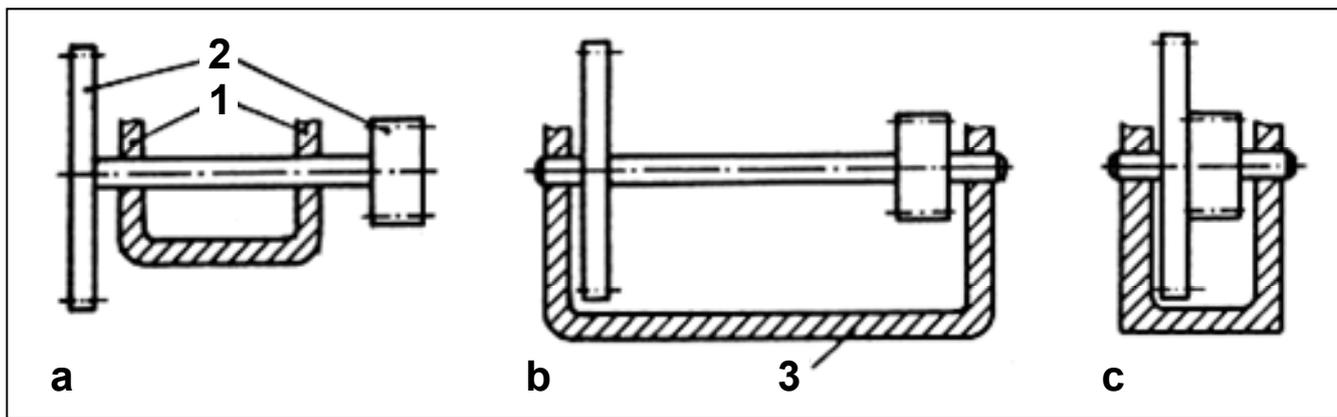


Fig. 31

Disposition des paliers 1 et de l'introduction resp. de la force et du couple sur un axe dans le bâti 3

- a Acoustiquement mauvais (dispositions des paliers entre les roues dentées)
- b Excitation par balourd diminuée en disposant les appuis à l'extérieur (inconvenient: importante surface rayonnante de l'appui)
- c Variante moins bruyante (appuis extérieurs et distance minimale entre ceux-ci)

5.4.4 Bruits de roulement

Les bruits se produisant lors du roulement sont générés par des rugosités ou des faux rond à la surface de roulement. Des bruits de roulement sont produits dans les roulements à aiguilles ou à billes, dans les installations de manutention, ainsi que dans les véhicules ferroviaires et routiers. En particulier, la qualité des surfaces de roulement des véhicules sur rail revêt une grande importance. L'introduction de nouveaux systèmes de freinage a permis de ménager les surfaces de roulement et de réaliser une diminution du bruit par rapport aux systèmes conventionnels pouvant atteindre 12 dB(A). Les bruits de roulement dépendent également de la rigidité dans la zone de contact.

Les bruits de roulement présentent un spectre en large bande. Si des événements périodiques interviennent dans l'excitation (comme p.ex. dans les paliers à roulement) – ce qui est fréquemment le cas – des composantes tonales peuvent aussi apparaître.

Règles de construction pour la réduction des bruits de roulement :

- Maintien de surfaces de roulement lisses
- Emploi de lubrifiants appropriés
- Utilisation de paliers à roulement de précision
- Tolérances minimum au niveau du bâti (serrage du roulement)
- Utilisation de paliers à glissement
- Augmentation de l'élasticité dans la zone de contact

5.4.5 Forces dues à la masse

L'accélération d'une masse implique des forces qui peuvent engendrer des bruits par différents mécanismes, comme p. ex. choc, roulement, frottement ou pulsation. Les forces dues à la masse sont générées par des masses oscillantes ou des balourds de pièces en rotation. Dans certains cas (p. ex. avec un entraînement à manivelle), ces forces peuvent exciter des éléments de la structure de la machine à une fréquence multiple de la fréquence de rotation. Lorsque des paliers à roulement sont soumis à des forces dues à la masse, il y a lieu de prendre en compte les bruits de roulement.

Dans certains cas, un équilibrage dans une dimension des rotors en forme de disque suffit; dans tous les autres cas, il faut procéder à un équilibrage dynamique.

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant des forces dues à la masse :

- Réduction des forces dues à la masse par équilibrage des rotors ou équilibrage des masses décalées
- Réduction des masses soumises à une accélération
- Accroissement de la rigidité du mouvement
- Diminution du régime

5.4.6 Frottement, auto-excitation

Les mécanismes, pour lesquels un frottement produit un mouvement de stick-slip, sont des sources de bruit potentielles. Les changements de force se produisant en pareil cas ont le même effet qu'une sollicitation par un choc. Ils peuvent exciter des résonances de la structure et ils déterminent le mode d'oscillation des résonances auto-excités. Les bruits produits par un frottement, p. ex. sur les disques de frein, les articulations, etc., dépendent fortement de l'appariement des matériaux et de la lubrification. Un exemple frappant de ce phénomène est le grincement des trains et des trams dans les courbes serrées. (Fig. 32).



Fig. 32
Grincement du train dans une courbe serrée
(Fig.: courbe Montebello de la RhB sur la ligne de la Bernina)

En principe, la friction de glissement génère des bruits en large bande, toutefois, à cause de l'excitation des fréquences propres de la structure, des composantes tonales apparaissent souvent dans le bruit produit. Cet effet se rencontre également dans le cas des machines d'usinage (Fig. 33).

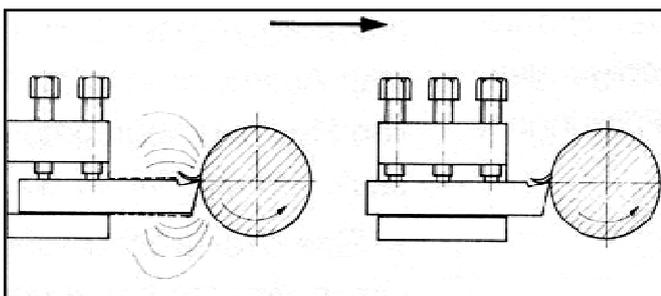


Fig. 33
Un faible porte-à-faux du burin (à droite) réduit le bruit émis

Règles de construction pour la réduction du bruit solidien provenant du frottement et de l'auto excitation :

- Réduction du frottement par un choix approprié des matériaux
- Réduction du frottement par une lubrification correcte
- Augmentation de l'amortissement de la structure pouvant être auto-excitée

5.4.7 Champs magnétiques

Des champs magnétiques sont utilisés, par exemple, dans les moteurs électriques, pour produire les forces entraînant le mouvement rotatif. L'irrégularité du couple durant une rotation, qui engendre des variations de force sur le rotor et les paliers, est source de vibrations.

Les bruits provenant des champs magnétiques dépendent de la charge. Ces bruits peuvent être prépondérants lorsque le moteur électrique est équipé d'un système de refroidissement et de paliers peu bruyants. Dans le cas de moteurs à régime variable, commandés par un convertisseur, il peut se produire des bruits de haute fréquence.

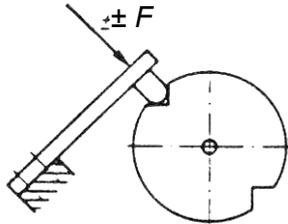
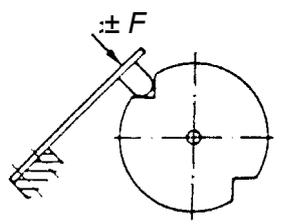
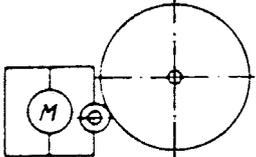
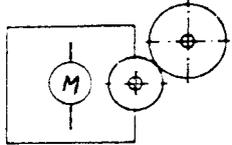
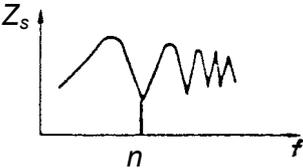
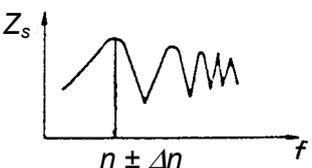
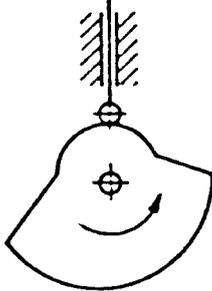
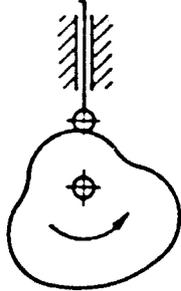
Les bruits de transformateur ont des composantes de fréquence correspondant au double et à un multiple de la fréquence du réseau (50 Hz), jusqu'à environ 600 Hz. Le son solidien, produit dans le noyau du transformateur à cause de phénomènes magnétiques (p. ex. magnétostriction, dépendant du matériau), se transmet par le liquide de refroidissement et les points de fixation et est rayonné par le bâti.

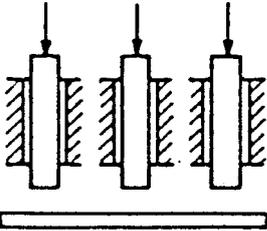
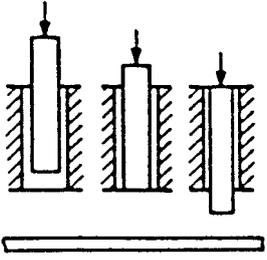
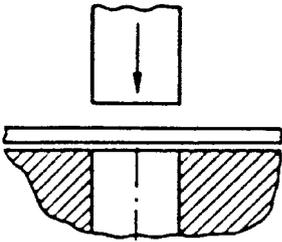
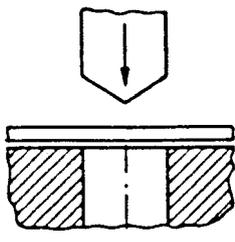
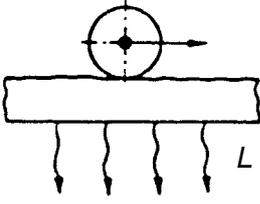
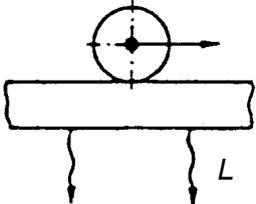
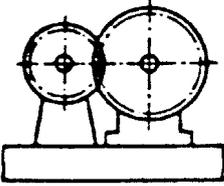
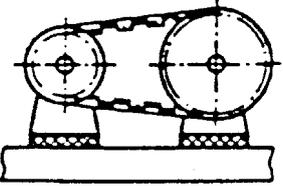
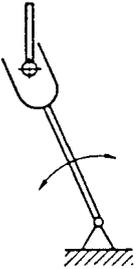
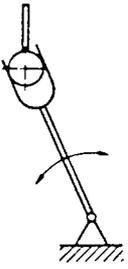
Règles de construction pour la réduction du bruit solidien provenant des champs magnétiques.

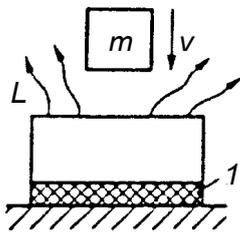
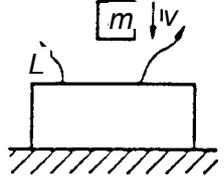
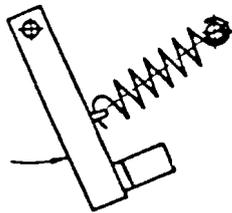
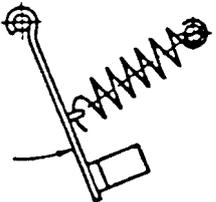
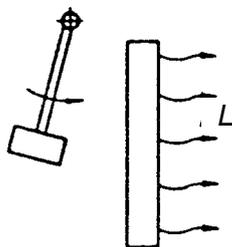
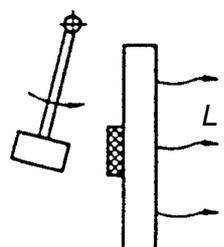
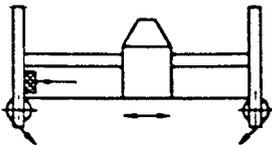
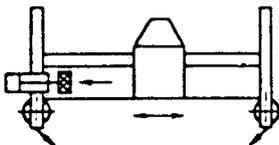
- Choisir le nombre d'encoches d'induit de manière à ce qu'aucune fréquence propre du stator et du rotor ne soit excitée
- Les encoches d'induit ne devraient pas être disposées parallèlement aux pôles
- Tolérances minimales pour la forme et la position du noyau magnétique, afin d'obtenir un champ magnétique aussi symétrique que possible
- Optimisation de la forme des pôles
- Prise en compte des bruit magnétiques induits par les convertisseurs sur les moteurs à régime variable (pas de fréquence propre fixe)
- Choix du matériau du noyau des transformateurs, avec pour objectif la réduction de l'excitation par voie solidienne

5.4.8 Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles

Une diminution de l'excitation par voie solidienne peut, pour la plupart des machines, être considérée comme la mesure la plus judicieuse pour réaliser une insonorisation active et elle doit, par conséquent, être réalisée avec tout le soin nécessaire. Suivant les mécanismes d'excitation, il peut se produire du bruit solidien continu (harmonique et stochastique), de même que discontinu (généralement impulsionnel). Ces deux types d'évolution temporelle du son solidien requièrent des mesures distinctes si l'on veut combattre le bruit avec succès. Les règles et les solutions possibles sont présentées dans le Tableau 8.

Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>1 <i>Les forces d'entraînement ne doivent pas être plus grandes que nécessaire.</i></p> <p>Une réduction des forces motrices à un minimum a pour conséquences une production de son solide, et donc de son aérien, limitée au minimum techniquement admissible. Avec pour corollaires une économie d'énergie et une durée de vie accrue.</p>		
<p>2 <i>La vitesse de rotation des pièces tournantes doit être la plus basse possible.</i></p> <p>La production du bruit solide due à un balourd croît progressivement en fonction du régime. Un régime diminué de moitié se traduit par une baisse de l'excitation d'un facteur 4 (12 dB). L'excitation sur le schéma de droite ne sera, pour un même balourd, que $(3000/20000)^2$, soit 2,5 % de la valeur correspondant au schéma de gauche.</p>	 <p>$n_M = 20'000 \text{ t min}^{-1}$</p>	 <p>$n_M = 3'000 \text{ t min}^{-1}$</p>
<p>3 <i>Des modifications minimales de fréquences d'excitation tonales (régime, fréquence d'engrènement) ou de la géométrie de pièces, permettent d'éviter une coïncidence avec des fréquences propres de flexion.</i></p> <p>Les niveaux sonores élevés, dus à une amplification de résonance, apparaissent comme particulièrement gênants, à cause de leur tonalité marquée. La mauvaise solution montre un plaque excitée à une fréquence n, dans une zone de faible impédance (forte covibration). En modifiant le régime de $\pm \Delta n$, le comportement acoustique s'en trouve amélioré.</p>		
<p>4 <i>L'évolution temporelle des forces motrices périodiques doit être telle que la montée et la courbure soient les plus petites possible.</i></p> <p>En minimisant les premières et deuxièmes (éventuellement plus hautes) dérivées de l'évolution temporelle, on diminue le bruit aux fréquences supérieures à quelques centaines de Herz. Pour la même raison, les lois cinématiques des commandes à cames devraient être continues jusqu'à la 3^{ème} dérivée.</p>		

Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>5 <i>On décalera dans le temps plusieurs mécanismes d'excitation agissant indépendamment les uns des autres.</i></p> <p>Deux mécanisme d'excitation semblables, p. ex. des poinçonneurs, décalés dans le temps, produisent un niveau sonore de crête de 3 dB plus faible, que s'ils frappaient simultanément.</p>		
<p>6 <i>L'étalement dans le temps d'un mécanisme d'excitation conduit à un transfert de force moins brusque et produit donc un plus faible niveau de son solidien.</i></p> <p>Un étalement dans le temps s'obtient en utilisant le principe de l'inclinaison. Les engrenages hélicoïdaux ont généralement un fonctionnement plus silencieux que les engrenages droits; les poinçons en créneau (figure) produisent moins de bruit que ceux présentant une surface de coupe droite.</p>		
<p>7 <i>Une fabrication et un montage précis, de même que l'absence de jeu par une construction souple, contribuent à réduire le bruit.</i></p> <p>Les rugosités superficielles, ainsi que les défauts de forme et de positionnement des surfaces de roulement (figure), le jeu, les balourds, etc. sont la source de forces étrangères au fonctionnement et produisent du son solidien.</p>		
<p>8 <i>Les dispositifs de transmission et d'appui doivent être réalisés avec des éléments élastiques et/ou amortissants.</i></p> <p>Les courroies crantées (figure) sont préférables aux transmissions par engrenages ou par chaîne; normalement, le fonctionnement des paliers à glissement est plus silencieux que celui des palier à roulement.</p>		
<p>9 <i>Il faut éviter ou réduire au minimum les points d'impact non liés au fonctionnement (butées, jeu des articulations).</i></p> <p>Les butées ou les élément présentant du jeu sont souvent les sources de bruit dominantes dans un appareil.</p>		

Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>10 <i>Les bruits de chocs ne peuvent être atténués efficacement qu'aux points d'impact.</i></p> <p>Contrairement aux bruits continus, les bruits de chocs sont fortement rayonnés dans le voisinage immédiat du point d'excitation. En outre, les mesures d'amortissement des sons solidiens (p. ex. sous-couche élastique 1) n'agissent que sur une partie (hautes fréquences) du large spectre. C'est pourquoi, il faut agir de préférence sur les grandeurs responsables de l'excitation (p. ex. la masse et la vitesse).</p>		
<p>11 <i>Les bruits de chocs peuvent être réduits en limitant la masse efficace et la vitesse d'impact de l'objet à la source du choc.</i></p> <p>Le produit de la masse de l'objet et de la vitesse d'impact (impulsion) détermine la hauteur de la partie constante du spectre excité; aussi, on remplacera, p. ex., des leviers lourds par des leviers légers qui requièrent moins de force pour être accélérés.</p>		
<p>12 <i>Le temps d'action de la force durant un choc devrait être allongé, en réduisant simultanément la valeur de crête de la force.</i></p> <p>Lors d'un choc entre masses en mouvement, l'allongement temporel de l'action de la force s'accompagne généralement d'une diminution de la valeur de crête de la force et la gamme de fréquences excitée s'en trouve ainsi réduite. L'allongement de la durée du choc peut être obtenu par le choix approprié du matériau, la souplesse des surfaces de contact (p. ex. couches intermédiaires élastiques) et en modifiant les valeurs efficaces des masses.</p>		
<p>13 <i>Un très fort allongement temporel de l'action de la force ne peut être obtenu qu'avec des équipements supplémentaires.</i></p> <p>Dans certains cas (forte énergie du choc), le grand allongement requis ne peut être obtenu par la seule modification des paramètres constructifs (Règle 11). Il faut alors faire appel à des moyens supplémentaires (amortisseurs, freins à courants de Foucault, combinaisons de ressorts) qui consomment lentement l'énergie du choc et réduisent ainsi la crête de force.; p. ex. butée d'une tête d'impression (v. figure).</p>		

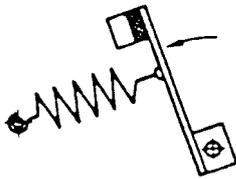
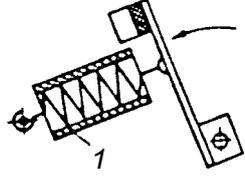
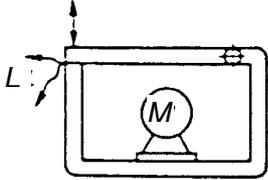
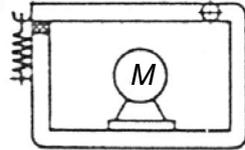
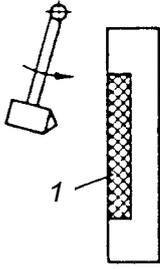
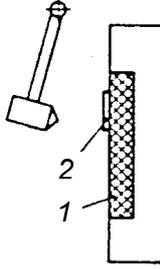
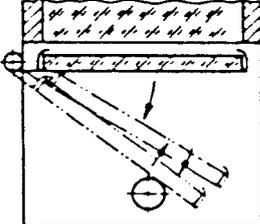
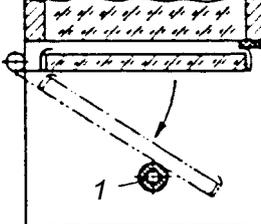
Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>14 Les points d'impact avec des résonances prononcées (long tintement) doivent être amortis.</p> <p>Les mesures d'amortissement ont un effet surtout sur les résonances excitées par le choc impulsif, mais, dans une moindre mesure, sur le bruit du choc ; p. ex, on peut éviter le tintement de ressorts tendus au moyen d'une enveloppe amortissante 1.</p>		
<p>15 Lors de la conception de l'appareil, on peut prévenir l'existence de points d'impact « secondaires ».</p> <p>Les éléments vibratiles (tôles de fermeture, leviers) qui ne transmettent pas de forces alternatives par eux-mêmes, peuvent être conduits à cliqueter sous l'effet d'autres sources de chocs ou de vibrations propres la machine. Ces éléments doivent être traités de la même manière que des sources "primaires" (Règles 9 et 12).</p>		
<p>16 Aux points d'impact des chocs, il faudrait donner la préférence à une structure en couches.</p> <p>Dans le cas de points d'impact correctement conçus du point de vue acoustique (faible aire de contact, matériaux tendres), la pression superficielle dépasse souvent la valeur admissible. Un compromis acoustiquement et constructivement acceptable consiste à réaliser une structure en couches, en disposant une (mince) surface dure 1 sur le matériau tendre 2.</p>		
<p>17 Il faut éviter l'apparition de chocs multiples.</p> <p>Les spectres de chocs répétés à bref intervalle (rebonds) se superposent et augmentent le bruit rayonné. Il existe plusieurs moyens techniques pour éviter les rebonds, p. ex. un matériau élastique (1) sur la butée à 45° du miroir d'un appareil de photo reflex.</p>		

Tableau 8
Règles pour la réduction de l'excitation du bruit solide

6 Réduction de la transmission de bruit

6.1 Transmission du son aérien

Le son aérien, généré dans les différentes parties de la machine, est rayonné dans le voisinage. Il existe divers moyens pour diminuer cette transmission :

- Capotages et cabines insonorisants
- Écrans antibruit mobiles (parois mobiles)
- Silencieux (amortisseurs de bruit)
- Absorption acoustique

Les mécanismes physiques impliqués dans ces mesures d'insonorisation sont, principalement, la réflexion et l'absorption.

6.1.1 Capotages insonorisants

Les capotages insonorisants sont des enveloppes phonoabsorbantes closes. Les ouvertures, même les plus petites, doivent être colmatées. Normalement, les parois sont constituées de tôle mince servant à réfléchir le son. Afin d'améliorer l'effet insonorisant d'un capotage, il faut utiliser un revêtement absorbant (l'épaisseur est fonction de la fréquence la plus basse à absorber).

La structure de base de la machine peut être pourvue de capotages additionnels ou alors, les parties enveloppantes de la machine sont conçues de telle manière qu'elles fassent office de capotages insonorisants. À l'emplacement des ouvertures indispensables (ventilation, transport de matériel, passage de câble, etc.), on intégrera des silencieux. Les ouvertures nécessaires à l'entretien doivent être soigneusement fermées durant l'exploitation (prendre en compte les aspects relatifs à la sécurité).

Afin d'éviter une transmission du son solidien aux tôles de capotage, on utilisera une fixation isolant les vibrations.

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien au moyen de capotages :

- Réalisation de capotages totalement fermés; les petites fentes et les petits trous (p. ex. fissures, joints) ont leur importance et doivent être également colmatés (Fig. 34)
- Utilisation de tôles robustes (matériau insonorisant) pour la construction de l'enveloppe extérieure du capotage
- Utilisation de matériau phonoabsorbant sur le côté intérieur du capotage
- Mise en œuvre de silencieux aux ouvertures pour la ventilation, les câbles, les tuyaux, le transport de matériel, etc.
- Pas de liaisons rigides entre le capotage et la machine; nombre réduit de points de fixation

Le capotage de sous-groupes individuels peut aussi se révéler efficace, s'il concerne les sources dominantes.

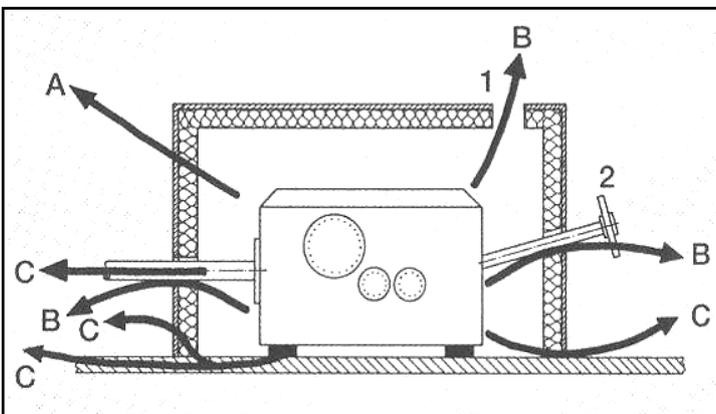


Fig. 34
Exemple de voies de transmission acoustique à travers un capotage

- 1 Orifice d'aération
- 2 Organes de commande

- Voie A Transmission de son aérien par la paroi du capotage
- Voie B Transmission de son aérien par les inétanchéités
- Voie C Transmission de son solidien et rayonnement sous forme de son aérien

La publication Suva 66026 "Des enceintes pour lutter contre le bruit" présente des informations complémentaires sur ce thème.

6.1.2 Parois mobiles

Les parois mobiles (ou écrans acoustiques) peuvent être installées à proximité de petites machines à forte émission de bruit. Leur efficacité est notablement inférieure à celle des capotages et elle dépend fortement des conditions géométriques. Elles sont toutefois indiquées pour réduire le bruit d'une source ponctuelle dans un secteur limité.

L'efficacité d'une paroi mobile dépend largement des propriétés phonoabsorbantes du plafond au-dessus de la paroi. Plus le plafond absorbe le son, meilleur sera l'efficacité de la paroi mobile.

Leur effet se limite aux fréquences pour lesquelles la longueur d'onde est de l'ordre de la dimension de la paroi, ou plus petite que celle-ci.

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien par des parois mobiles (voir aussi Fig. 35) :

- Emploi de tôles robustes (matériau phonoisolant) pour la paroi
- La face de la paroi côté source doit être revêtue de matériau phonoabsorbant
- La paroi mobile doit être aussi proche que possible de la source

La publication Suva 66008 "Acoustique des locaux industriels" présente des informations complémentaires sur ce thème.

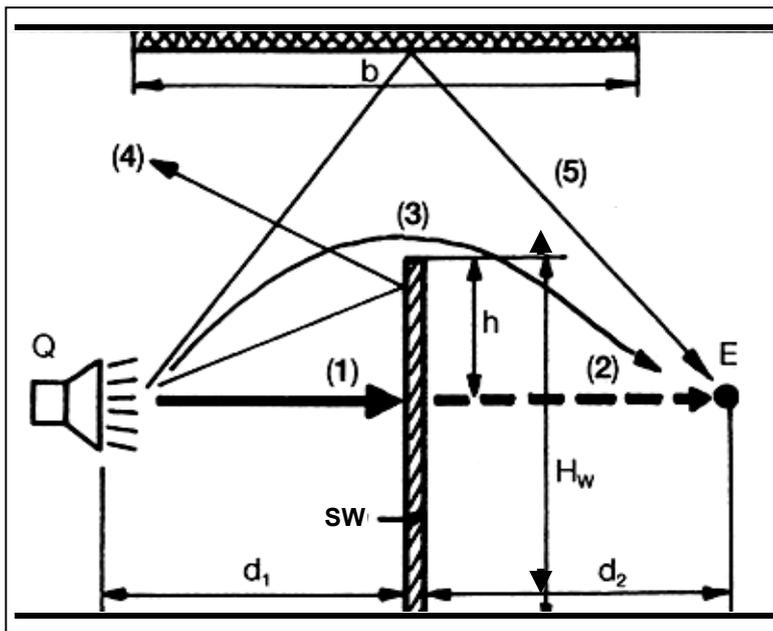


Fig. 35
Caractéristiques acoustiques d'une paroi mobile

- | | |
|--|---|
| Q = source sonore | E = récepteur |
| SW = paroi mobile | H _w = hauteur de la paroi |
| h = hauteur efficace de la paroi | b = largeur du plafond acoustique au-dessus de la paroi |
| d ₁ = distance source - paroi | d ₂ = distance paroi - récepteur |

Les différentes voies de transmission du bruit sont désignées par les nombres 1 – 5 :

- 1 son direct de la source
- 2 fraction du bruit traversant la paroi
- 3 fraction du bruit diffractée au-dessus de la paroi (effet de diffraction dépendant de la fréquence)
- 4 fraction du bruit réfléchi par la paroi (fonction du pouvoir absorbant de la paroi)
- 5 fraction du bruit réfléchi par le plafond (fonction du pouvoir absorbant de la paroi)

6.1.3 Silencieux

Les silencieux sont des dispositifs permettant de réduire la transmission du son aérien par des ouvertures. Les silencieux à absorption sont du type "canal avec un revêtement poreux". Ils sont fréquemment utilisés avec la combinaison capotage insonorisant/ventilateur dans le but d'assurer l'évacuation de la chaleur, sans diminuer l'efficacité du capotage insonorisant. Les silencieux à réflexion fonctionnent selon le principe de la réflexion du son aux brusques changements de section des conduits tubulaires (utilisés fréquemment avec des moteurs à combustion, silencieux d'admission et d'échappement). Dans la plupart des cas, les silencieux utilisent une combinaison des systèmes à absorption et à réflexion (Fig. 47 à Fig. 55).

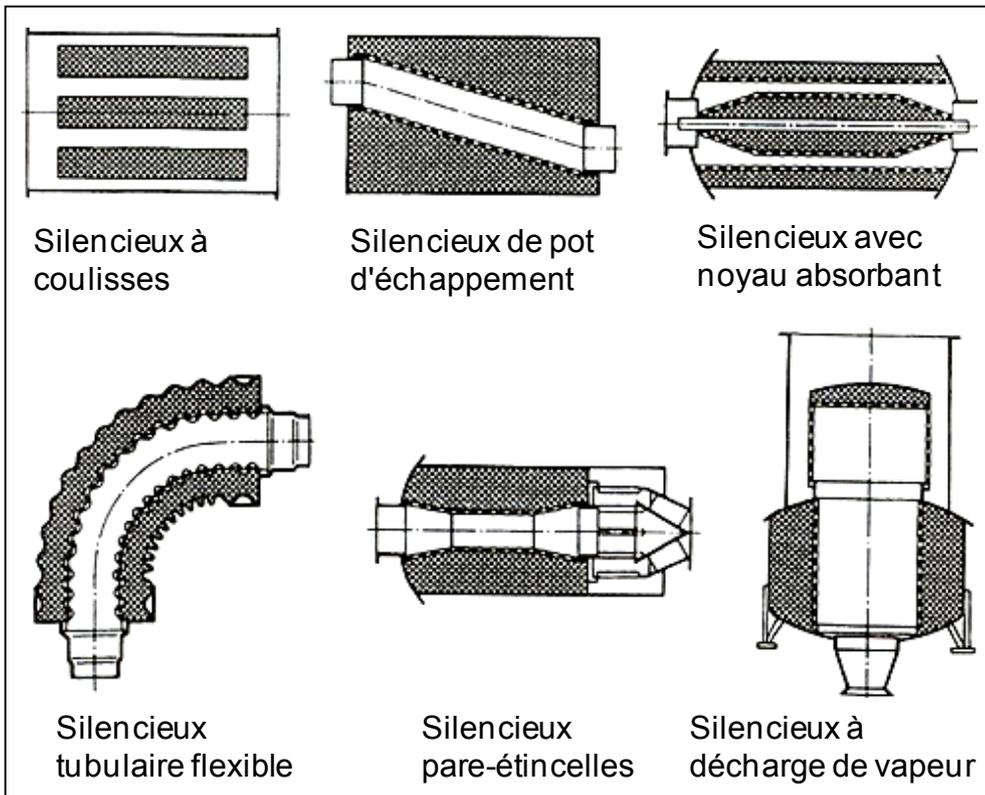


Fig. 36
Exemples d'utilisation de silencieux à absorption

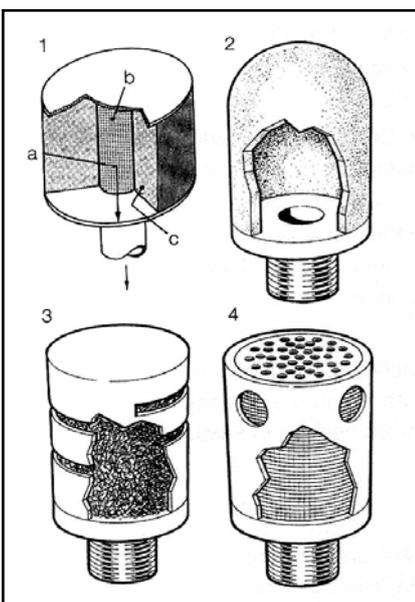


Fig. 37
Constructions de silencieux réactifs

- 1 Silencieux d'admission
 - a Conduite de gaz, canal d'écoulement
 - b Recouvrement perméable au son
 - c Dispositif poreux avec résistance à l'écoulement adaptée
- 2 Silencieux réactif en métal fritté
- 3 Silencieux réactif avec remplissage de laine d'acier comprimée
- 4 Silencieux réactif avec insert filtrant et tissus d'acier

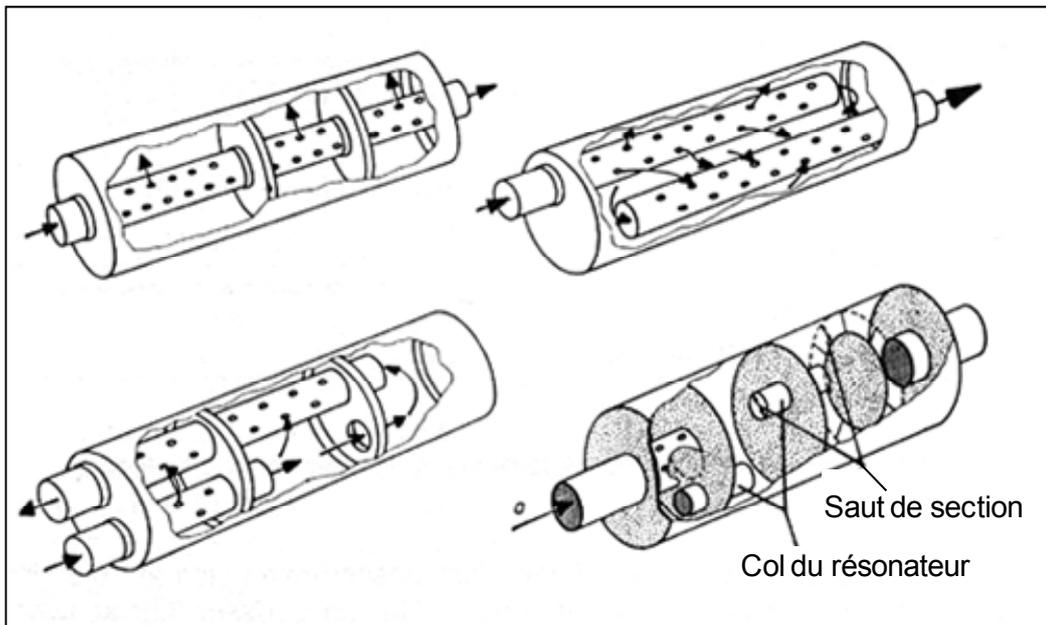


Fig. 38
Résonateur à réflexion pour véhicules à moteur (silencieux d'échappement)

Les bruit de détente des soupapes d'air comprimé sont diminués par des silencieux de détente

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien par des silencieux

- utilisation de silencieux à absorption pour bruits à large bande
- éviter les vitesses d'écoulement supérieures à 20 m/s dans les silencieux à absorption
- utilisation de silencieux à réflexion pour les bruits de basse fréquence
- utilisation de silencieux de détente pneumatiques à la sortie de l'air comprimé

En complément, nous signalons une technique particulière d'insonorisation: l'absorption active, Ce principe est appliqué avec succès depuis de nombreuses années dans les systèmes de canaux et de conduites fermés, ainsi que dans les moyens de transport (avions, voitures) (Fig. 39 et Fig. 40).

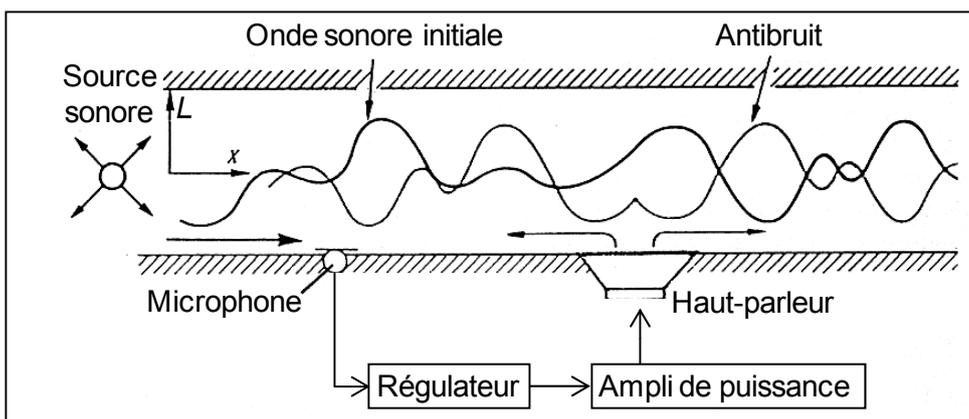


Fig. 39
Principe de la superposition du bruit et de l'antibruit dans un conduit

L = pression acoustique

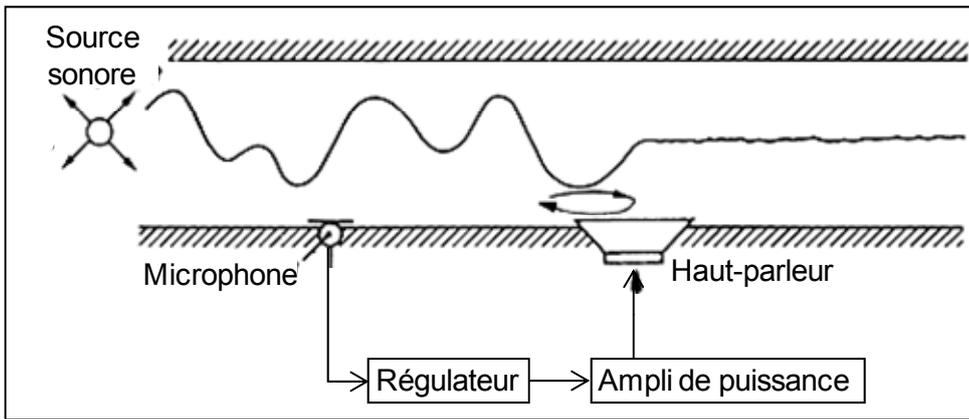


Fig. 40

Champ acoustique résultant de la superposition du bruit et de l'antibruit

L'onde acoustique initiale est presque totalement réfléchi par le haut-parleur antibruit, alors que, après le haut-parleur, elle est effacée.

Pour ce sujet également, l'ouvrage „Strömungsakustik in Theorie und Praxis“, expert-verlag fournit des informations complémentaires.

6.2 Transmission du bruit par les liquides

La transmission du bruit par les liquides intervient généralement dans des tuyaux ou des canalisations, Des mesures d'insonorisation peuvent être mises en œuvre à l'entrée du système, dans le système lui-même ou à la sortie de celui-ci. Les moyens d'insonorisation à disposition sont la réflexion et l'absorption.

Une réflexion se produit à l'extrémité du système par un changement de la section du tube ou du tuyau, ou par une modification de la rigidité de la paroi, lorsqu'on utilise une combinaison de tuyaux et de tubes.

Une absorption du son dans les liquides se fait au moyen de tuyaux ou d'accumulateurs remplis de laine d'acier ou de gaz. Les tuyaux atténuent le bruit transmis par les liquides, ils augmentent en contrepartie le bruit aérien rayonné.

Il existe aussi des silencieux pouvant s'utiliser dans des conduites remplies de liquide. Ces silencieux sont basés sur le principe des silencieux à réflexion, car l'emploi de matériaux absorbants n'est pas possible (Fig. 41).

Règles de construction pour la réduction du bruit transmis par les liquides :

- utilisation d'une combinaison de tubes et de tuyaux (Fig. 42)
- utilisation de silencieux
- insertion de compensateurs pour interrompre la propagation longitudinale des sons solidiens (Fig. 43)

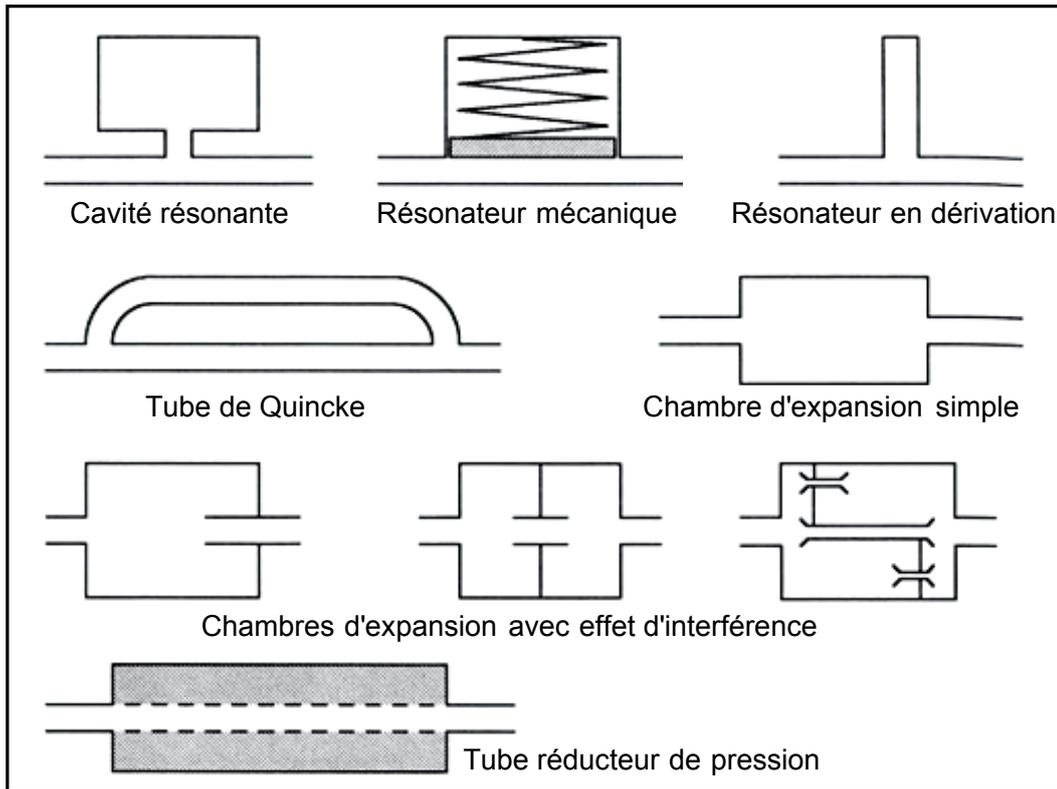


Fig. 41
Types d'amortisseurs à réflexion pour les conduits tubulaires contenant des liquides

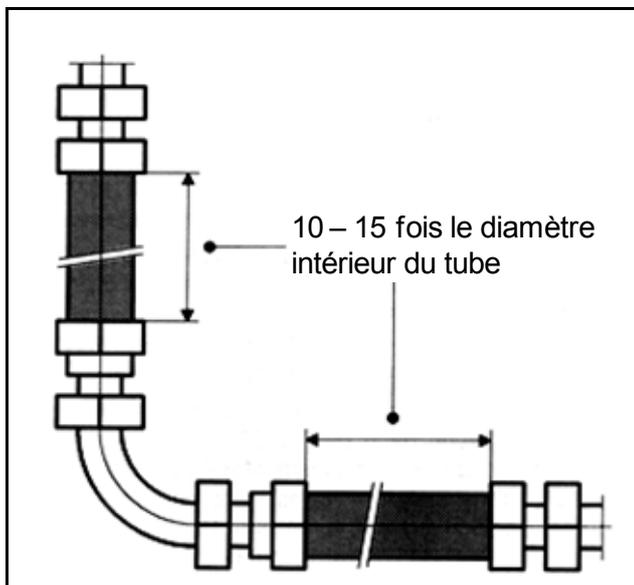


Fig. 42
Insertion de tube métallique

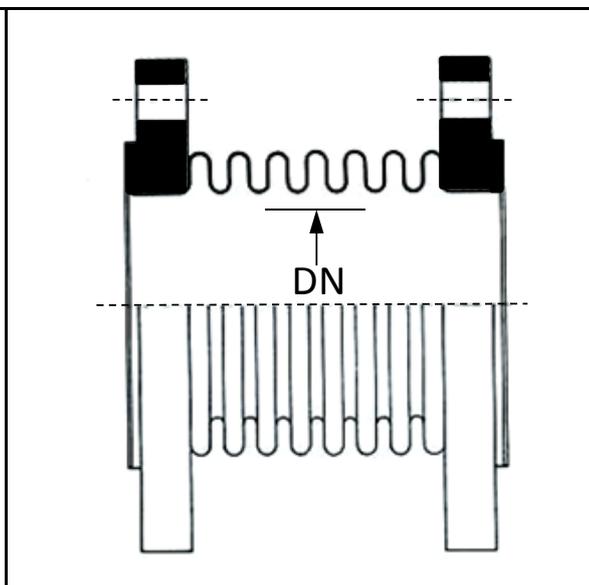


Fig. 43
Compensateur en métal ou en tube ondulé

DN = diamètre nominal

6.3 Transmission du son solidien

6.3.1 Généralités

On peut agir sur la transmission du son solidien, de la source jusqu'aux surfaces rayonnantes, en modifiant la masse, la rigidité et la répartition de l'amortissement sur la structure transmettrice. La marche à suivre dépend de divers paramètres tels que :

- s'agit-il d'une excitation due à une force, à une vitesse ou une combinaison des deux (voir chap. 2)?
- a-t-on affaire à une excitation en bande étroite ou large?
- est-ce que ce sont les fréquences basses, médium ou hautes qui sont excitées? Ces plages de fréquences peuvent être mises en relation avec le comportement quasistatique, respectivement le comportement en résonance ou le comportement de la structure en présence d'une densité modale élevée.

Si une augmentation du poids est possible, l'ajout d'une masse aussi près que possible de la zone d'excitation peut se révéler très efficace, surtout dans la zone comportant une densité modale élevée et avec une excitation par une force. Pour une mesure de ce type, on parle aussi de masse de blocage.

Avec une excitation due à une vitesse, une augmentation de la masse au point d'excitation n'est que de peu d'utilité. En tel cas, il est plus judicieux d'amortir la source. Avec une excitation par un nombre limité de bandes de fréquences étroites, p. ex. par un signal périodique, le problème peut être résolu en modifiant les différentes fréquences de résonance par une redistribution de la masse et de la rigidité; à condition, toutefois, que le problème n'intervienne que dans une la zone de fréquences propres discrètes. Dans pareil cas, une augmentation de l'amortissement peut également se révéler utile.

Avec une excitation en large bande, un décalage des fréquences propres n'est pas efficace; il faut alors tenter de réduire la transmission en large bande.

Aux bases fréquences (en comportement quasistatique), la seule mesure efficace est l'amortissement vibratoire.

Aux fréquences médium, c.-à-d. avec des fréquences propres discrètes, les mesures suivantes peuvent s'avérer utiles (en fonction du type d'excitation) :

- augmentation de la masse au point d'excitation
- ajout de masses de blocage (Fig. 44)
- augmentation de l'amortissement
- isolation vibratoire de la source (suspension élastique)
- réflexion à l'emplacement des discontinuités (Fig. 45)

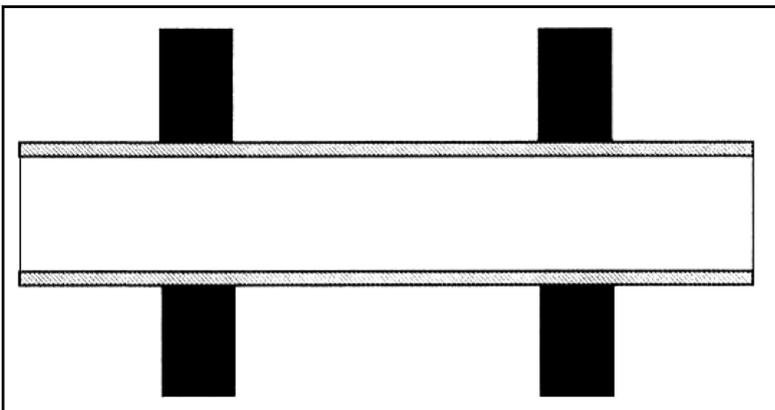


Fig. 44
Ajout de masses de blocage sur un tube d'acier

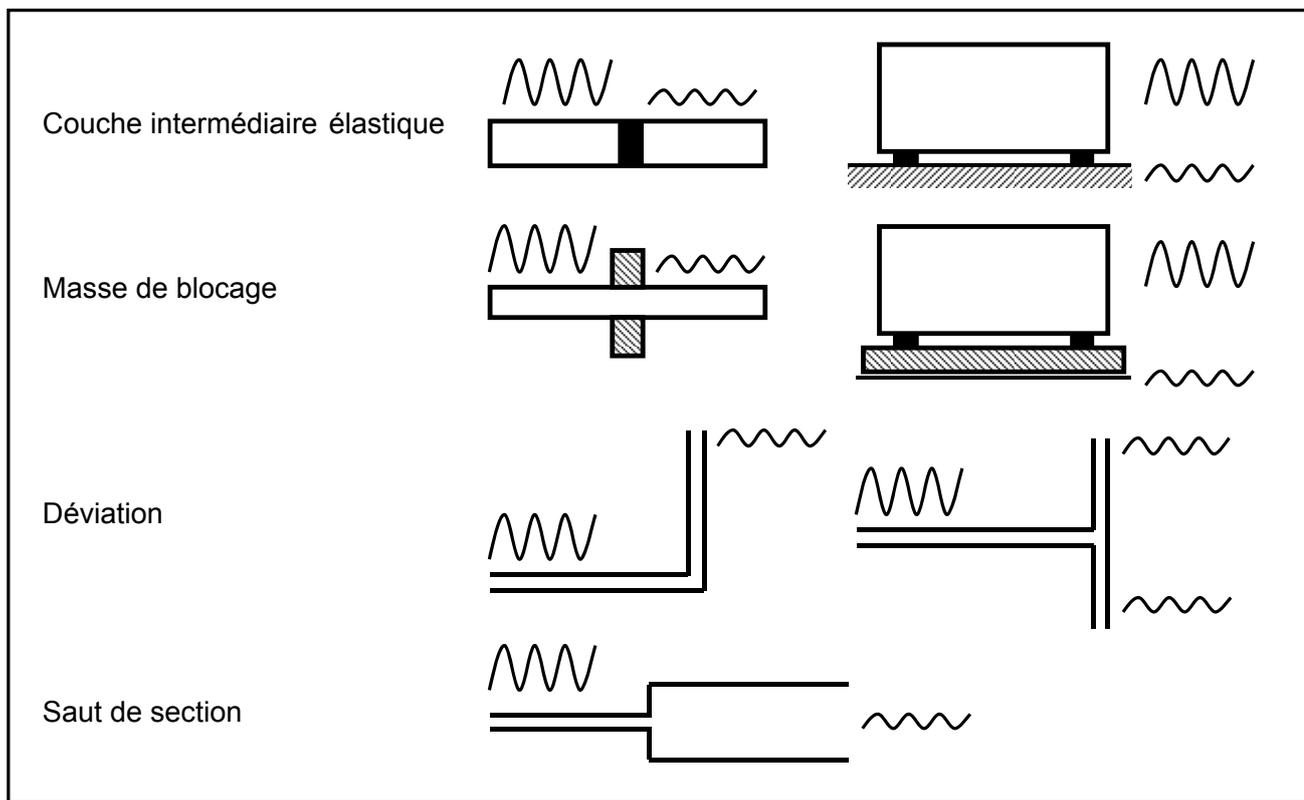


Fig. 45
Réflexion du son solidien sur des discontinuités de la structure

Dans la zone des hautes fréquences (avec une densité modale élevée), les mesures suivantes peuvent s'avérer efficaces :

- accroissement de la masse ou de la rigidité dans la zone de l'excitation
- isolation vibratoire de la source
- discontinuités (Fig. 45) en combinaison avec un amortissement complémentaire côté source

Dans le cas présent, la seule augmentation de l'amortissement n'est pas très efficace. Il est indiqué de traiter plus en détail deux des trois mesures citées précédemment :

- isolation vibratoire
- amortissement

Cette problématique et les solutions possibles correspondantes sont traitées en détail dans la publication Suva 66057 "Suspension élastique de machines".

6.3.2 Isolation vibratoire

Une isolation vibratoire est identique à l'introduction d'une rigidité locale, relativement réduite. elle peut se concrétiser par des amortisseurs de vibration, tels qu'éléments élastiques en caoutchouc, coussins pneumatiques, ressorts métalliques spiralés ou similaire (Fig. 46), de même que par une couche intermédiaire de caoutchouc, de liège ou d'un autre matériau souple.

Une isolation perceptible ne peut être réalisée que si le saut d'impédance, côté récepteur est suffisant, c'est-à-dire qu'à la condition que la structure côté récepteur, relativement à l'amortisseur de vibrations ou à la couche amortissante, soit suffisamment rigide ou lourde. L'augmentation de l'impédance du socle est tout aussi importante que la diminution de la rigidité de l'amortisseur de vibrations ou de la couche intermédiaire.

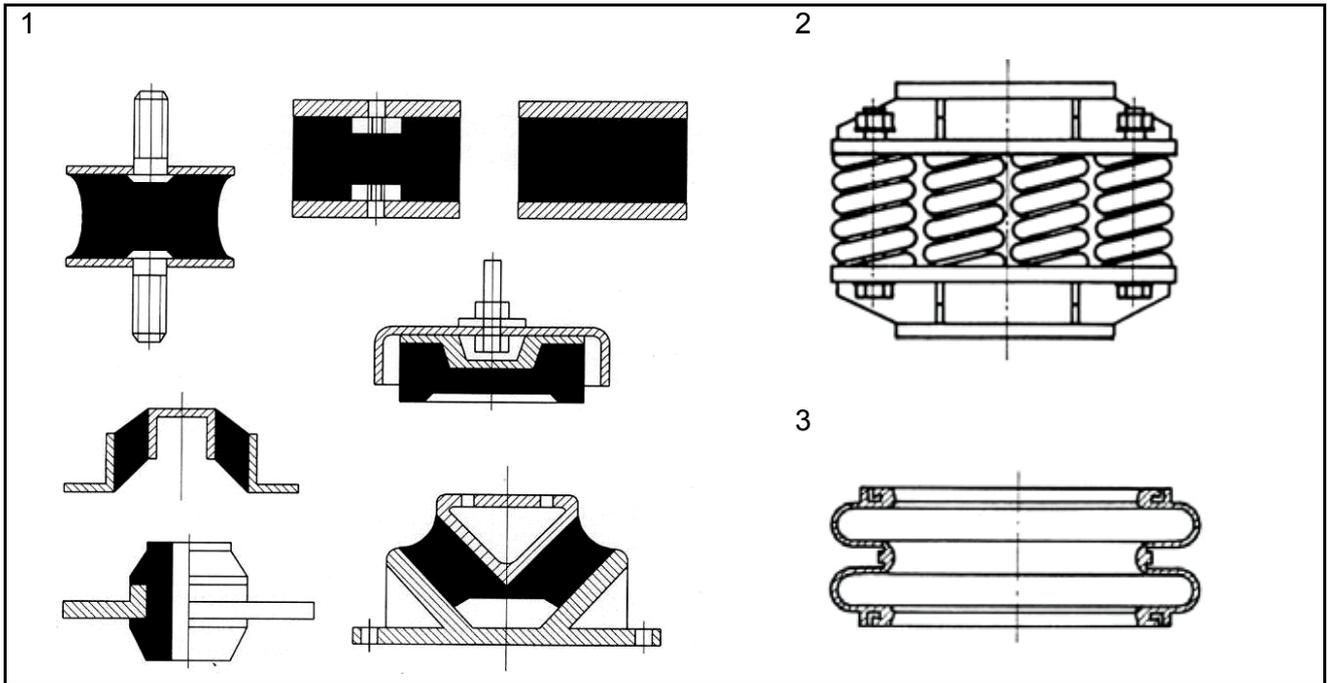


Fig. 46
Différents types d'éléments pour l'isolation des vibrations

1 Eléments en caoutchouc, 2 Elément à ressort d'acier , 3 Elément à coussin d'air

Il est possible d'isoler une vibration de diverses manières :

- isolation des vibrations de la source
- discontinuité le long d'une voie de transmission
- découplage acoustique entre la structure de l'habillage extérieur et le reste de la machine; une telle structure peut être un capotage insonorisant, dont la fonction est de réduire le rayonnement du son aérien par la structure proprement dite.

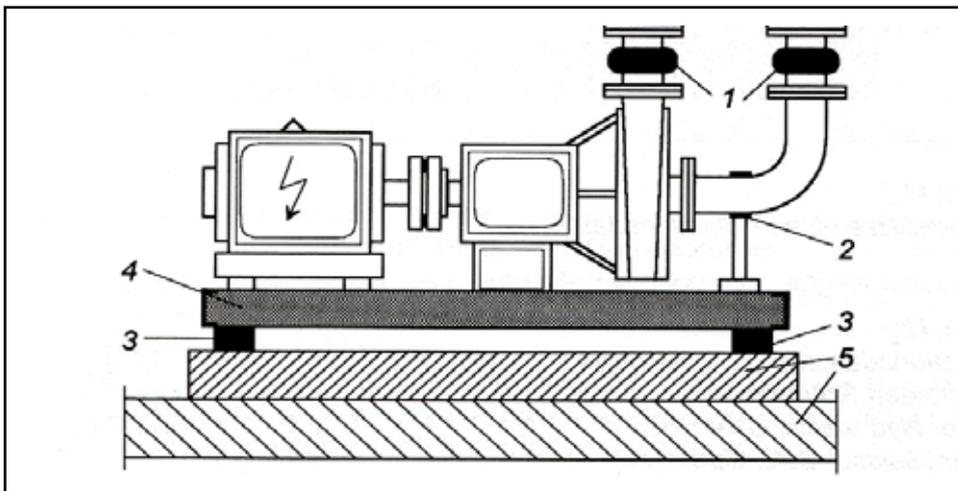


Fig. 47
Appui optimal d'une plaque de fondation

- 1 Liaisons élastiques entre la pompe et les conduits (compensateurs)
- 2 Fixations souples des conduits
- 3 Montage de la pompe sur des isolateurs de vibrations
- 4 Remplissage du chassis de la pompe avec du béton
- 5 Fondation

Règles de construction pour la réduction du son solidien par isolation des vibrations :

- utilisation d'éléments ou de couches intermédiaires suffisamment résilientes, avec mise en œuvre de mesures d'isolation sur les conduites entrant et sortant (Fig. 47)
- l'élongation des éléments élastiques doit être prise en compte lors de la conception de la machine et, le cas échéant, elle doit être calculée (Fig. 48)
- utilisation d'une structure de la base suffisamment rigide et lourde

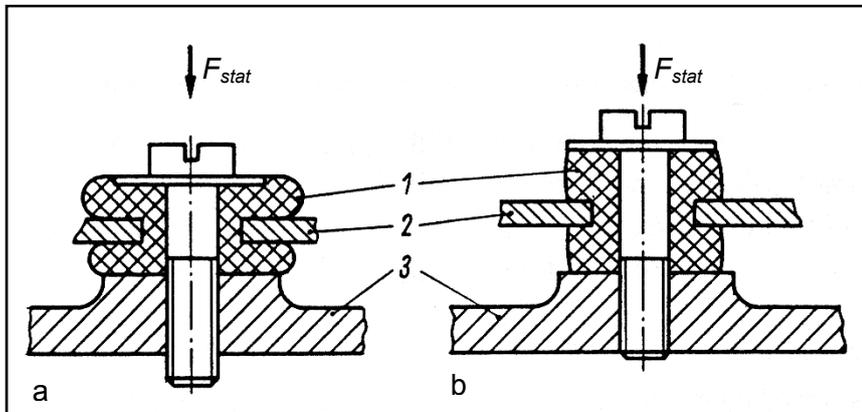


Fig. 48
Mise en œuvre correcte d'un élément en caoutchouc

- 1 Élément en caoutchouc 2 Excitateur 3 Structure de la machine
a Isolation vibratoire inefficace, à cause d'une contrainte statique trop grande
b Mise en œuvre correcte, pas de contrainte statique sur le caoutchouc

6.3.3 Amortissement

Une augmentation de l'amortissement a pour effet de convertir davantage d'énergie solidienne en chaleur. Ceci est particulièrement utile dans le domaine des fréquences propres discrètes liées à des discontinuités de la structure et lors d'une utilisation au point d'excitation (près de la source).

L'application d'un amortissement complémentaire n'est utile que si l'amortissement original de la structure est relativement faible, ce qui n'est pas courant. Par le fait de divers mécanismes, les structures de machines compliquées sont la plupart du temps relativement bien amorties sans mesures complémentaires.

On peut accroître l'amortissement d'une structure à l'aide des différentes mesures suivantes :

- application de couches amortissantes spécifiques (Fig. 49)
- plaques sandwich amorties au lieu de tôles isolées (tôles composites)
- doublages avec un nombre restreint de points de fixation (l'amortissement est généré par la circulation d'air dans la couche mince entre deux tôles)
- emploi de matériaux à fort amortissement interne
- amortisseurs accordés sous la forme de systèmes masse-ressort amortis

Ce dernier type d'amortissement n'est indiqué que s'il s'agit d'amortir un nombre limité de résonances.

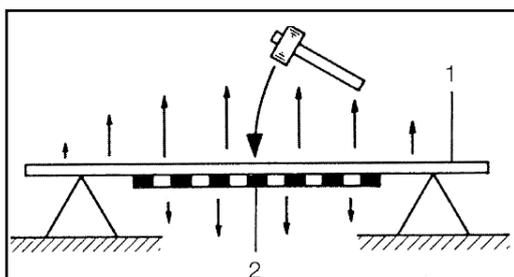


Fig. 49
Amortissement du son solidien

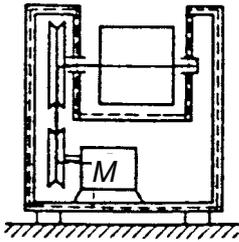
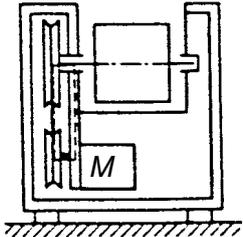
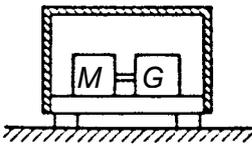
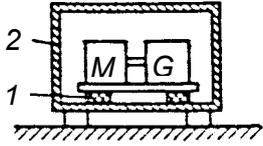
- 1 Tôle d'acier
2 Feuille ou revêtement antivibrant

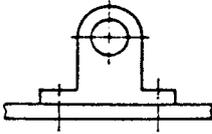
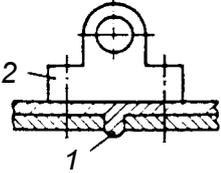
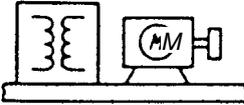
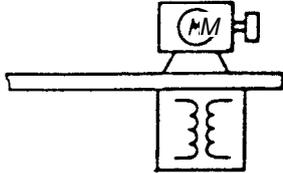
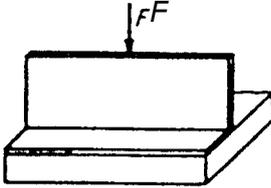
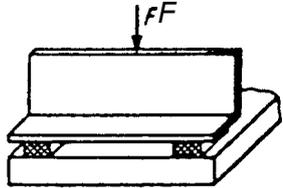
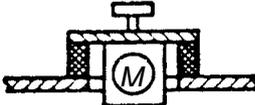
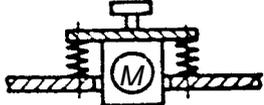
Règles de construction pour la réduction du son solidien par amortissement :

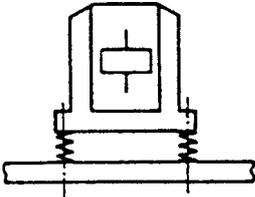
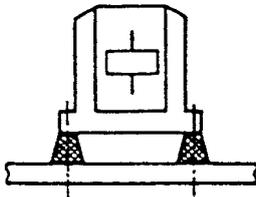
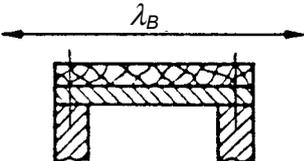
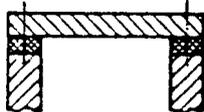
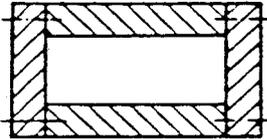
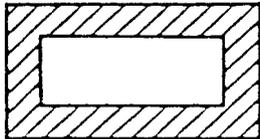
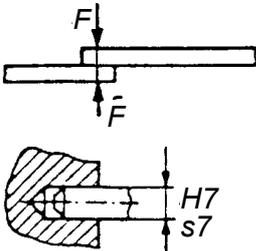
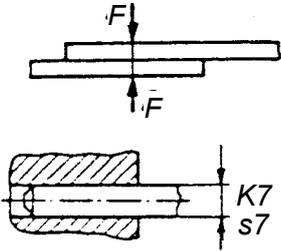
- amortissement complémentaire si l'amortissement originel est trop faible
- utilisation de l'amortissement pour réduire la transmission du son solidien dans la zone des fréquences propres discrètes
- utilisation de l'amortissement à proximité de la source d'excitation
- amortissement complémentaire des plaques minces (il est difficile d'amortir des structures rigides et lourdes).

6.3.4 Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles

Les mesures destinées à réduire la transmission et la propagation du son solidien (Tableau 9) ont pour objectif de limiter à un minimum le flux de son solidien dans les éléments concernés et de réduire le son solidien par l'amortissement et l'isolation ou à faire obstacle à sa propagation vers des surfaces rayonnantes. En l'occurrence, dans le domaine de la construction de machines et d'installation, l'isolation occupe une place plus importante que l'amortissement, parce qu'il existe souvent des dimensions, des matériaux, des éléments de jonction, etc. propres à ce domaine qui ont un effet d'amortissement optimum.

Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>1 <i>L'adhésion entre resp. éléments ou sous-groupes doit être conçue sous la forme d'une liaison directe et courte.</i></p> <p>L'adhésion (----) doit s'effectuer par l'intermédiaire de pièces compactes et rigides, de surface minimale, ne comprenant pas les surfaces extérieures de la machine. À cette condition, on limite déjà fortement une propagation de son solidien, comme p.ex. dans le cas illustré d'un entraînement d'une machine à laver à tambour.</p>		
<p>2 <i>Il faut réaliser une liaison aussi élastique que possible entre les pièces motrices et resp. le boîtier et les pieds de la machine, afin d'assurer une isolation du son solidien.</i></p> <p>L'isolation au son solidien 1 sur un sous-groupe moteur-transmission MG interrompt le flux de son solidien vers les surfaces rayonnantes constituées par le capot 2 et elle empêche l'excitation solidienne de la surface d'appui.</p>		

Règle (Explications)		Solution	
		pas bon	bon
3	<p><i>Pour fixer les sous-groupes produisant du son solidien, on choisira des points resp. à haute impédance et basse admittance (masse concentrée, forte rigidité).</i></p> <p>En choisissant des points de fixation à haute impédance, resp. à faible admittance, on crée une désadaptation pour le flux solidien et l'on diminue ainsi la vélocité sur la surface de transmission (p. ex. rigidification 1 et masse additionnelle 2).</p>		
4	<p><i>Les sous-groupes rigides et lourds, ne constituant pas en eux-mêmes des sources majeures de sons solidiens (p. ex. transformateurs, accumulateurs), doivent être placés à proximité immédiate des principaux excitateurs de son solidien.</i></p> <p>Utiliser des sous-groupes existants comme masses additionnelles constitue un moyen efficace de réduire le niveau de vélocité. Par contre, l'ajout de masses additionnelles, à seules fins acoustiques, n'est pas indiqué des points de vue du coût et de la valeur d'usage; la figure montre deux dispositions différentes d'un transformateur.</p>		
5	<p><i>Une introduction de vibration ponctuelle est préférable à une excitation en ligne.</i></p> <p>L'effet de cette mesure est lié à l'isolation du son solidien.</p> <p>Toutefois, des limitations existent pour des matériaux à faible amortissement par réduction de l'amortissement de la structure.</p>		
6	<p><i>Pour l'isolation de vibrations ou de son solidien dans le cas de bruits purement harmoniques, il est indiqué d'utiliser des ressorts d'acier.</i></p> <p>La fréquence de résonance du système masse-ressort ne doit pas dépasser 1/3 de la valeur de la fréquence à isoler la plus basse. Dans la pratique, une réduction du bruit solidien à partir de 6 dB est acceptable. Avec un dimensionnement adéquat, on peut atteindre des valeurs dépassant 20 dB. Une source de bruit harmonique peut être, p. ex. un moteur.</p>		

Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>7 Avec une excitation impulsionnelle, l'isolation au bruit solide sera réalisée au moyen d'éléments viscoélastiques (p. ex. caoutchouc).</p> <p>Le facteur de perte des éléments viscoélastiques se situe dans une plage favorable à l'amortissement de la résonance du système excitée obligatoirement par un phénomène impulsionnel (sur la fig.: montage d'un disjoncteur sur un tableau de commande),</p>		
<p>8 Avec une excitation solide, une augmentation de l'amortissement n'est indiquée que pour de grands éléments en tôle ($1 > \lambda_B$).</p> <p>Un amortissement supplémentaire n'est pratiquement d'aucune utilité si le facteur de perte existant se situe déjà dans la zone de l'optimum ou si les éléments sont relativement petits ($1 > \lambda_B$). Ces deux conditions sont, dans la construction de machines, la plupart du temps remplies (sur la fig.: mesures d'insonorisation sur la surface rayonnante d'un bâti).</p>		
<p>9 La liaison entre deux pièces devrait être réalisée sur de grandes surfaces et avec une faible pression superficielle moyenne.</p> <p>Des ajustages serrés, inutilement surdimensionnés, doivent donc être évités, car ils entraînent une diminution du facteur de perte de l'assemblage.</p>		
<p>10 Les assemblages adhérents sont préférables aux assemblages transmettant les chocs.</p> <p>Les sous-groupes rivetés ou vissés offrent un pouvoir amortissant optimum. Ils sont donc meilleurs que les structures soudées ou coulées, pour lesquelles l'augmentation de l'amortissement nécessaire à réaliser à posteriori accroîtrait le travail de fabrication.</p>		

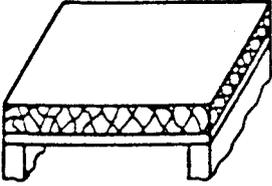
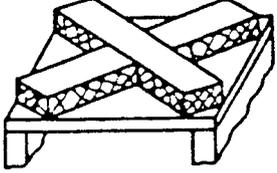
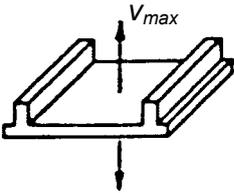
Règle (Explications)	Solution	
	pas bon	bon
<p>11 <i>Les mesures d'amortissement appliquées aux endroits d'amplitude vibratoire maximum ont la meilleure efficacité.</i></p> <p>Les éléments de machines ou d'installations en nappe, soumis au son solidien (p. ex. tôles de revêtement, entonnoirs, etc.) ne devraient être traités avec des matériaux amortissants spécifiques qu'aux endroits présentant de fortes amplitudes vibratoires. Une application de traitement amortissant en pleine surface n'apporte rien de plus et elle est coûteuse (Fig.: deux possibilités d'amortissement d'une tôle, avec pratiquement le même résultat).</p>		
<p>12 <i>L'efficacité de l'amortissement du son solidien des tôles doubles est voisine de celle des matières plastiques.</i></p> <p>Le facteur de perte des tôles doubles se situe, à cause du déplacement de l'air entre les tôles, dans la même fourchette que le facteur de perte des matières plastiques, soit dans une zone optimum. Les tôles doubles s'utilisent dans les applications où l'emploi de plastiques est impossible (p. ex. avec des hautes températures).</p>		
<p>13 <i>L'application de raidissements, tels que rainurage asymétrique, moulures ou surfaces courbes, permet de réduire la valeur moyenne de la vitesse.</i></p> <p>Une telle mesure peut être acoustiquement favorable dans le cas de structures excitées par une force, malgré l'augmentation du facteur de rayonnement (voir Règle 3 du Tableau 10). Avec plusieurs nervures parallèles, il faut veiller à ce que leurs distances respectives varient le plus possible. L'application, même localisée, de raidissements, dans le but de supprimer les pointes de niveau de la vitesse, demeure limitée.</p>		

Tableau 9
Règles pour la réduction de la transmission et du rayonnement du bruit solidien

7 Réduction du rayonnement acoustique

7.1 Rayonnement de son aérien par les ouvertures

Le son aérien peut être rayonné au niveau des orifices d'entrée ou de sortie, p. ex. par un capot insonorisé ou à l'extrémité d'une conduite. Les bruits présentent une directivité particulière. Normalement, les niveaux les plus élevés se produisent le long de l'axe d'un tube. Dans les espaces ouverts ou en champ libre, il est possible de modifier les ouvertures de manière à réduire le rayonnement acoustique dans une direction déterminée.

Règles de construction pour la réduction du rayonnement du son aérien :

- Disposition des ouvertures du côté favorable (directivité du rayonnement acoustique)
- Utilisation de silencieux ou d'écrans devant l'ouverture

7.2 Rayonnement de son solidien

7.2.1 Généralités

Le rayonnement acoustique de l'enveloppe extérieure d'une machine est fonction de l'étendue de la surface, de la forme, de la rigidité, de la masse et de l'amortissement interne de la structure en question. Du point de vue du rayonnement acoustique, il est préférable réaliser les parties de la machine soumises à des charges aussi compactes que possible, car des dimensions réduites, une rigidité et une masse élevées réduisent le rayonnement acoustique.

Pour diminuer le rayonnement acoustique, il faut réduire la surface rayonnante ou modifier la rigidité, la masse ou l'amortissement de l'élément de la structure concerné.

Le rayonnement acoustique d'une surface peut également être réduit en utilisant des plaques à faible facteur de rayonnement. Une autre possibilité consiste à utiliser des doublages souples, composés d'une couche intermédiaire élastique et d'une plaque mince. Lorsqu'on obtient par ce moyen une réduction du rayonnement du son solidien, on peut aussi parler d'amortissement du son solidien.

Règles de construction pour la réduction du rayonnement du son solidien :

- réduction de la surface rayonnante
- emploi de revêtements à faible facteur de rayonnement dans les fréquences dominantes
 - plaques minces au lieu de plaques épaisses (attention, quand le revêtement est excité par une force)
 - plaques perforées
 - revêtements avec couches amortissantes

7.2.2 Solutions de principe pour la mise en oeuvre des règles

Les éléments de construction en surfaces sont, à cause de leur faible impédance mécanique, facilement excités par le son solidien. Pour obtenir une réduction du bruit, on peut agir sur la vitesse et le facteur de rayonnement. Pour réduire la vitesse, on se référera aux règles des chapitres 3 et 4. Les règles du Tableau 10 montrent comment on peut réduire le facteur de rayonnement en modifiant la configuration des surfaces.

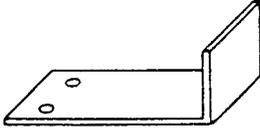
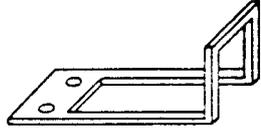
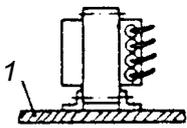
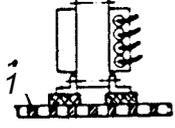
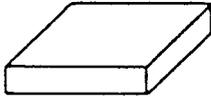
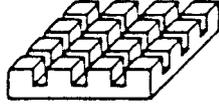
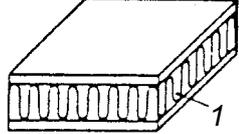
Règle (Explications)		Solution	
		pas bon	bon
1	<p><i>La surface des éléments devrait être la plus petite possible. Il en résulte une réduction du facteur de rayonnement, particulièrement aux basses fréquences.</i></p> <p>L'effet de diminution du bruit repose sur l'utilisation du court-circuit acoustique (égalisation de la pression entre les faces avant et arrière).</p>		
2	<p><i>Une diminution sensible du rayonnement des grandes surfaces excitées par le son solide s'obtient par des percements de celle-ci.</i></p> <p>La réduction du rayonnement acoustique résulte, comme pour la règle 1, de l'effet de court-circuit acoustique. Il faut prévoir une proportion d'environ 20% de surface perforée (p. ex. plaque de base 1). Si ces éléments doivent servir à l'isolation au son aérien, cette mesure n'est pas applicable.</p>		
3	<p><i>Afin de réduire le facteur de rayonnement par élévation de la fréquence critique des ondes de flexion, on optera pour des éléments souples et lourds.</i></p> <p>Ceci s'applique particulièrement aux structures excitées par la vitesse (p. ex. parties du bâti) et peut être réalisé par application de revêtements souples et lourds ou par un rainurage des plaques,</p>		
4	<p><i>En appliquant un matériau phonoabsorbant 1, combiné avec une couche phonoisolante (p. ex. feuille lourde), on réduit le son aérien rayonné directement à la source.</i></p> <p>Il s'agit là d'un début de capotage, de sorte que les lois de l'isolation et de l'absorption acoustiques s'appliquent par principe.</p>		

Tableau 10
Règles pour la réduction du rayonnement acoustique

7.3 Exemples

7.3.1 Apport de matériaux

Dans le cas de l'apport de matériaux, il est souvent possible d'obtenir des réductions de niveau d'impressionnantes en appliquant judicieusement deux stratégies simples :

1. Minimiser les hauteurs de chute aux points d'alimentation des matériaux
2. Amortir les surfaces d'impact

Ces deux points s'appliquent également aux points d'alimentation de matériaux à l'intérieur de machines et d'installations fermées.

L'exemple de la Fig. 50 montre l'effet d'un amortissement des surfaces d'impact.

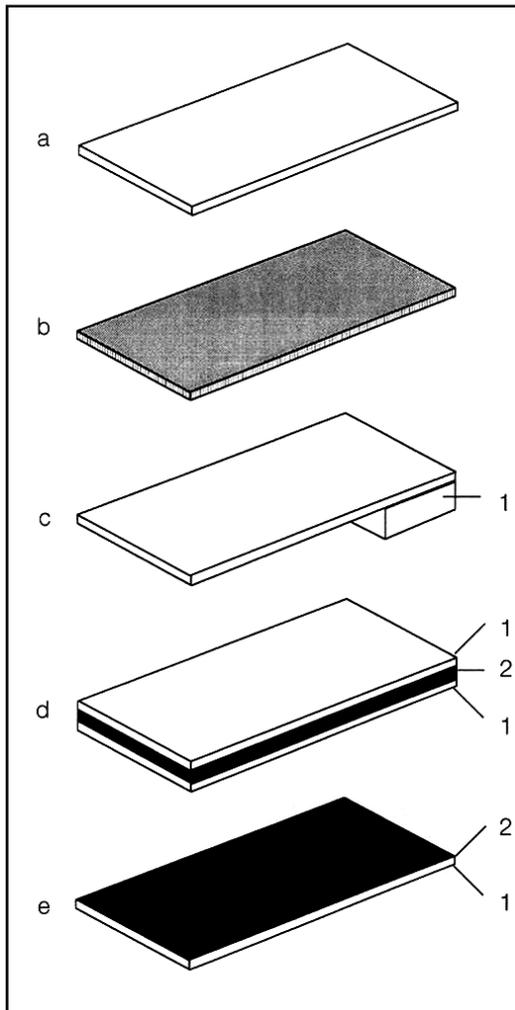


Fig. 50

Réduction de niveau sonore résultant de différentes mesures appliquées à des surfaces d'impact (mesurages avec une bille d'acier, avec une hauteur de chute déterminée).

- 1 tôle d'acier
- 2 caoutchouc

- a tôle d'acier
- b tôle perforée, réduction 8 dB(A)
- c masse additionnelle sous le point d'impact, réduction 10 dB(A)
- d tôle sandwich, réduction 15 dB(A)
- e tôle d'acier avec revêtement de caoutchouc, réduction 23 dB(A)

Les couches antivibratiles peuvent présenter différentes structures (Fig. 51) :

Monocouches en matériaux viscoélastiques (p. ex. matériaux synthétiques spéciaux, caoutchouc, bitumes) avec fort amortissement interne, appliqués en épaisseur suffisante (structures avec parois minces: au moins le double de l'épaisseur de la paroi).

Multicouches, appelés systèmes sandwich ou composites, constitués de matériaux à fort amortissement, avec tôles de bardage (essentiellement pour les structures à parois épaisses).

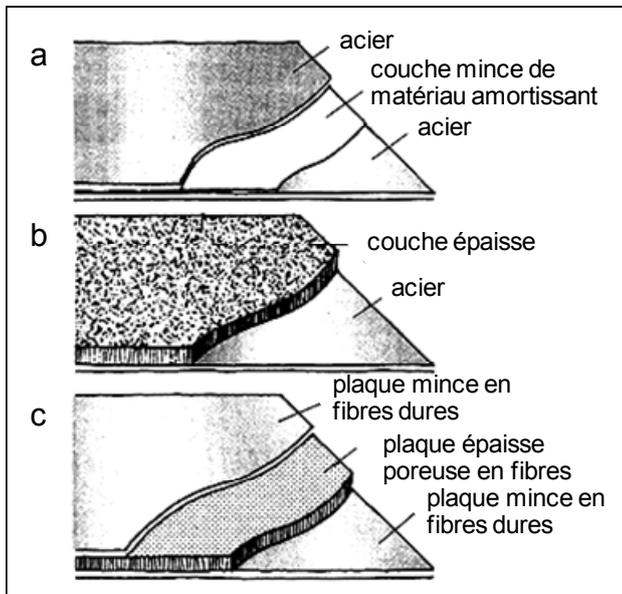


Fig. 51
Couches antivibratiles

La structure offre un amortissement très bon, les structures b et c un bon amortissement.

Tôles perforées

Le rayonnement de tôles excitées par du son solide peut être notablement réduit par l'utilisation de tôle perforée ou de métal déployé. L'emploi de tôle perforée est une mesure de réduction du bruit hautement efficace et économique. Bien entendu, la tôle perforée n'est pas indiquée dans le cas d'ouvertures sur l'intérieur de la machine qui laissent sortir un bruit important, car la fonction d'isolation nécessaire ne peut être remplie que par des couvercles massifs. De même, avec des projections d'huile, les tôles perforées sont inappropriées. La proportion de perforation doit être d'au moins 30 %.

Dans le cas des presses, les sources principales de bruit sont souvent le couvercle sur le volant et l'entraînement par courroie. Normalement, ce couvercle est réalisé en tôle d'acier rigide. Le rayonnement acoustique peut être sensiblement réduit par l'utilisation de tôle perforée ou de treillis métallique (Fig. 52).

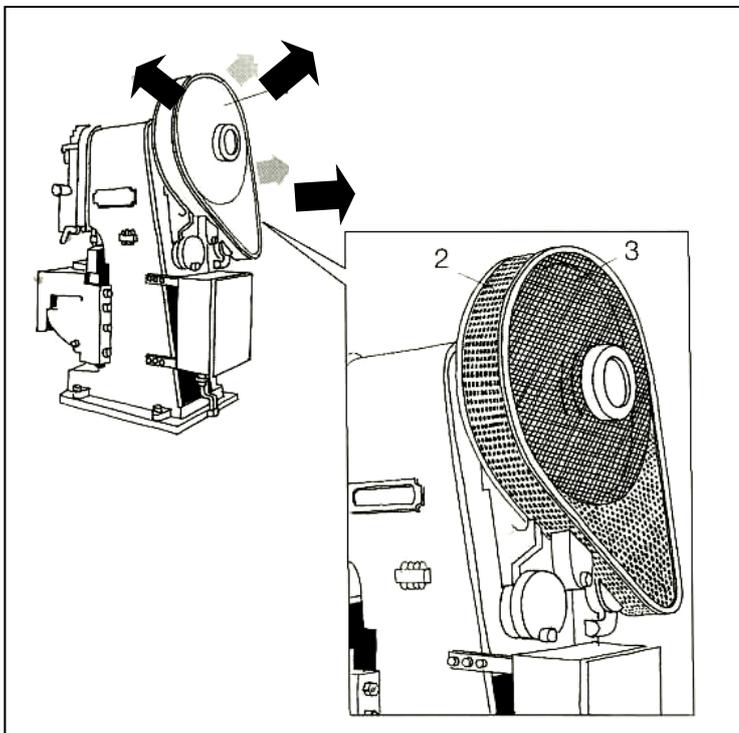


Fig. 52

Le couvercle en tôle sur le volant et l'entraînement par courroie d'une presse (1) peut être remplacé par une tôle perforée (2) et un treillis (3).

7.3.2 Bâti de machine

Aux fréquences élevées, on peut également réaliser une augmentation de l'impédance dans la zone d'excitation par des rigidifications. Cela signifie que le bâti est moins excité et que, par conséquent, il rayonne moins de bruit. De telles rigidifications n'ont cependant pas un effet insonorisant s'étendant à toute la gamme de fréquences. Il peut même en résulter une élévation de niveau aux fréquences basses et moyennes. Ceci est à mettre principalement sur le compte du découplage élastique, c.-à-d. que le son solidien de basse fréquence se transmet directement à la structure de la machine.

À la Fig. 53, l'exemple d'un engrenage illustre clairement quel peut être l'effet d'un bâti conçu judicieusement du point de vue de l'acoustique des machines. La boîte de vitesses est normalement conçue de telle manière que l'évacuation des forces et de la chaleur se fasse de manière optimale. On donne alors la préférence à des boîtiers lisses. Ceux-ci sont excités par les coussinets de paliers. Dans le cas présent, on a mis en place, aux points d'entrée des forces dans le bâti dans la zone des coussinets de paliers, des nervurages et des masses additionnelles concentrées en des endroits déterminés. Cette mesure a permis de réduire le niveau de puissance acoustique de 94 à 78 dB(A).

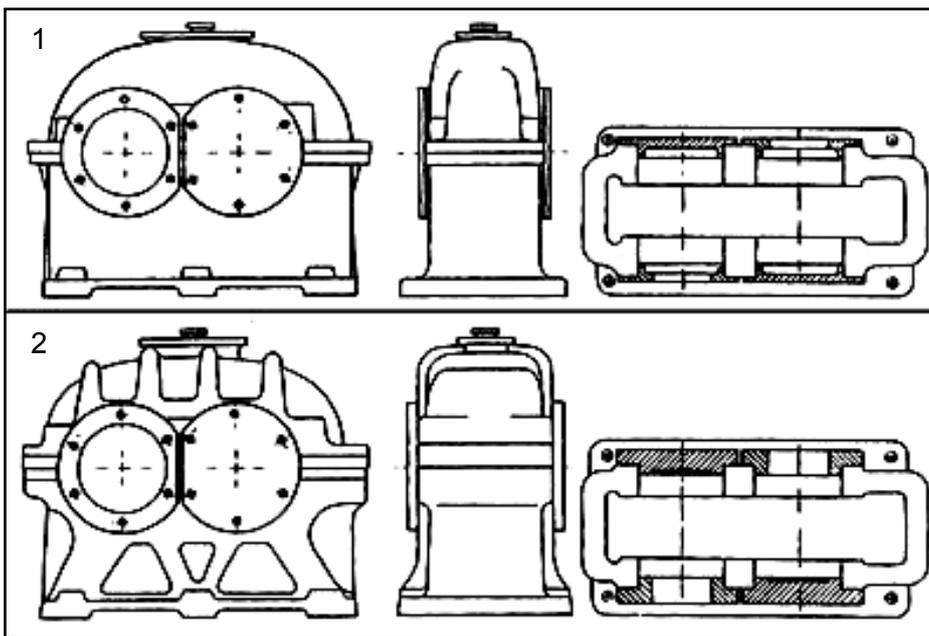


Fig. 53
Bâti de transmission

- 1 Boîte de vitesse conventionnelle
- 2 Boîte conçue selon les impératifs de l'acoustique des machines

8 Exigences acoustiques pour les différents composants

8.1 Introduction

Une machine, ou une installation, est souvent constituée d'une multitude de composants qui, pour des raisons de coût, sont achetés chez des sous-traitants. Un exemple frappant est concrétisé par l'industrie automobile qui ne fabrique dans ses usines pratiquement plus que les carrosseries et les moteurs (cela s'applique tant aux voitures particulières, qu'aux poids lourds). Les agrégats secondaires sont souvent livrés "just-in-time" par des sous-traitants. Des exigences sévères en matière de respect de valeurs limites acoustiques sont souvent imposées, comme, par exemple :

- agrégats secondaires du moteur (alternateur, pompe à eau, refroidissement, etc.)
- système d'échappement (y compris catalyseur)
- transmission
- servo-moteurs pour la direction, les freins, la correction d'assiette
- climatisation
- moteurs pour la commande des fenêtres, les essuie-glaces et le mouvement des sièges

Les fabricants de machines-outils dépendent également toujours plus de fournisseurs qui offrent, par exemple, les composants spéciaux suivants :

- moteurs électriques
- pompes et moteurs hydrauliques
- moteurs linéaires
- pompes pour systèmes de refroidissement et de lubrification
- ventilateurs
- systèmes pneumatiques
- unités de commande électronique

Les recommandations suivantes sont utiles au constructeur lors de la planification acoustique.

8.2 Principe

Pratiquement chaque nouvelle machine ou installation a son précurseur. Celui-ci peut être bruyant, avoir une puissance nettement inférieure ou, à la rigueur, être plus cher. Mais la plupart du temps le bruit produit est connu. Il est important que la thématique du bruit soit prise en compte dans le débat concernant un nouveau modèle. Quelles sont les réactions de la clientèle? La machine actuelle est-elle trop bruyante ou le bruit émis correspond-t-il en moyenne à celui des produits de la concurrence?

C'est à ce moment qu'il faut fixer un *objectif acoustique* pour le projet. Selon le type d'installation ou de machine, on opère dans un spectre très large. Si l'on fabrique des équipements de cuisine, on se trouve dans la zone de niveaux de puissance acoustique de l'ordre de 40 à 50 dB(A). Pour un constructeur de machines-outils modernes à commande CNC, un niveau d'émission au poste de travail de 70 à 75 dB(A) constitue un but réaliste, Mais lorsqu'il s'agit de tronçonneuses à chaîne ou de marteaux piqueurs pour le bâtiment, il devient illusoire de cibler une valeur de 100 dB(A) au poste de travail.

Un autre problème, auquel le concepteur est confronté, est l'augmentation de la puissance. Les nouvelles machines et les nouvelles installations doivent être plus rapides et plus puissantes que leurs prédécesseurs, ceci s'appliquant aussi à tous les agrégats secondaires. Souvent, le modèle précédent a été insonorisé à grands frais. Or, par exemple, si l'on double la vitesse d'un nouveau modèle, le bruit sera augmenté de 6 à 8 dB. Il est indispensable de réduire à nouveau ce bruit supplémentaire!

8.3 Exigences pour les composants individuels

Il n'est pas possible de fixer une exigence acoustique générale s'appliquant aux composants individuels. Il est essentiel de savoir où l'agrégat secondaire sera installé et combien d'unités seront utilisées. Deux exemples illustrent cette dispersion importante :

1. Si une pompe à eau de refroidissement est placée dans le socle d'une machine-outil, elle est isolée de l'extérieur. En pareil cas, il devrait suffire de limiter le niveau de puissance acoustique de la pompe à quelque 10 dB(A) en dessous de celui de l'ensemble de la machine.
2. Lorsque, sur une grande installation, pour le tri des paquets, il faut 100 moteurs électriques pour l'entraînement des rubans transporteurs, l'exigence applicable au niveau de puissance acoustique des moteurs individuels ne doit pas être fixée trop haut, car, théoriquement, le bruit produit par 100 moteurs est de 20 dB(A) supérieur au bruit d'un moteur.

Il existe de grandes installations pour lesquelles la somme des bruits provenant des agrégats secondaires est supérieur au bruit de la machine elle-même. Parmi les exemples connus, on citera les machines à papier ou les rotatives d'impression pour lesquelles le bruit dominant provient d'une multitude de ventilateurs, de moteurs, de dispositifs pneumatiques, etc.

Exigence générale

En fonctionnement normal, les agrégats secondaires ne doivent pas augmenter le bruit du procédé principal.

Dans le cas de machines petites ou moyennes, ceci implique que le niveau de puissance acoustique des agrégats secondaires doit être d'environ 10 à 15 dB(A) inférieur à celui du procédé principal. Des analyses fréquentielles contribueront à éviter que des pointes tonales (bruits contenant des sons purs) fassent apparaître une machine comme subjectivement bruyante.

Le paragraphe 9.5 présente une méthode permettant d'estimer l'effet acoustique des divers composants d'une machine sur le bruit global.

Tous les efforts visant à obtenir un produit peu bruyant ont des limites imposées par la technique. En comparant des produits semblables, avec les mêmes propriétés, il est possible de baliser les limites de l'insonorisation. Dans ce contexte, on parle aussi d'état de la technique d'insonorisation. Au chapitre 10, il est fait état d'autres réflexions, s'appliquant aussi aux agrégats secondaires, qui concernent le thème des "limites des possibilités techniques".

La formulation d'exigences concrètes est traitée en détail dans la publication "Mesurage des émissions acoustiques produites par les machines" (N° de commande 66027.f).

9 Essais sur prototype

9.1 Généralités

À partir de mesurages sur un prototype, on peut déterminer les principales sources de bruit et les mesures spécifiques entraînant des modifications constructives dans les phases d'élaboration et de conception (voir Fig. 10). Le respect des valeurs limites, figurant sur la liste des exigences (voir Annexe B), peut être contrôlé par des mesurages.

9.2 Détermination des sources de bruit

Dans un premier temps, on procède à une investigation sur la base de mesurages avec pour but :

- Identifier les sources de bruit les plus importantes et les classer selon les mécanismes de génération du bruit
- Déterminer les voies de transmission du son de la source au récepteur ou à travers la structure, jusqu'aux surfaces rayonnantes
- Identifier les parties de la machine qui rayonnent le son (ouvertures, plaques)

Généralement, l'analyse commence avec des méthodes relativement simples (p. ex. modélisation du flux acoustique selon chiffre 4.1) afin de pouvoir procéder à une identification grossière des sources de bruit et à une classification spatiale, temporelle et spectrale. Des analyses plus poussées, liées à la détermination des sources et des voies de transmission, ne seront effectuées que pour des éléments particuliers.

La norme SN EN ISO 11688-2 présente une vaste compilation des méthodes de mesure pour l'analyse acoustique de prototypes. Une partie de ces informations est exposée ci-après dans une forme abrégée (Tableau 11 à Tableau 13).

N°	Désignation	Description	Remarque
1	Analyse spectrale	Analyse par 1/3 octave ou en bande étroite en un point arbitraire, dans le champ éloigné de la machine. Environnement de mesure arbitraire. (Fig. 54). Un mesurage en champ proche avec un microphone à sonde peut également fournir des résultats pertinents.	Si l'on connaît la structure de la machine, l'analyse fréquentielle peut indiquer quelles sources propres à la machine sont prédominantes.
2	Évolution temporelle du niveau de pression acoustique rayonné	Mesurage de l'évolution temporelle du niveau de pression acoustique en un point arbitraire. L'environnement de mesure n'est pas pris en compte.	En complément à l'analyse fréquentielle, l'évolution temporelle peut fournir des informations complémentaires sur le mécanisme d'excitation.
3	Débranchement de sources partielles	On peut faire marcher brièvement une machine, alors que certaines sources de bruit sont débranchées.	L'influence de sources partielles peut être mise en évidence par une analyse fréquentielle en champ lointain.
4	Masquage, isolation ou débranchement successifs de sources partielles sur la machine	Souvent, la transmission du son en provenance d'une source partielle liée à la machine peut être diminuée.	Une source partielle de son aérien peut être coupée, ou alors captée provisoirement. Une source partielle de son solidien peut être montée sur des appuis élastiques improvisés.

N°	Désignation	Description	Remarque
5	Variation des paramètres de fonctionnement	Variation de régime, de vitesse, de puissance ou de charge. On mesure le niveau de pression acoustique rayonné en fonction du temps ou de la fréquence dans un environnement de mesure arbitraire.	Méthode simple, largement répandue,
6	Méthode de substitution directe	Remplacement d'une source partielle par une source ayant des propriétés connues.	Méthode de mesure de l'intensité équivalente d'une source de son aérien ou solidien sur une machine.
7	Méthode de substitution inversée	Inversion de la méthode 6. On place un haut-parleur au point de réception et l'on installe un micro ou un accéléromètre à l'emplacement de la source liée à la machine.	Alternative intéressante quand une source de remplacement ne peut pas être substituée à la source liée à la machine.
8	Intensimétrie	Détermination des puissances acoustiques partielles provenant des sources potentielles liées à la machine.	Indiqué pour déterminer les contributions directes de certains composants de la machine au son aérien.

Tableau 11
Méthodologie pour l'analyse des sources liées à la machine

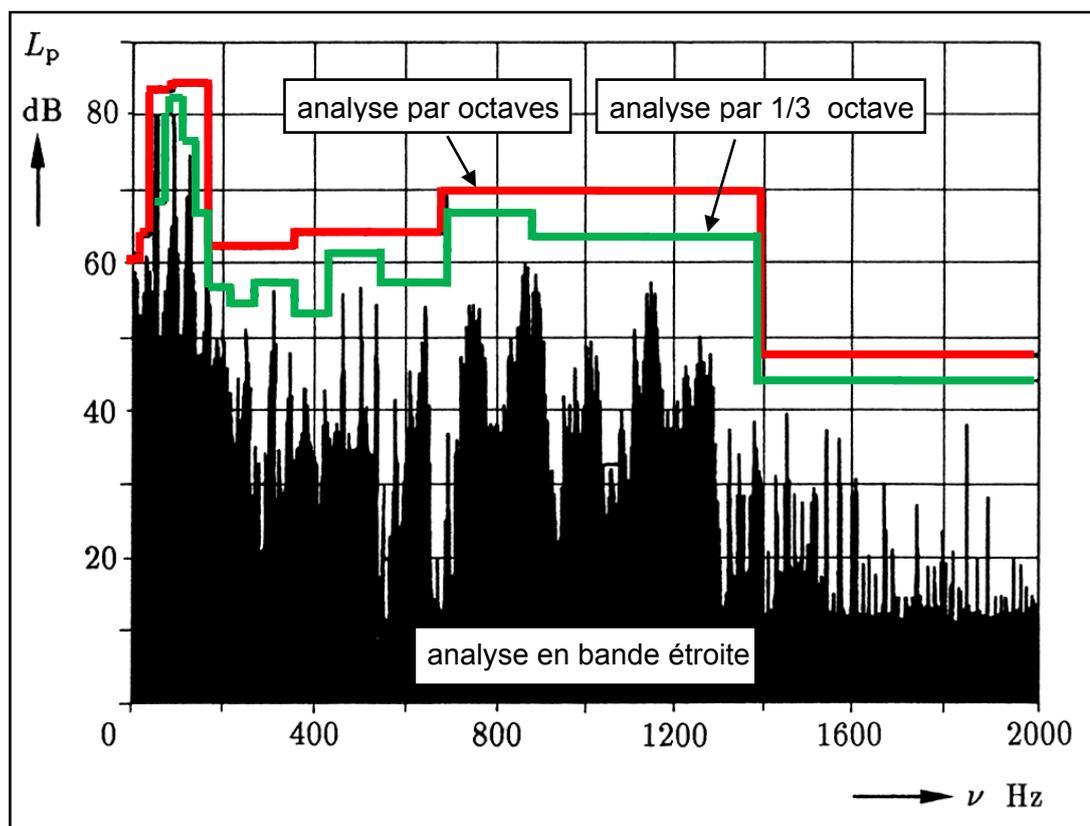


Fig. 54
Contenu d'information différent des analyses en bandes d'octave, de 1/3 octave et en bande étroite
Étant donné que l'analyse en bande étroite représente 400 raies spectrales de même largeur, selon une échelle linéaire, les analyses en octave et 1/3 octave ont un aspect assez inhabituel.

N°	Désignation	Description	Remarque
1	Mesurage direct de la fonction de transfert	On dispose une source de remplacement à l'emplacement de la source liée à la machine et l'on mesure les accélérations sur les surfaces confinant la machine ou le niveau de pression acoustique en champ lointain.	Méthode coûteuse.
2	Mesurage inversé de la fonction de transfert	Inversion de la méthode 1. Les emplacements de la source et du récepteur sont inversés.	Utile, lorsque aucune source de remplacement ne peut être disposée dans la machine.
3	Interruptions successives de voies de transmission dans la machine	Introduction d'éléments isolants et amortissants sur les diverses voies de transmission,	Ce procédé permet de détecter les voies de transmission majeures.
4	Mesurage du flux de puissance	Utilisation de techniques spéciales pour déterminer le flux de puissance du son aérien, du son dans les liquides et du son solidien le long d'un chemin déterminé.	Méthode compliquée, nécessitant des compétences particulières et des instruments spéciaux.

Tableau 12
 Méthodologie pour l'analyse de la transmission du son aérien à l'intérieur de la machine.

N°	Désignation	Description	Remarque
1	Masquage sélectif de pièces rayonnant du son aérien	Masquage sélectif d'éléments de machine rayonnants et mesurage du niveau de pression acoustique rayonné.	Utile à la détermination des contributions directes de différents éléments au bruit aérien global émis par la machine.
2	Intensimétrie	Exploration ponctuelle de la surface de la machine au moyen d'une sonde intensimétrique.	Idem remarque précédente.
3	Mesurages en champ proche	Mesurage du niveau de pression acoustique dans le voisinage des surfaces rayonnantes,	Facile à réaliser, mais moins précis que l'intensimétrie.

Tableau 13
 Méthodologie pour l'analyse du rayonnement du son aérien.

Les méthodes de mesure sont, en partie, accordés à l'analyse du modèle de génération du bruit (voir Fig. 12) :

- sources de bruit intérieures
- voies de transmission du son à l'intérieur de la machine
- éléments de la machine rayonnant du son

Certaines méthodes de mesure ne sont applicables que si les paramètres de fonctionnement de la machine (p. ex. régime) peuvent être modifiés ou si des modifications constructives peuvent être apportées (déconnexion ou masquages partiels, modification de la suspension élastique, remplacement de sources partielles, etc.).

La majorité des méthodes d'essai fournissent des données qualitatives décrivant le comportement acoustique du prototype de la machine et apportant les bases nécessaires à des analyses comparatives (séparation des diverses origines du bruit, détermination des voies principales de transmission du bruit). Certaines méthodes permettent d'estimer quantitativement la puissance acoustique rayonnée par certaines sources et/ou un élément de la carcasse de la machine.

Dans ce contexte, il n'est pas fait état de techniques particulières de prévision acoustique, comme l'analyse modale. De tels procédés impliquent l'utilisation d'applications informatiques spécialisées, utilisées surtout par des spécialistes.

9.3 Évaluation des sources de bruit

On procède à une évaluation des sources de bruit identifiées en établissant un classement des sources majeures. À cet effet, on dresse une liste des sources de bruit, avec leurs caractéristiques principales (niveau de puissance acoustique, niveau de pression acoustique au point de référence, évolution temporelle, spectre fréquentiel, emplacement dans la machine). Une autre possibilité d'évaluer les sources dominantes réside dans l'estimation de l'efficacité, telle qu'elle est présentée au point 9.5.

L'établissement d'un classement des sources de bruit peut s'effectuer à partir de mesurages sur prototype ou sur les bases des valeurs d'émission acoustique des éléments constitutifs de l'objet. L'établissement de ce classement est nécessaire non seulement dans l'optique d'une planification des mesures d'insonorisation à entreprendre, mais encore pour tracer toutes les modifications effectuées et leur effet sur le bruit global émis par la machine.

Lors de la planification de mesures d'insonorisation sur des sources partielles, visant à réduire le niveau sonore global, il y a lieu de prendre en compte un certain nombre de particularités :

Il n'est pas nécessaire d'éliminer complètement le bruit d'une source dominante, car le bruit global est alors déterminé par les sources partielles résiduelles. En général, il suffit de ramener le bruit de la source dominante à une valeur d'environ 5 dB inférieure au niveau du bruit résiduel. D'autres interventions sur cette source partielle n'auront qu'un effet minime sur le niveau global de bruit.

Lorsque plusieurs sources partielles présentent des émissions de bruit sensiblement égales, il est nécessaire d'insonoriser chacune de ces sources. La diminution du bruit de sources isolées n'a qu'un effet minime sur le niveau global de bruit.

Ces règles ne s'appliquent qu'à des sources partielles incohérentes, c.-à-d. des sources qui ne sont pas excitées par le même mécanisme d'excitation.

9.4 Modifications du prototype

Le but des mesures d'insonorisation est de réduire l'émission de bruit dans l'ordre établi dans le cadre de la phase d'évaluation. Les sources partielles se composent d'une source interne, de voies de transmission et d'éléments de machine rayonnant le son; or, on peut agir sur chacune de ces trois composantes.

Dans le cas de certaines sources partielles, il peut parfois se révéler nécessaire d'étudier plus en détail les interactions entre excitation, transmission et rayonnement (bilan partiel), afin de quantifier les sources internes et de mettre en œuvre des mesures touchant les trois niveaux de la génération du bruit. Dans ce contexte, les règles de construction de l'acoustique des machines sont applicables.

D'une manière générale, l'efficacité des mesures d'insonorisation est la meilleure, si celles-ci sont d'abord appliquées à proximité de la source de bruit interne.

En principe, on opérera dans l'ordre suivant :

1. Sources internes
2. Structure transmettrice
3. Éléments rayonnant le bruit

Dans la pratique, on peut établir une relation entre les mesures dictées par la technique avec celles issues de considérations économiques.

Le classement des problèmes acoustiques essentiels doit être tenu à jour pour tenir compte des mesures d'insonorisation qui ont été réalisées.

9.5 Estimation de l'efficacité

Les différents systèmes d'estimation de l'efficacité des mesures d'insonorisation décrits jusqu'ici ne fournissent pas de valeurs chiffrées de la réduction du bruit. C'est pourquoi nous présentons ci-après une ébauche de méthode permettant d'obtenir des valeurs concrètes.

La méthode présentée ci-dessous est à utiliser avec précaution, car elle contient certaines imprécisions. Le procédé se base sur l'effet des modifications acoustiques apportées à la machine.

Méthode :

- On divise la machine ou l'installation à analyser en ses sous-groupes (unités) tels que moteurs, agrégats auxiliaires, tringlerie, etc. et l'on attribue à l'unité présumée la moins bruyante un indice de source $QZ = 1$.
- On affecte à chacun des autres éléments son propre indice de source QZ , sous forme d'un multiple, estimé, de l'unité la moins bruyante.
- Lorsqu'un indice QZ a été affecté à chacune des unités, on les additionne pour obtenir un total QZ_{tot} .
- Pour la suite de l'évaluation, on définit un niveau acoustique global fictif de 100 dB. Ce niveau n'est pas significatif pour la suite des calculs, étant donné qu'on ne travaille qu'avec des différences de niveau acoustique.

L'unité la moins bruyante d'une machine (avec $QZ = 1$) produit, selon ces hypothèses, un niveau acoustique partiel L_E (contribution d'une unité de source) égale à

$$L_E = 100 \text{ dB} + \Delta E \quad [\text{dB}]$$

$$\Delta E = 10 \lg (1 / QZ_{tot}) \quad [\text{dB}]$$

Il en résulte ainsi, pour les différentes unités génératrices de bruit de la machine, des ΔE_i de

$$\Delta E_i = 10 \lg (QZ_i / QZ_{tot}) \quad [\text{dB}]$$

Et donc un niveau acoustique L_{Ei} pour l'unité de machine concerné est égal à

$$L_{Ei} = 100 \text{ dB} + \Delta E_i \quad [\text{dB}]$$

Exemple

Les contributions de bruit partielles d'une tronçonneuse sont pondérées acoustiquement à l'aide de la méthode d'évaluation présentée.

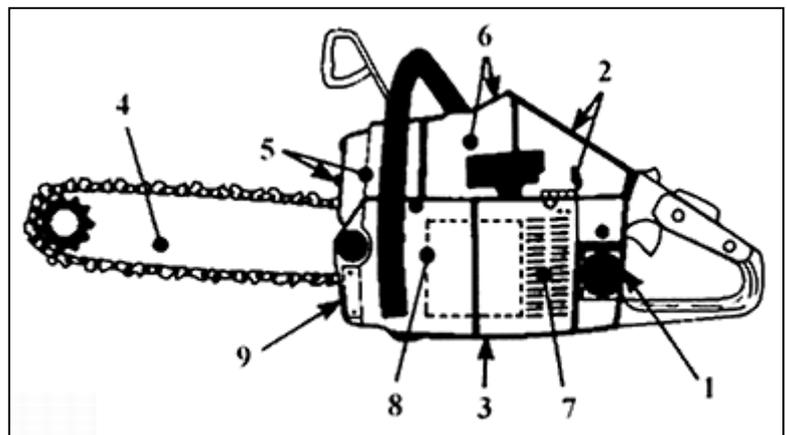


Fig. 55
Tronçonneuse à chaîne

Légende des numéros, voir Tableau 14

Le Tableau 14 présente une synthèse des résultats de l'évaluation d'une tronçonneuse à moteur.

Détermination des niveaux acoustiques des sous-groupes de la machine				
N°	Unité	Indice de source QZ	ΔE_i [dB]	L_{Ei} [dB]
1	Arrière du bâti	30	- 6	94
2	Entrée d'air (2 fois)	18	- 8	92
3	Face inférieure	18	- 8	92
4	Plateau avec chaîne	14	- 9	91
5	Silencieux	8	- 11	89
6	Cylindre du moteur	7	- 12	88
7	Grille de ventilation	6	- 13	87
8	Ventilateur	5	- 13	87
9	Réservoir d'essence	2	- 17	83
	Total	108	-	100

Tableau 14

Estimation de la contribution des différents sous-groupes d'une tronçonneuse au niveau acoustique global

On obtient donc pour cette machine

$$\Delta E = 10 \lg (1 / 108) = - 20 \text{ dB}$$

et

$$L_E = 100 - 20 = 80 \text{ dB}$$

Pour estimer l'effet d'une mesure individuelle, on admet que la source de bruit en question a été complètement éliminée et l'on soustrait énergétiquement du niveau global le niveau partiel L_{Ei} .

Dans le cas où, par exemple, l'arrière du bâti aurait été très fortement amorti, de sorte qu'il ne rayonne pratiquement plus de bruit, il pourrait en résulter la diminution de bruit suivante :

$$\Delta L = L_{\text{tot}} - 10 \lg (10^{0,1 L_{\text{tot}}} - 10^{0,1 L_{Ei}}) = 100 - 98,7 = 1,3 \text{ dB}$$

Une telle efficacité apparaît au premier abord comme minime. Toutefois, en technique d'insonorisation, la somme de petites diminutions de bruit conduit souvent à un résultat satisfaisant.

10 Limites des possibilités techniques

Toute une série de conditions marginales limitent la mise en œuvre de mesures techniques d'insonorisation en phase de conception. Les mesures d'insonorisation doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Le fonctionnement de la machine ne doit pas être perturbé.
- Avec des capotages, l'évacuation de la chaleur doit être assuré.
- L'utilisation et la maintenance de la machine ne doivent pas être entravés.
- Les pièces servant à l'insonorisation doivent pouvoir être fabriquées avec des méthodes conventionnelles.
- La sécurité mécanique de la machine ne doit pas être péjorée.
- La sécurité des opérateurs doit être assurée.
- Les coûts supplémentaires doivent être limités autant que possible.
- Les aspects ergonomiques doivent être pris en compte.

À ce propos, on peut ajouter les indications suivantes :

Fonctionnement de la machine

Le fonctionnement d'une machine, d'un agrégat ou d'une installation ne doit pas être entravé par des mesures d'insonorisation. Pour des constructions nouvelles, on intégrera dans la planification les impératifs liés à la protection contre le bruit.

Évacuation de la chaleur avec les capotages

Si des parties de machines très bruyantes, produisant de la chaleur (p. ex. embrayages à friction, freins, etc.), sont munies de capotages, on veillera à évacuer suffisamment la chaleur produite, de manière qu'il n'en résulte aucun dommage pour les éléments concernés (encapsulés).

Utilisation et maintenance

L'utilisation et la maintenance de la machine ne doivent pas être entravés. Ainsi, par exemple, la lubrification des pièces mobiles doit être assurée. Les impuretés générées par la machine, telles que poussières, copeaux, etc. doivent pouvoir être enlevées sans effort supplémentaire. Les travaux de révision ne doivent pas être entravés par les mesures d'insonorisation.

Problèmes de fabrication

La fabrication de pièces servant à l'insonorisation, p. ex. d'éléments de machines modifiés à des fins acoustiques, doit pouvoir se faire avec des procédés conventionnels et simples.

Sécurité

Aussi bien la sécurité mécanique de la machine, que la sécurité des opérateurs doivent être assurées.

Coûts

Les coûts liés aux mesures d'insonorisation constituent la condition marginale la plus importante. Dans la majorité des cas, la décision de *réaliser* ou de *ne pas réaliser* des mesures d'insonorisation est prise pour une raison de coût. Aussi, une analyse sérieuse du rapport coût-efficacité est-elle souvent indispensable. Etant donné que, dans bien des cas, une modification apportant une diminution du bruit est tout-à-fait possible, l'analyse coût-efficacité aboutira en conséquence à un résultat positif.

Annexe A Condensé des règles de construction

A1 Règles de construction d'ordre général

- Subdivision de la machine en composants générant du bruit et composants transmettant du bruit
- Identification des sources de son aérien, de son solide et de son dans les liquides
- Traçage des voies de transmission de son aérien, de son solide et de son dans les liquides
- Détermination des surfaces rayonnant le son
- Détermination des contributions majeures à la production de bruit (sources, voies de transmission, surfaces rayonnantes)

A2 Sources de bruit

Règles de construction pour la réduction des turbulences dans les gaz :

- Réduction de la pression de marche
- Réduction des changements de pression
- Limitation de la vitesse d'écoulement au minimum admissible
Optimisation des sorties d'air, avec pour but de minimiser les changements de vitesse à l'ouverture du jet sortant
- Minimalisation de la vitesse périphérique des rotors
- Absence d'obstacles dans le flux
- Amélioration du guidage du flux

Règles de construction pour la réduction des chocs et des pulsations dans les gaz :

- Réduction de la vitesse des variations de pression
- Absence d'obstacles à proximité d'un rotor

A3 Sources de bruit dans les liquides

Règles de construction pour agir sur les sources de bruit dans les liquides :

- Réduction des variations de pression
- Limitation de la vitesse d'écoulement au minimum admissible
- Absence d'obstacles dans le flux
- Amélioration du guidage du flux
- Réduction de la vitesse des variations de pression

Règles de construction pour diminuer la cavitation :

- Réduction des changements de pression
- Réduction de la vitesse d'écoulement
- Amélioration du guidage du flux, pour éviter la cavitation
- Éviter des vitesses d'écoulement de plus de 1,5 m/s pour les liquides, si les conditions opérationnelles le permettent
- Utilisation de canaux d'aspiration courts
- Disposition du réservoir de liquide au-dessus de l'entrée de la pompe (augmentation de la pression statique)
- Utilisation de robinetterie et de soupapes à faible résistance à l'écoulement

A4 Sources de bruit solide

Règles de construction pour diminuer les bruits de choc :

- Allongement de la durée du choc
- Lissage de l'évolution temporelle de la force
- Réduction de la vitesse d'impact
- Diminution de la masse du projectile effectuant un mouvement libre
- Augmentation de la masse du corps inerte
- Éviter le jeu entre des pièces soumises à des charges alternatives

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant de l'engrènement :

- Augmentation de la durée d'engrènement avec un rapport de conduite total ou apparent selon un nombre entier
- Utilisation d'engrenages hélicoïdaux
- Augmentation du nombre de dents
- Amélioration de la qualité (alignement, précision de la denture)
- Utilisation de matières synthétiques avec de faibles charges

Règles de construction pour la réduction des bruits de roulement :

- Maintien de surfaces de roulement lisses
- Emploi de lubrifiants appropriés
- Utilisation de paliers à roulement de précision
- Tolérances minimum au niveau du bâti (serrage du roulement)
- Utilisation de paliers à glissement
- Augmentation de l'élasticité dans la zone de contact

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant des forces dues à la masse :

- Réduction des forces dues à la masse par équilibrage des rotors ou équilibrage des masses décalées
- Réduction des masses soumises à une accélération
- Accroissement de la rigidité du mouvement
- Diminution du régime

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant du frottement et de l'autoexcitation :

- Réduction du frottement par un choix approprié des matériaux
- Réduction du frottement par une lubrification correcte
- Augmentation de l'amortissement de la structure pouvant être autoexcitée

Règles de construction pour la réduction du bruit solide provenant des champs magnétiques .

- Choisir le nombre d'encoques d'induit de manière à ce qu'aucune fréquence propre du stator et du rotor ne soit excitée
- Les encoques d'induit ne devraient pas être disposées parallèlement aux pôles
- Tolérances minimales pour la forme et la position du noyau magnétique, afin d'obtenir un champ magnétique aussi symétrique que possible
- Optimisation de la forme des pôles
- Prise en compte des bruits magnétiques induits par les convertisseurs sur les moteurs à régime variable (pas de fréquence propre fixe)
- Choix du matériau du noyau des transformateurs, avec pour objectif la réduction de l'excitation par voie solide

A5 Transmission du son aérien

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien au moyen de capotages :

- Réalisation de capotages totalement fermés; les petites fentes et les petits trous (p. ex. fissures, joints) ont leur importance et doivent être également colmatés
- Utilisation de tôles robustes (matériau insonorisant) pour la construction de l'enveloppe extérieure du capotage
- Utilisation de matériau phonoabsorbant sur le côté intérieur du capotage
- Mise en œuvre de silencieux aux ouvertures pour la ventilation, les câbles, le tuyaux, le transport de matériel, etc.
- Pas de liaisons rigides entre le capotage et la machine; nombre réduit de points de fixation

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien par des parois mobiles :

- Emploi de tôles robustes (matériau phonoisolant) pour la paroi
- La face de la paroi côté source doit être revêtue de matériau phonoabsorbant
- La paroi mobile doit être aussi proche que possible de la source

Règles de construction pour la réduction de la transmission du son aérien par des silencieux

- utilisation de silencieux à absorption pour bruits à large bande
- éviter les vitesses d'écoulement supérieures à 20 m/s dans les silencieux à absorption
- utilisation de silencieux à réflexion pour les bruits de basse fréquence
- utilisation de silencieux de détente pneumatiques à la sortie de l'air comprimé

A6 Transmission du bruit par les liquides

Règles de construction pour la réduction du bruit transmis par les liquides :

- utilisation d'une combinaison de tubes et de tuyaux
- utilisation de silencieux
- insertion de compensateurs pour interrompre la propagation longitudinale des sons solidiens

A7 Transmission du son solidien

Règles de construction pour la réduction du son solidien par isolation des vibrations :

- utilisation d'éléments ou de couches intermédiaires suffisamment résilientes, avec mise en œuvre de mesures d'isolation sur les conduites entrant et sortant
- l'élongation des éléments élastiques doit être prise en compte lors de la conception de la machine et, le cas échéant, elle doit être calculée
- utilisation d'une structure de la base suffisamment rigide et lourde

Règles de construction pour la réduction du son solidien par amortissement :

- amortissement complémentaire si l'amortissement originel est trop faible
- utilisation de l'amortissement pour réduire la transmission du son solidien dans la zone des fréquences propres discrètes
- utilisation de l'amortissement à proximité de la source d'excitation
- amortissement complémentaire des plaques minces (il est difficile d'amortir des structures rigides et lourdes).

A8 Rayonnement du son aérien :

Règles de construction pour la réduction du rayonnement du son aérien :

- Disposition des ouvertures du côté favorable (directivité du rayonnement acoustique)
- Utilisation de silencieux ou d'écrans devant l'ouverture

A9 Rayonnement du son solidien :

Règles de construction pour la réduction du rayonnement du son solidien :

- réduction de la surface rayonnante
- emploi de revêtements à faible facteur de rayonnement dans les fréquences dominantes
 - plaques minces au lieu de plaques épaisses (attention, quand le revêtement est excité par une force
 - plaques perforées
 - revêtements avec couches amortissantes

Annexe B Exigences pour la conception de machines peu bruyantes

B.1 Grandeurs d'émission de bruit

Les grandeurs suivantes s'utilisent pour la caractérisation de l'émission du bruit des machines :

- Grandeurs principales :
 - Niveau de puissance acoustique pondéré A L_{WA}
 - Niveau de pression acoustique pondéré A d'émission L_{pA} en un point déterminé
 - Niveau d'émission au poste de travail L_{pA}
Autres grandeurs définies dans les normes et ordonnances
- Grandeurs auxiliaires:
 - Niveau de pression acoustique surfacique pondéré A L_{pAf} à une distance donnée de la machine
 - Niveau de pression acoustique de crête pondéré C L_{pCpeak}
 - Niveau d'exposition au bruit L_E pour des événements isolés
- Les données suivantes peuvent fournir des informations complémentaires :
 - Spectre de bruit (p. ex. spectre par 1/3 d'octave) à des points déterminés
 - Caractère impulsionnel
 - Indice de directivité DI, si nécessaire

Les méthodes de mesure relatives à ces grandeurs sont décrites dans des normes internationales, p. ex. les séries ISO 3740-46 (niveau de puissance acoustique) et ISO 11200 (niveau de pression acoustique d'émission), ainsi que ISO 9614-1 et ISO 9614-2 (intensimétrie acoustique).

Lors de la comparaison entre différentes versions d'un prototype, on peut utiliser des méthodes de mesures simplifiées, p. ex. mesurage avec une seule position de microphone, au lieu de plusieurs positions autour de la machine.

B.2 Spécifications acoustiques

B.2.1 Valeurs d'émission

Les valeurs d'émission sonore, qui représentent les exigences en matière d'insonorisation pour la conception, devraient être fixées en conformité avec les principes suivants :

- Déterminer s'il existe une norme EN ISO spécifique pour le mesurage du bruit du type de machine concerné; si ce n'est pas le cas, déterminer quel document ISO devrait être utilisé pour le mesurage acoustique
- Identifier les grandeurs d'émission acoustique qui sont pertinentes selon la norme applicable

Les grandeurs d'émission caractérisant le bruit peuvent être déterminées sur la base des indications suivantes :

- Valeurs limites de bruit (ou, également, valeurs indicatives) en fonction des exigences de l'acheteur de la machine
- Valeurs limites de bruit (ou valeurs indicatives) figurant dans des ordonnances d'organisations internationales (p. ex. Déterminations ICE pour les machines électriques tournantes) ou dans des normes internationales

- Valeurs d'émission de machines similaires, d'autres fabricants, mesurées par des fabricants, des opérateurs, des laboratoires, etc., recensées dans:
 - des documentations sur les machines, de la documentation commerciale ou publicitaire
 - des banques de données ou des compilations analogues, dont les données les plus récentes figurent sous forme de valeurs individuelles ou de moyennes avec indication de la dispersion (ISO 11689 fournit des informations à ce sujet).

Les valeurs d'émission peuvent être utilisées pour fixer des valeurs limites d'émission lorsque les conditions suivantes sont remplies :

- Les valeurs ont été déterminées selon la même norme ou selon une seule et même règle.
- Les valeurs peuvent être converties, pour les rendre comparables, si les mesurages ont été effectués selon différentes normes (p. ex. normes avec des niveaux de précision différents, conditions de fonctionnement de la machine différentes).
- Les valeurs doivent être comparables du point de vue de la période où elles ont été obtenues et elles doivent être actuelles.
- Les mesurages doivent être effectués sur des machines neuves, représentatives des machines sur le marché.

La pratique courante veut que l'on fasse une différence entre des valeurs cible et les valeurs maximales admissibles (p. ex. une différence de 5 dB) durant la phase de conception.

Lorsque l'émission de bruit est fixée à partir de valeurs limites au point récepteur (point d'immission), comme p. ex. L_{pA} , les méthodes suivantes peuvent être appliquées :

- Mesurages en des points récepteurs comparables
- Calculs basés sur les lois de la propagation du son

Dans le cas de niveaux sonores variables dans le temps (p. ex. de machines travaillant de manière intermittente), on doit déterminer le niveau de pression acoustique équivalent pondéré A L_{pAeq} (par mesurage ou par calcul sur la base de l'évolution temporelle).

B.2.2 Exigences supplémentaires

Lorsque le processus constructif se compose de plusieurs éléments ou quand il implique des sous-traitants, la valeur d'émission du produit final peut se calculer par addition énergétique des valeurs d'émission des agrégats constitutifs (p. ex. moteurs, boîte de vitesses, pompes, ventilateurs).

Il peut s'avérer nécessaire de fixer des valeurs limites pour le son solidien et pour le son dans les liquides, en plus des valeurs pour le son aérien.

Il peut être également nécessaire d'imposer une limitation du spectre fréquentiel de certains sous-groupes de la machine. Dans des cas particuliers, des exigences quant à la caractérisation du bruit peuvent être convenues, comme p. ex. "pas de composants de bruit audibles" ou "pas de composantes tonales dérangeantes".

Un autre type d'exigences concerne des limitations en phase de conception et qui ont trait à l'insonorisation, p. ex. l'interdiction d'utiliser des capotages.

B.2.3 Liste des exigences

Les exigences doivent être formulées dans une liste d'exigences conformément au Tableau B.1.

Il est important de spécifier pour chaque position s'il s'agit d'une exigence (E) ou d'un souhait (S).

Les exigences sont des obligations qui, si elles ne sont pas respectées, rendent la tâche de construction inacceptable. Les exigences fixant un maximum doivent être formulées en tant que telles (p. ex. niveau de puissance acoustique).

Les souhaits ne seront pris en compte, que dans la mesure où d'éventuels coûts supplémentaires peuvent être acceptés. Pour satisfaire les exigences formulées, il est nécessaire d'opérer une évaluation et une sélection de diverses solutions à différents stades de l'élaboration.

Modifications	E/S	Exigences	responsable
	E	Niveau de puissance acoustique maximum $L_W = 85 \text{ dB(A)}$ mesuré selon SN EN ISO 3744	
	S	Niveau de puissance acoustique maximum $L_W = 80 \text{ dB(A)}$	
	E	Niveau de pression acoustique de crête pondéré C $L_{\text{peak}} < 97 \text{ dB(C)}$	
	S	Minimalisation de la transmission de son solidien dans le socle	
	S	Minimalisation de la transmission de son solidien entre la pompe et le moteur	

Tableau B.1

Liste des exigences acoustiques (exemple: spécifications pour un agrégat hydraulique)

Annexe C Contrôle des performances

Le tableau de cette annexe peut fournir une aide dans l'établissement d'un rapport sur le contrôle des performances.

La synthèse suivante (voir Tableau C.1) peut servir de rapport, à usage interne ou externe, sur les mesures d'insonorisation réalisées sur une machine

À chaque étape des différentes phases de construction (phase de conception, phase de développement et d'élaboration, mesurages sur prototype), on peut utiliser cette liste pour l'ensemble de la machine ou pour ses sous-groupes.

Le tableau peut servir à recenser les mécanismes générant du bruit pour chacun des sous-groupes de la machine. On indiquera par une coche que si mécanisme en question apparaît: des priorités peuvent être définies lorsque certains mécanismes sont dominants. Le tableau peut être également utilisé dans des rapport de mesurage ou pour d'autres informations relatives aux bruits émis par la machine.

N° de pièce de la machine, N° de la nomenclature (comme figurant sur la liste des sous-groupes annexée)		1	2	...
Exigences	Niveau de puissance acoustique [dB]			
	Niveau de pression acoustique au poste de travail [dB]			
	Niveau de pression acoustique de crête pondéré C [dB]			
	Niveau de pression acoustique surfacique [dB]			
	Spectre			
	Caractère impulsionnel			
	Directivité			
	Autres			
Analyse des sources de bruit	Son aérien			
	Turbulence			
	Pulsation			
	Choc			
	Son dans les liquides			
	Turbulence			
	Pulsation			
	Choc			
	Cavitation			
	Son solide			
	Choc			
	Engrènement			
	Roulement			
	Inertie			
	Frottement			
Effets magnétiques				

N° de pièce de la machine, N° de la nomenclature (comme figurant sur la liste des sous-groupes annexée)		1	2	...
Analyse des voies de transmission	Son aérien			
	Capotage insonorisant			
	Silencieux			
	Écran antibruit			
	Son dans les liquides			
	Silencieux			
	Autres			
	Son solide			
	Excitation par force			
	Excitation par vitesse			
	Comportement quasistatique			
	Comportement en résonnance			
	Comportement en densité modale élevée			
	Masse			
	Rigidité			
	Amortissement			
	Isolation vibratoire			
Analyse des surfaces rayonnant le son	Son aérien			
	Ouvertures			
	Son solide			
	Surfaces rayonnantes			
	Indice de rayonnement			

Tableau C.1
Liste de contrôle pour le contrôle des performances

Une liste de la nomenclature des sous-groupes de la machine doit être mise à disposition avec la présente liste de contrôle.

Bibliographie

- SN EN ISO 11688-1 Acoustique - Pratique recommandée pour la conception de machines et d'équipements à bruit réduit - Partie 1 : planification
- SN EN ISO 11688-2 Acoustique - Pratique recommandée pour la conception de machines et d'équipements à bruit réduit - Partie 2 : introduction à la physique de la conception à bruit réduit
- VDI 3720 E, Blatt 1 Konstruktion lärmarmen Maschinen und Anlagen, Rahmenrichtlinie und Beispielsammlung.
- P. Dietz, F. Gummersbach Lärmarm konstruieren XVII, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Fb 883, 2000.
- W. Lips Industrielle Raumakustik, Suva, Luzern, Best.-Nr. 66008.d, 2006.
- W. Lips Lärmbekämpfung durch Kapselungen, Suva, Luzern, Best.-Nr. 66026.d, 2008.
- W. Lips Elastische Lagerung von Maschinen, Suva, Luzern, Best.-Nr. 66057.d, 2001.
- W. Lips Strömungsakustik in Theorie und Praxis, expert verlag, Kontakt & Studium Band 474, 2008.
- W. Lips Akustik für Gebäudetechnik-Ingenieure, Hochschule Luzern, Technik & Architektur, 2008.
- Brüel & Kjær Noise Control, Principles and Practice, 1986.
- M. M. Rieländer Reallexikon der Akustik, Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt am Main, 1982.
- W. Schirmer Technischer Lärmschutz, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- W. Fasold, W. Kraak, W. Schirmer Taschenbuch Akustik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1984.
- H. Schmidt Schalltechnisches Taschenbuch, VDI-Verlag, 1989.
- G. Müller, M. Möser Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer-Verlag, 2004.
- H. Fuchs Schallabsorber und Schalldämpfer, Springer-Verlag, 2007.
- M. Möser Technische Akustik, Springer-Verlag, 2007.
- R. Storm Kompendium Maschinenakustik, Band 1 und 2, TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit & Maschinenakustik, Studienskript, 2008.
- P. Dietz, F. Gummersbach Lärmarm konstruieren XVIII, Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Fb 883, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2000.
- W. Krause Lärminderung in der Feinwerktechnik, VDI-Verlag, 1995.
- F. K. Kollmann Maschinenakustik, Grundlagen - Messtechnik - Berechnung - Beeinflussung, Springer-Verlag, 1993.

Suva
Secteur Physique
Case postale, 6002 Lucerne

Téléchargement
www.suva.ch/waswo-f/66076