



Acoustique des locaux industriels

Informations pour projecteurs, architectes et ingénieurs

Pour le calcul du coefficient d'absorption sonore moyen, voir le chapitre 5

suvaPro

Le travail en sécurité

Suva
Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents
Sécurité au travail

Renseignements:
Case postale, 1001 Lausanne
Tél. 021 310 80 40-42
Fax 021 310 80 49

Commandes:
Case postale, 6002 Lucerne
www.suva.ch/waswo-f
Fax 041 419 59 17
Tél. 041 419 58 51

Acoustique des locaux industriels

Informations pour projeteurs, architectes et ingénieurs

Auteur: Walter Lips, secteur physique

Reproduction autorisée avec mention de la source.

1^{re} édition: juin 1989

8^e édition revue et corrigée: août 2006, disponible uniquement en format PDF

Référence: 66008.f

Sommaire

1	Introduction	3
2	Principes de l'acoustique des locaux	5
2.1	Propagation du son	5
2.2	Facteur d'absorption acoustique	5
2.3	Temps de réverbération	5
2.4	Surface d'absorption acoustique équivalente	6
2.5	Réduction du niveau sonore au moyen de mesures de correction acoustique	7
2.6	Taux de décroissance spatiale DL2 et amplification du niveau de pression acoustique DLf	7
2.6.1	Introduction	7
2.6.2	Normes et directives relatives à DL2 et DLf	9
2.6.3	Détermination de DL2 à partir de mesures	9
2.6.4	Estimations à partir de DL2 établi par calcul	12
3	Exigences	13
3.1	Choix des paramètres	13
3.2	Temps de réverbération	13
3.3	Coefficient d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$	14
3.4	DL2 et DLf	15
4	Solutions pratiques	16
4.1	Variantes fondamentales	16
4.2	Indications pour l'utilisation de matériaux absorbant le son	16
4.3	Constructions nouvelles	17
4.3.1	Toitures en tôle profilée	17
4.3.2	Locaux annexes	18
4.3.3	Panneaux combinés pour l'isolation thermique et l'absorption phonique	18
4.4	Corrections acoustiques	19
4.5	Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique	19
4.6	Coût	20
4.7	Exemples	20
5	Estimation de l'acoustique des locaux	23
5.1	Généralités	23
5.2	Méthode classique de calcul des temps de réverbération	23
5.2.1	Bases de calcul	23
5.2.2	Exemple	23
5.2.3	Calcul des données de base	23
5.2.4	Calcul de la capacité d'absorption du son	24
5.2.5	Calcul des temps de réverbération	24
5.3	Calcul informatique des temps de réverbération	25
5.4	Calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale SAK et détermination de DL2	26
5.5	Examen des résultats des calculs	26
5.5.1	Comparaison	26
5.5.2	Interprétation	27

5.6	Coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$	27
5.7	Estimation de la répartition des niveaux sonores	28
5.8	Résumé	29
6	Parois mobiles	30
6.1	Introduction	30
6.2	Effet acoustique d'une paroi mobile	30
6.3	Caractéristiques requises	30
6.4	Efficacité d'une paroi mobile	31
6.5	Exemple de calcul	32
6.6	Exemples tirés de la pratique	32
6.7	Résumé	32
7	Exemples tirés de la pratique	34
7.1	Généralités	34
7.1.1	Temps de réverbération	34
7.1.2	Taux de décroissance spatiale	35
7.2	Exemples réalisés	36
8	Conclusion	42
	Références bibliographiques	43
	Remerciements	44

1 Introduction

Distribuée à ce jour à plus de 30 000 exemplaires en allemand, français et italien, cette publication met en lumière un phénomène observé dans de multiples constructions industrielles, à savoir la propagation du son dans les entreprises et ateliers. Un phénomène que l'on peut réduire sensiblement en améliorant l'acoustique des locaux. Depuis la première édition de cette brochure, les méthodes d'appréciation du bruit et les dispositions légales ont évolué, ce qui a motivé la Suva à publier une nouvelle édition. Nous en avons profité pour actualiser les exemples. Projeteurs, architectes et ingénieurs sont invités à se référer à cette publication pour l'aménagement correct des locaux industriels sur le plan acoustique.

Les réflexions des ondes sonores sur les surfaces intérieures (plafond, murs) des halles d'usine peuvent être réduites par des moyens acoustiques. On obtient ainsi une diminution de la réverbération sonore et une réduction du niveau acoustique aux postes de travail, où le niveau de bruit dépend largement du bruit en provenance des postes de travail voisins.

Quelles sont les raisons en faveur de l'utilisation de matériaux qui absorbent le son?

1. La Loi fédérale sur l'assurance-accidents (LAA) du 20 mars 1981 énumère à l'article 82, alinéa 1, des règles générales sur la prévention des accidents et des maladies professionnels:

«L'employeur est tenu de prendre, pour prévenir les accidents et maladies professionnels, toutes les mesures dont l'expérience a démontré la nécessité, que l'état de la technique permet d'appliquer et qui sont adaptées aux conditions données.»

Cette disposition légale est concrétisée dans l'article 34, alinéa 1 (bruit et vibrations), de l'Ordonnance sur la prévention des accidents et des maladies professionnelles (OPA) du 19 décembre 1983:

«Les bâtiments et parties de bâtiment doivent être aménagés de manière que le bruit ou les vibrations ne portent pas atteinte à la santé ou à la sécurité.»

2. L'article 6 de la Loi sur le travail (LTr du 13 mars 1964, état au 28 mars 2006) définit les obligations des employeurs et des employés en matière de protection de la santé.

L'Ordonnance 3 relative à la Loi sur le travail (OLT 3 du 18 août 1993, état au 1^{er} février 2000) fixe dans son article 2 les principales exigences. L'employeur est tenu de prendre toutes les mesures nécessaires afin d'assurer et d'améliorer la protection de la santé et de garantir la santé physique et psychique des travailleurs.

L'article 22 est spécialement consacré au problème du bruit:

«Le bruit et les vibrations doivent être évités ou combattus. Pour la protection des travailleurs, il importe en particulier:

- a) de prendre des mesures en matière de construction des bâtiments;
- b) de prendre des mesures concernant les installations d'exploitation;
- c) de procéder à l'isolation acoustique ou à l'isolement des sources de bruit;
- d) de prendre des mesures concernant l'organisation du travail.»

Le Commentaire de l'OLT 3 indique des valeurs acoustiques de référence concrètes relatives à certaines activités, les exigences en matière d'acoustique des locaux et des valeurs de référence concernant les bruits de fond.

L'Ordonnance 4 relative à la Loi sur le travail (OLT 4 du 18 août 1993, état au 4 juin 2002) se réfère à l'acoustique des locaux: lors de la planification et de la réalisation de nouvelles constructions ou de travaux de rénovation, il convient d'appliquer également les valeurs acoustiques de référence figurant dans le Commentaire de l'OLT 3.

3. La construction industrielle moderne n'utilise souvent que des matériaux réverbérants (béton, verre, tôle profilée, etc.). Les locaux

sans mesures de correction acoustique sont très bruyants et réverbérants (figure 1). Les postes de travail dans ces locaux sont généralement peu appréciés.

Les mesures de correction acoustique dans les locaux industriels sont jugées comme étant bien plus efficaces par les travailleurs que ne l'exprime une réduction du niveau sonore.

Grâce à ces mesures, le bruit provenant de sources sonores éloignées est fortement réduit. Chaque travailleur n'est alors pratiquement exposé qu'au bruit à proximité immédiate de son poste de travail. En outre, le travailleur a généralement une influence directe sur ces bruits qu'il connaît bien et il les considère comme moins gênants qu'un bruit diffus dont il ne peut préciser la source. Des postes de travail moins bruyants facilitent la communication, ce qui fatigue donc moins l'ouïe.



Figure 1
Exemple typique d'une halle de fabrication sans correction acoustique (local très réverbérant).

4. Les mesures de correction acoustique font partie depuis longtemps des outils de lutte contre le bruit. L'efficacité de ces mesures est démontrée par de nombreux exemples.

5. Une planification optimale permet de combiner l'isolation thermique et l'isolation phonique de façon à diminuer sensiblement les coûts. Des économies importantes peuvent être aussi réalisées lorsque les mesures de correction acoustique sont incluses dans le projet de construction. Des mesures prises après coup sont toujours plus onéreuses.

6. Les mesures de correction acoustique sont une condition préalable à l'utilisation efficace de parois mobiles. Ces parois ne remplacent pas les mesures de correction acoustique, mais les complètent d'une façon rationnelle.

En conclusion:

les mesures de correction acoustique (par exemple, un simple plafond acoustique) doivent être prévues et intégrées dans les projets de halles industrielles et de locaux de production. Elles font aujourd'hui partie de l'architecture industrielle. Des mesures de correction acoustique doivent être étudiées pour les locaux existants dont l'acoustique est insatisfaisante.

Le secteur physique de la Suva se tient à la disposition des industriels, ingénieurs et architectes pour l'étude des problèmes d'acoustique des locaux. Une liste de spécialistes des travaux de correction acoustique est disponible sur le site Internet de la Suva (www.suva.ch/waswo-f/86021).

2 Principes de l'acoustique des locaux

2.1 Propagation du son

Lorsque des ondes acoustiques issues d'une source sonore se propagent dans une salle et rencontrent une surface délimitant le local, elles sont réfléchies. Le champ sonore diffus du local, qui se compose des divers sons réfléchis, se superpose au champ sonore direct de la source sonore (fig. 2).

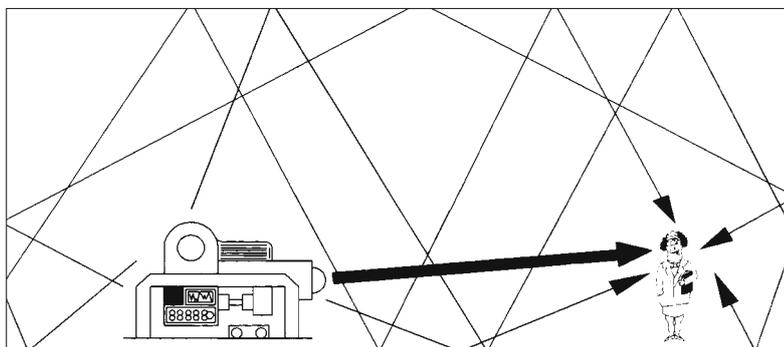


Figure 2
Son direct et son réfléchi dans une salle.

2.2 Facteur d'absorption acoustique

Le facteur d'absorption acoustique, ou plus simplement facteur ou coefficient d'absorption, désigné par le symbole α_s , est une grandeur très importante pour les études de correction acoustique des locaux. Il indique la capacité d'absorption des ondes sonores incidentes d'un matériau (fig. 3).

Le coefficient d'absorption est déterminé de manière expérimentale dans ce que l'on appelle un local réverbérant, en fonction de la fréquence (habituellement dans les tiers d'octave de 100 à 5 000 Hz, et, pour avoir un aperçu général, dans les bandes d'octaves de 125 à 4 000 Hz).

Un tableau d'exemples de coefficients d'absorption en fonction de la fréquence se trouve au point 4.5.

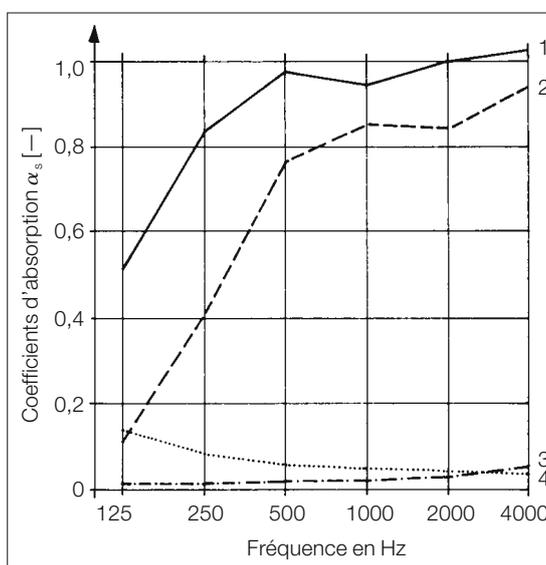


Figure 3
Exemples de coefficients d'absorption α_s en fonction de la fréquence.

- 1 Panneaux de fibre minérale
- 2 Panneaux légers en laine de bois
- 3 Béton brut
- 4 Tôle profilée

2.3 Temps de réverbération

Le temps de réverbération est la grandeur caractéristique la plus ancienne et souvent la plus importante en matière d'acoustique des locaux. Il permet d'évaluer le pouvoir absorbant d'un local. Le temps de réverbération peut être calculé, et même mesuré, à l'aide de certains instruments. Le son se propage à une vitesse constante indépendante de la fréquence (la vitesse du son c avoisine 340 m/s).

Si l'on place dans un local fermé une source sonore et un microphone, les sons réfléchis sur les surfaces délimitant le local parcourent un chemin plus long et atteignent donc le microphone plus tard que le son direct.

Si la source sonore est coupée, la pression sonore mesurée par le microphone diminue d'abord par l'extinction du son direct, puis par l'extinction progressive des sons réfléchis. Les sons réfléchis diffusés dans le local décroissent graduellement jusqu'à ce que

l'énergie totale soit absorbée par les surfaces délimitant le local. La durée du phénomène est en rapport direct avec le pouvoir absorbant du local (fig. 4) et, de même que le coefficient d'absorption α_s , est dépendante de la fréquence. Cette durée s'appelle temps de réverbération T.

Le temps de réverbération T est défini comme le temps pendant lequel un niveau de pression acoustique donné diminue de 60 dB après la cessation de l'émission sonore. Par conséquent, le temps de réverbération est long dans le cas d'une mauvaise acoustique et court dans le cas d'une bonne acoustique du local

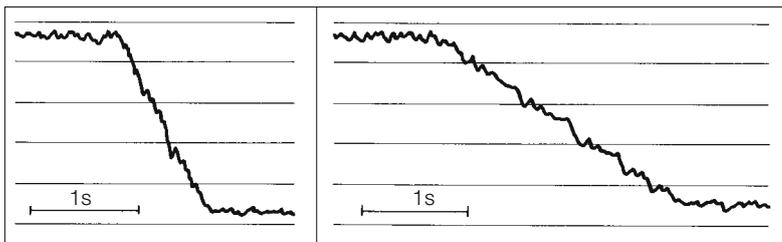


Figure 4
Courbes d'évanouissement (fréquence 1000 Hz) dans un local à bonne (à gauche) et mauvaise (à droite) acoustique.

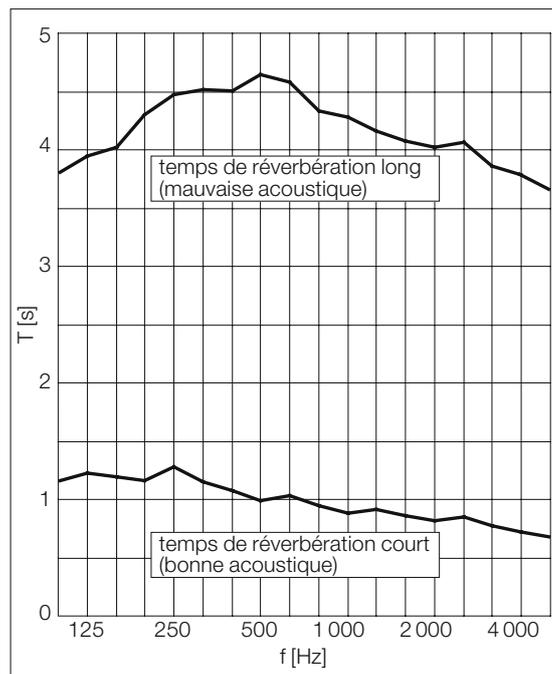


Figure 5
Résultats de mesures des temps de réverbération.

(bonne absorption des sons). Les temps de réverbération sont indiqués généralement dans les bandes d'octaves (125 – 4 000 Hz) ou de tiers d'octave (100 – 5 000 Hz) (fig. 5). La source sonore utilisée pour les mesures est soit une installation de haut-parleur (bruit rose) soit un pistolet ou fusil chargé à blanc (impulsions sonores).

Les valeurs limites relatives aux temps de réverbération sont rassemblées au point 3.2.

2.4 Surface d'absorption acoustique équivalente

La description mathématique du pouvoir d'absorption acoustique a été établie par W.C. Sabine (1868-1919), qui a découvert une relation entre le temps de réverbération T (en s), le volume du local V (en m³) et la surface d'absorption acoustique équivalente A (en m²):

$$A = 0,163 \times \frac{V}{T} \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{[formule 1]}$$

Comme A est en rapport étroit avec α_s , on peut calculer la surface d'absorption acoustique équivalente d'une surface partielle d'un local (p. ex. le plafond) avec la formule suivante:

$$A = \alpha_s \times S \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{[formule 2]}$$

S = surface en m²

Connaissant le coefficient d'absorption α_i de toutes les surfaces partielles S_i d'un local, on peut calculer la surface d'absorption acoustique équivalente comme suit:

$$A = \sum_{i=1}^i \alpha_i \times S_i \text{ [m}^2\text{]} \quad \text{[formule 3]}$$

Le résultat de ce calcul permet de déterminer le temps de réverbération à l'aide de la formule 1. Un exemple détaillé est donné au point 5.2.3.

Dans certaines normes (p. ex. ISO 3746 et DIN 45635), on montre comment il est possible d'évaluer la qualité acoustique d'un local à l'aide du coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$ (voir aussi point 3.3). Le coefficient d'absorption moyen est déterminé par mesure directe ou par calcul selon la formule suivante:

$$\bar{\alpha}_s = 0,163 \times \frac{V}{T \times S_v} \quad [-] \quad \text{[formule 4]}$$

S_v = surface totale du local (sols, murs, plafonds) en m^2

Le coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$ représente la moyenne arithmétique de toutes les fréquences (analyse par bande d'octave: 125 – 4 000 Hz; analyse par bande de tiers d'octave: 100 – 5 000 Hz).

Remarques importantes

Tous les calculs effectués à l'aide des bases énoncées dans ce passage se fondent sur un champ sonore diffus. Pour qu'il existe un champ diffus dans un local, il faut que les composantes sonores émises par une source aient une intensité quasiment égale dans tout le local et que le rapport entre la plus grande et la plus petite mesure effectuées dans le local soit inférieur ou égal à 3. De plus, le coefficient d'absorption moyen ne doit pas dépasser 0,3, quelle que soit la surface de délimitation du local.

Or, il s'avère que les locaux de travail (bureaux, ateliers) sont généralement des lieux bas qui ne remplissent pas les conditions propres à un champ sonore diffus. C'est pour cette raison et parce que l'influence des émetteurs de bruit n'est pas prise en compte par ce procédé que les calculs effectués selon cette méthode sont souvent imprécis.

2.5 Réduction du niveau sonore au moyen de mesures de correction acoustique

Les temps de réverbération peuvent être réduits au moyen de surfaces absorbant le son.

Sur la base des temps de réverbération comparés, la réduction du niveau sonore ΔL est donnée par la formule suivante:

$$\Delta L = 10 \log \frac{T_1}{T_2} \quad [\text{dB}] \quad \text{[formule 5]}$$

T_1 = temps de réverbération à l'état initial en s

T_2 = temps de réverbération avec matériaux absorbant le son en s

Pratiquement, cela signifie qu'une réduction du temps de réverbération de facteur 2 (p. ex. de 2,0 à 1,0 s) a pour conséquence une réduction de 3 dB(A) du niveau sonore dans le local.

Cette amélioration n'est cependant pas effective à proximité immédiate d'une source de bruit (par exemple, au poste de travail sur une poinçonneuse). Elle n'est vérifiable qu'à une certaine distance.

2.6 Taux de décroissance spatiale DL2 et amplification du niveau de pression acoustique DLf

2.6.1 Introduction

Les temps de réverbération mesurés ou calculés pour un local ne fournissent encore aucune information sur la diminution escomptée du niveau de pression acoustique d'une source sonore en fonction de la distance. En d'autres termes, il n'existe pas de rapport utilisable en pratique entre le temps de réverbération et la diminution du niveau sonore par doublement de la distance.

Cependant, certaines évaluations permettent d'envisager la solution de ce problème en utilisant le facteur d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$.

On sait en effet que, dans le cas d'un son émis par une source sonore ponctuelle (théorique) et se propageant librement, on peut escompter une diminution maximale du niveau de pression acoustique de 6 dB quand la distance est doublée. Toutefois, dans des locaux fermés, cette valeur n'est atteinte que si les locaux sont exempts de réflexions (anéchoïques).

La **courbe de décroissance sonore spatiale**, qui est actuellement de plus en plus utilisée, repose sur des conditions plus réalistes.

La courbe de décroissance sonore spatiale (Schallausbreitungskurve, abrégée SAK dans cette publication), qui indique la diminution du niveau de pression sonore en fonction de la distance, représente une grandeur introduite en 1988 en Allemagne et en Suisse dans le but d'améliorer l'appréciation des conditions acoustiques dans les locaux industriels. La courbe de propagation du bruit, qu'elle soit calculée ou mesurée, tient compte non seulement de l'absorption sonore, mais aussi de la dispersion des faisceaux sonores dans un local (procédé de Jovicic). Comme les calculs sont très complexes, il a fallu attendre le développement de puissants ordinateurs pour les appliquer. Selon le degré d'absorption de la surface de délimitation du local, ces ordinateurs doivent en effet être capables d'additionner jusqu'à 50 000 composantes sonores pour chaque point du local! Depuis lors, cette valeur a été introduite, quoique sous une forme légèrement différente, dans divers projets de normes et de directives. L'appréciation de la qualité acoustique des locaux relativement grands ne se fera d'ailleurs plus que par ce critère.

DL2

Le premier paramètre établi à partir de la courbe de décroissance sonore spatiale SAK est la mesure DL2. Celle-ci indique la diminution moyenne du niveau de pression sonore par doublement de la distance, pour une échelle de distances donnée. Il n'est pas nécessaire de connaître la puissance sonore de la source utilisée pour mesurer DL2 par des procédés techniques. C'est pourquoi les mesures de ce type peuvent être effectuées par des moyens relativement simples.

DLf

Le second paramètre, à savoir l'amplification du niveau de pression acoustique DLf, indique l'écart entre le niveau de pression sonore émis par une source sonore normalisée dans un local et à une échelle de distances donnée et le niveau sonore en cas de propagation libre du son (cas idéal, sans réflexions), le premier niveau étant supérieur au second. L'amplification du niveau de pression acoustique DLf est un critère plus efficace que DL2 pour apprécier la qualité acoustique en raison d'une gamme de valeurs plus étendue et du rapport direct avec la réduction sonore souhaitée pour DLf. DLf ne peut être déterminée qu'au moyen d'un dispositif de mesure satisfaisant aux exigences du point 2.6.3. Il faut connaître notamment la puissance sonore de la source utilisée.

Le grand avantage de cette méthode réside dans une meilleure prise en compte de la propagation effective du son pour apprécier la qualité acoustique des locaux. L'influence des «diffuseurs» (machines et installations du local) est enregistrée correctement. Ces diffuseurs n'agissent pas en premier lieu comme des absorbeurs de bruit mais comme des points de réflexion à effet diffus.

Ces deux paramètres seront développés à l'aide d'exemples dans les pages qui suivent. Une distinction sera faite entre mesure et

calcul étant donné que les moyens utilisés (instruments de mesure, ordinateur) diffèrent largement les uns des autres.

2.6.2 Normes et directives relatives à DL2 et DLf

La norme EN ISO 11690, partie 1 (1996), présente entre autres les critères d'appréciation DL2 et DLf. La directive VDI 3 760 (1996) contient par ailleurs des instructions détaillées sur la détermination de ces valeurs. Les critères obligatoires auxquels doivent répondre les instruments de mesure y sont également décrits et ne seront donc pas développés ici (p. ex. caractéristiques obligatoires du système de haut-parleur à utiliser).

L'article 22 de l'ordonnance 3 relative à la Loi sur le travail du 18 août 1993 et son Commentaire mentionnent également DL2 mais font l'impasse sur l'introduction de la mesure DLf, une mesure que nous jugeons importante d'après notre expérience en la matière.

2.6.3 Détermination de DL2 à partir de mesures

La courbe de décroissance sonore spatiale SAK est déterminée sur une ligne droite partant d'une source sonore ponctuelle du type dit à propagation hémisphérique (p. ex. haut-parleur dodécaèdre émettant un bruit constant). Aucun obstacle ne doit se trouver entre la source sonore et le microphone. Il est recommandé de choisir, par exemple, des voies de mesure au centre du local et, si possible, au moins deux qui soient orthogonales l'une par rapport à l'autre.

Les points de mesure doivent être placés aux distances suivantes par rapport à la source sonore d'essai: 1, 2, 3, 4, 5, ..., 10, 12, 14, 16, ..., 20, 24, 28, 32, ..., 40, 48, 56, 64, ...m. En ces points, on mesure le niveau de pression

acoustique dans les bandes d'octaves aux fréquences centrales de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 000 Hz, 2 000 Hz et 4 000 Hz. Pour ne pas fausser les résultats, les bruits étrangers devraient être inférieurs de 10 dB au moins aux immissions de la source sonore d'essai au point de mesure. La voie de mesure doit se trouver à 1,5 m au moins des surfaces réfléchissantes. La hauteur de mesure se situe habituellement à 1,5 m au-dessus du niveau du sol.

On considère trois échelles de distances différentes pour évaluer les résultats:

- distance faible: $1 \text{ m} \leq r \leq 5 \text{ m}$
- distance moyenne: $5 \text{ m} \leq r \leq 16 \text{ m}$
- distance importante: $16 \text{ m} \leq r \leq 64 \text{ m}$

La valeur fondamentale pour apprécier la qualité acoustique d'un local est la moyenne arithmétique de l'évolution du niveau sonore mesuré dans les bandes d'octaves de 125 à 4 000 Hz, à des distances moyennes de 5 à 16 m.

L'analyse des résultats des mesures s'effectue selon deux méthodes: la première consiste à reporter les résultats dans un tableau (exemple: tableau 1), et à établir la valeur DL2 par un graphique (fig. 6), à l'aide des moyennes déterminantes (moyennes arithmétiques). On trace alors une droite de régression entre les points mesurés aux distances moyennes (droite descendante, rapprochée de la courbe de mesure). Déterminer l'amplification du niveau de pression acoustique DLf avec cette méthode n'est pas très simple, c'est pourquoi elle ne sera pas développée davantage ici.

La seconde méthode consiste à utiliser un programme informatique. Certains programmes permettent en effet de saisir et d'exploiter directement les données indiquées sur l'instrument de mesure. Un exemple figure

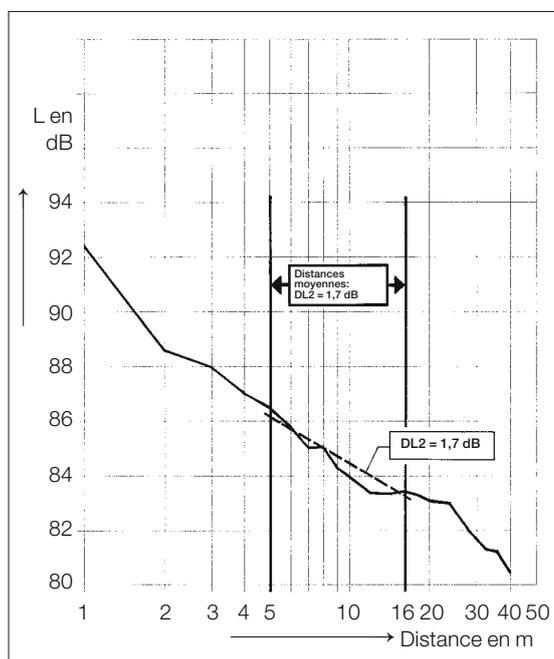


Figure 6
Exemple d'une analyse graphique des résultats des mesures pour DL2.

— Moyennes des niveaux de pression acoustique pour les bandes d'octaves de 125 à 4 000 Hz
- - - Droite de régression relative à DL2

dans le tableau 2 (mesures établies par programme informatique) et à la figure 7 (représentation graphique de la voie de mesure et analyse). La diminution du niveau de pression acoustique représente la différence entre le niveau de pression acoustique et le niveau de puissance acoustique de la source utilisée. L'amplification du niveau de pression acoustique DLf est calculée simultanément.

Ce programme, intitulé Cadna/SAK, est conçu par la société DataKustik GmbH, D-86926 Greifenberg, et distribué en Suisse par la Suva.

Aux figures 7 et 8, la droite descendante en pointillé représente la courbe de décroissance sonore spatiale à l'extérieur (diminution: 6 dB par doublement de la distance).

L'importance de DL2 pour l'acoustique des locaux ressort nettement de la figure 8 qui permet de comparer la courbe de décroissance sonore spatiale mesurée avant correction acoustique et celle envisagée après correction.

Distance en m	Valeurs mesurées en dB						Moyenne
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz	
1	92,7	92,9	92,0	90,7	92,8	93,5	92,4
2	87,7	89,4	89,2	86,3	88,9	89,7	88,5
3	85,5	90,9	88,3	85,9	90,1	87,4	88,0
4	86,0	89,7	86,9	84,8	87,9	86,1	86,9
5	87,3	87,3	86,4	86,0	86,9	84,7	86,4
6	87,0	86,9	85,6	84,0	87,5	84,1	85,8
7	87,3	86,3	85,5	82,2	86,4	82,5	85,0
8	86,0	87,8	85,7	82,3	86,2	82,9	85,1
9	85,3	85,7	85,1	81,3	85,8	82,1	84,2
10	85,7	85,4	85,0	81,6	85,4	81,1	84,0
12	84,6	86,7	83,6	80,8	83,4	81,1	83,4
14	83,9	86,1	84,0	80,3	84,6	81,8	83,4
16	84,9	86,1	83,7	81,0	84,6	81,0	83,5
18	83,8	86,3	83,4	80,9	84,6	80,9	83,3
20	85,3	85,3	83,0	81,0	84,4	79,9	83,1
24	83,3	85,7	84,0	80,9	83,7	79,7	82,9
28	83,1	85,0	83,6	78,6	83,3	79,3	82,1
32	81,9	85,0	82,6	78,4	82,3	77,6	81,3
36	81,3	85,6	82,4	78,6	81,9	77,5	81,2
40	80,1	83,9	81,5	78,9	81,1	76,5	80,3

Tableau 1
Exemple de mesure d'une courbe de décroissance sonore spatiale SAK à l'aide d'un équipement de mesure simple (haut-parleur en forme de boule, sonomètre avec filtre de bande d'octaves).

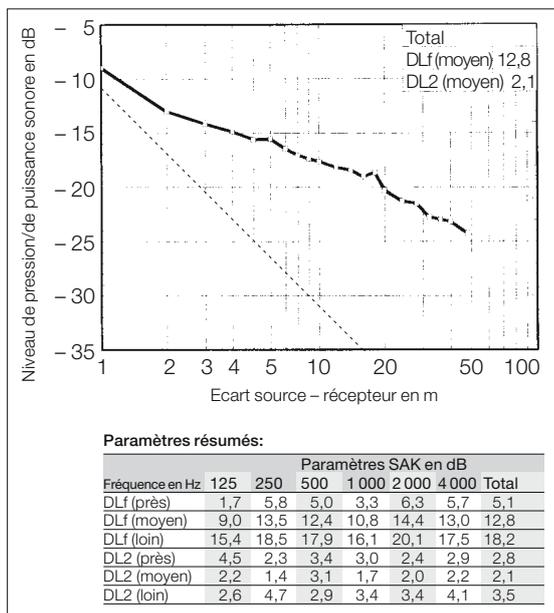


Figure 7
Représentation graphique de la voie de mesure et analyse des valeurs mesurées (valeurs identiques à celles du tableau 2).

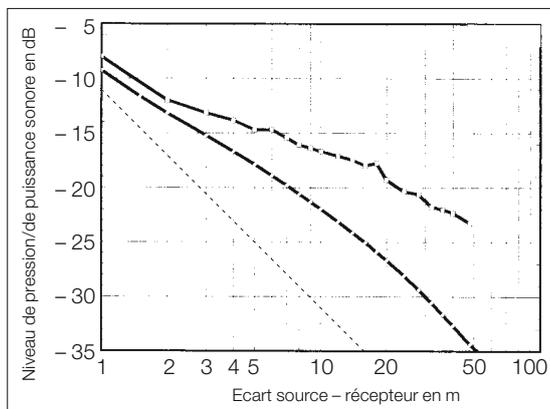


Figure 8
Courbe de propagation du son avant et après les travaux de correction acoustique des locaux.

Courbe du haut: avant correction, DL2 = 2,1 dB
Courbe du bas: après correction (calculée), DL2 = 4,3 dB

Distance en m	SAK en dB						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz	Total
1	-9,9	-10,2	-8,0	-10,5	-8,1	-9,1	-8,9
2	-15,0	-11,7	-13,1	-15,0	-12,2	-11,3	-13,0
3	-21,7	-12,1	-15,0	-16,2	-12,6	-14,0	-14,2
4	-19,2	-14,6	-15,4	-16,3	-13,3	-15,1	-14,9
5	-19,4	-15,9	-15,9	-17,9	-13,8	-15,3	-15,6
6	-20,5	-16,1	-14,9	-17,8	-14,1	-16,0	-15,6
7	-20,0	-15,3	-16,4	-18,3	-15,3	-16,1	-16,4
8	-19,5	-16,4	-17,3	-19,1	-15,5	-16,7	-17,0
9	-20,3	-15,3	-18,2	-19,6	-15,8	-16,9	-17,4
10	-22,1	-17,4	-18,1	-19,7	-16,0	-17,0	-17,6
12	-21,0	-16,3	-18,9	-19,9	-16,7	-18,3	-18,2
14	-23,3	-18,1	-19,7	-20,5	-16,3	-18,3	-18,4
16	-23,1	-18,0	-20,4	-20,3	-17,4	-19,0	-19,0
18	-22,4	-19,2	-18,6	-20,6	-16,9	-19,3	-18,7
20	-22,3	-17,8	-21,5	-22,7	-18,4	-20,5	-20,3
24	-24,5	-21,4	-21,6	-23,6	-19,2	-21,6	-21,2
28	-25,0	-20,3	-21,3	-24,2	-19,7	-22,6	-21,5
32	-24,7	-22,6	-23,7	-24,4	-20,7	-23,4	-22,7
36	-24,9	-22,9	-22,7	-24,7	-21,5	-23,9	-23,0
40	-26,4	-24,4	-23,0	-25,5	-21,1	-24,4	-23,2
48	-26,5	-25,1	-24,7	-25,7	-22,3	-25,3	-24,2

Tableau 2
Valeurs fournies par l'instrument de mesure et directement exploitées par le programme informatique.

2.6.4 Estimations à partir de DL2 établi par calcul

DL2 ne peut pas être déterminé par les méthodes de calcul traditionnelles simples s'il s'agit de faire des estimations, même lorsqu'on dispose des mesures adéquates d'un local à corriger. Cela en raison de la méthode de calcul qui se fonde, dans le cas de DL2, sur le remplacement des sources sonores par des sources virtuelles réfléchies par les cloisons. Ce procédé consiste à suivre le déplacement d'un grand nombre de faisceaux sonores isolés jusqu'à ce qu'ils deviennent négligeables par rapport au niveau sonore global. Contrairement à la méthode du calcul du temps de réverbération, il est donc essentiel de savoir où se trouvent par exemple les matériaux absorbant le son et les matériaux réfléchissants dans un local donné. Les calculs tiennent compte des propriétés acoustiques des surfaces des locaux en fonction de leur disposition géométrique.

Les calculs de cette nature ne peuvent être maîtrisés qu'avec des programmes informatiques performants puisque certains calculs très précis exigent un traitement de millions de faisceaux sonores. Plus la réverbération est forte dans un local, plus les calculs seront complexes.

Les estimations voulues peuvent être réalisées au moyen du programme informatique mentionné au point 2.6.3.

3 Exigences

3.1 Choix des paramètres

Les exigences en matière d'acoustique des locaux peuvent être exprimées par trois paramètres:

1. Temps de réverbération T
2. Facteur (coefficient) d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$
3. Nouveaux critères d'appréciation de l'acoustique des locaux: taux de décroissance spatiale DL2 et amplification du niveau de pression acoustique DLf

Quelle grandeur de référence faut-il utiliser et où? En principe, on peut toutes les calculer. Les techniques de mesure ne permettent cependant que de calculer les temps de réverbération et les valeurs DL2 et DLf (DL2 et DLf avec certaines restrictions pour les petits locaux).

Compte tenu des bases énoncées au point 2.6.2, les différents paramètres sont à appliquer selon le tableau 3.

Les temps de réverbération ainsi que les deux valeurs DL2 et DLf sont en principe valables pour des locaux prêts à être exploités, c.-à-d. des locaux contenant des machines, des

installations de même que des objets intégrés tels que les cabines ou les conduites d'aération. Le coefficient d'absorption sonore moyen sera par contre calculé pour des locaux vides vu avant tout comme un instrument de travail simple pour des projets de construction.

3.2 Temps de réverbération

Les valeurs limites relatives aux temps de réverbération dans les locaux de travail indiquées dans le tableau 4 ne doivent en aucun cas être dépassées:

Volume du local V en m ³	Temps de réverbération maximal T ^{*)} en s
< 50	0,5
50 – 200	0,5 – 0,8
200 – 1 000	0,8 – 1,2
1 000 – 5 000	1,2 – 1,4
5 000 – 20 000	1,4 – 1,6
> 20 000	1,6

Tableau 4
Valeurs limites relatives aux temps de réverbération dans les locaux de travail.

*) Soit la valeur moyenne dans le domaine de fréquences de 125 à 4 000 Hz. Limite inférieure de la fourchette de volume: temps de réverbération plus court, limite supérieure de la fourchette de volume: temps de réverbération plus long.

Local, phase du projet	Temps de réverbération T	Facteur d'absorption sonore moyen $\bar{\alpha}_s$	DL2 et DLf
Projet de nouvelles constructions en phase de planification, procédure d'approbation des plans	(X)	X	X
Appréciation de locaux existants et estimations concernant la correction de locaux existants (V > 1 000 m ³)	(X)	(X)	X
Appréciation de locaux existants (V < 1 000 m ³)	X	X	
Estimations concernant la correction de locaux existants (V < 1 000 m ³)	X	X	

Tableau 3
Paramètres retenus.

X Priorité (X) 2^e priorité
Si deux croix figurent sur la même ligne, le choix du paramètre est libre.

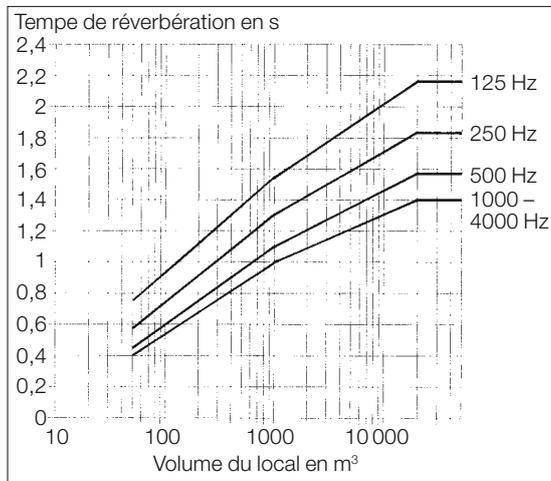


Figure 9
Représentation graphique des valeurs limites relatives aux temps de réverbération dans les locaux de travail. Les valeurs sont toujours arrondies au 5/100^e seconde supérieur ou inférieur.

Les temps de réverbération du tableau 4 sont représentés sous une forme graphique à la figure 9.

3.3 Coefficient d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$

Diverses publications donnent une valeur de référence de 0,35 pour le coefficient d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$ bien que l'état du local auquel correspond cette valeur ne soit pas précisé. Se fondant sur les expériences faites dans de nombreux bâtiments, la Suva aboutit à un résultat différent. Elle propose pour le coefficient d'absorption sonore moyen calculé pour un local vide la valeur de référence ci-après:

$$\bar{\alpha}_s \geq 0,25$$

Cela signifie que, pour des locaux cubiques, un plafond acoustique ne suffit pas pour remplir la condition $\bar{\alpha}_s \geq 0,25$. Il faut éventuellement prévoir des revêtements muraux en plus du plafond.

On peut aussi convertir l'exigence relative au temps de réverbération selon le point 3.2 en un facteur d'absorption moyen spécifique du local considéré (en fonction des dimensions de celui-ci). On utilise dans ce cas la formule 4 (point 2.4).

Exemple

Local de fabrication de 30 x 20 x 8 m³.

$$V = 4\,800 \text{ m}^3, S_v = 2\,000 \text{ m}^2$$

(surface intérieure totale du local).

Selon figure 9, pour 4 800 m³, $T_m = 1,4 \text{ s}$ (moyenne arithmétique).

Donc

$$\bar{\alpha}_s = \frac{0,163 \times V}{T_m \times S_v} = \frac{0,163 \times 4\,800}{1,4 \times 2\,000} = 0,28$$

Le facteur d'absorption moyen de 0,28 se situe au-dessus du minimum exigé (0,25) et peut être jugé suffisant.

3.4 DL2 et DLf

Le taux de décroissance spatiale par doublement de la distance, soit DL2, doit être de

$$DL2 \geq 4 \text{ dB}$$

au minimum, à une distance moyenne (5 à 16 m), dans les locaux de travail prêts à fonctionner et à être exploités. Si l'on effectue des estimations pour les nouveaux bâtiments, il faut impérativement tenir compte du degré d'occupation des locaux. L'expérience prouve en effet que la condition $DL2 \geq 4 \text{ dB}$ ne peut pas toujours être remplie dans les locaux vides, malgré un plafond acoustique de haute qualité. L'exemple cité au point 5.5.1 montre clairement qu'occupation des locaux et estimations sont étroitement liées.

La valeur de DLf (différence moyenne dans le champ moyen entre la courbe de décroissance sonore spatiale dans un local et la courbe de décroissance sonore spatiale en champ libre) ne doit pas dépasser 8 dB. Il s'agit là d'une valeur de référence ne figurant pas dans l'Ordonnance 3 relative à la LTr. L'expérience montre toutefois que la valeur DLf est très utile dans la pratique.

4 Solutions pratiques

4.1 Variantes fondamentales

Les plafonds et les murs se prêtent bien à la pose de matériaux absorbant le son. Il existe trois types principaux d'exécution (voir aussi fig. 10):

1. panneaux acoustiques en matériaux à surface lisse ou structurée (fig. 10a),
2. panneaux combinant l'isolation thermique et l'absorption du son (fig. 10b),
3. baffles (fig. 10c, gauche) et correcteurs compacts (fig. 10c, droite).

4.2 Indications pour l'utilisation de matériaux absorbant le son

Matières poreuses

Le pouvoir absorbant des matières poreuses augmente à mesure que la fréquence est plus élevée.

Couche d'air

Grâce à une couche d'air de quelques centimètres entre le matériau absorbant et le mur (ou le plafond) sur lequel il est posé (montage sur treillis de lattes), on améliore sensiblement le pouvoir absorbant dans la gamme des basses fréquences (absorption accrue de la résonance).

Panneaux durs

Les panneaux durs (p. ex. panneaux d'agglomérés ou de contreplaqué) n'ont un effet absorbant que dans la gamme des basses fréquences. Et cela, à condition que l'épais-

seur des panneaux soit inférieure à 10 mm et qu'ils soient montés sur une grille de lattes.

Couches de peinture

Les couches de peinture peuvent altérer sensiblement le pouvoir absorbant des matériaux insonorisants (attention en cas de rénovation!). Il est préférable de n'utiliser que des produits imprégnés et colorés en usine.

Aspect esthétique

Lors du choix de matériaux acoustiques, on tiendra compte aussi, outre des propriétés purement acoustiques, de l'aspect esthétique et des aspects pratiques (p. ex. résistance aux détériorations mécaniques, à la poussière, l'humidité, etc.).

Hygiène

Dans certains locaux, les matériaux acoustiques doivent répondre à des exigences particulières. C'est le cas dans l'industrie chimique, alimentaire et dans les hôpitaux par exemple. Bien que les matériaux absorbants utilisés dans ces locaux doivent présenter une surface cellulaire, ils peuvent atteindre des coefficients d'absorption très satisfaisants. Les prescriptions européennes sur le contrôle de l'hygiène faisant défaut, c'est la norme américaine US FS 209d exigeant en général la classe 100 qui est appliquée dans ces cas.

Caractéristiques physiques du bâtiment

On oublie souvent qu'outre leurs propriétés acoustiques les matériaux absorbant le son présentent aussi une bonne capacité d'isolation thermique. Il peut s'ensuivre certains problèmes dus aux caractéristiques physiques du bâtiment, qui – comme l'expérience le montre – peuvent entraîner d'importants dégâts dans les constructions.

En effet, lorsqu'on pose des matériaux acoustiques directement sur des parties de construction (murs, plafonds) en contact avec l'extérieur, ce qu'on appelle le point de rosée est déplacé vers le côté chaud et, en même temps, le coefficient de transmission thermique est augmenté. En raison des différences

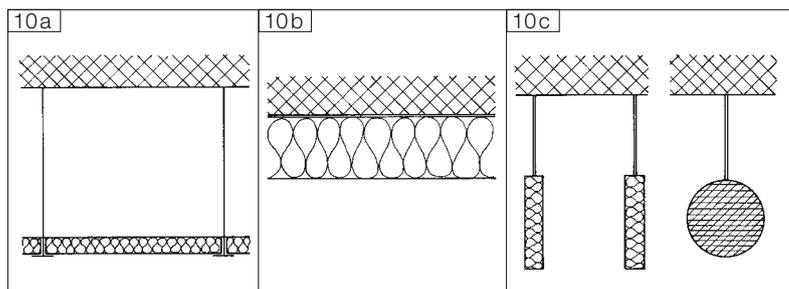


Figure 10
Variantes fondamentales pour le montage de matériaux absorbant le son.

entre les conditions climatiques extérieures et intérieures, les premières dégradations (taches sur les panneaux acoustiques, gouttes d'eau, délitescence des panneaux acoustiques) apparaîtront tôt ou tard.

C'est pourquoi le montage de panneaux acoustiques sur des parties de construction en contact avec l'extérieur doit satisfaire à une exigence essentielle: dans tous les cas, il faut choisir un type de montage permettant une aération par derrière, c'est-à-dire que l'air du local doit pouvoir circuler entre le matériau acoustique et la partie extérieure de construction. Cette mesure impérative nécessitée par les caractéristiques physiques du bâtiment entraîne, en fait, la perte de la capacité d'isolation thermique du matériau acoustique.

4.3 Constructions nouvelles

Outre le vaste assortiment de systèmes de correction acoustique offerts sur le marché, il existe des solutions qui doivent être choisies dès la conception du projet, car elles sont irréalisables après coup. Ces solutions très efficaces en matière d'acoustique des locaux sont nettement moins onéreuses que le plafond acoustique classique (jusqu'à 50 % d'économies). Quelques solutions sont présentées ci-après.

4.3.1 Toitures en tôle profilée

Un type de construction d'un excellent rapport qualité-prix très utilisé pour les halles industrielles se compose d'une structure métallique avec une toiture en tôle profilée. Les murs sont en béton, en maçonnerie, en vitrage voire en tôle. Dans ces locaux, les temps de réverbération sont très élevés en raison du manque de matériaux de correction acoustique.

Une solution consiste à perforer les tôles profilées (par le fabricant) et à créer un plafond acoustique d'une grande efficacité. Deux exemples de constructions de ce type, avec

leurs coefficients d'absorption, sont présentés fig. 11.

Cette solution efficace tant du point de vue acoustique que de la technique du bâtiment entraîne une conséquence importante pour le projet:

les projets de halles industrielles avec toiture en tôle profilée, dans lesquelles il faut s'attendre à une exposition au bruit élevée, doivent comporter une toiture en tôle profilée perforée.

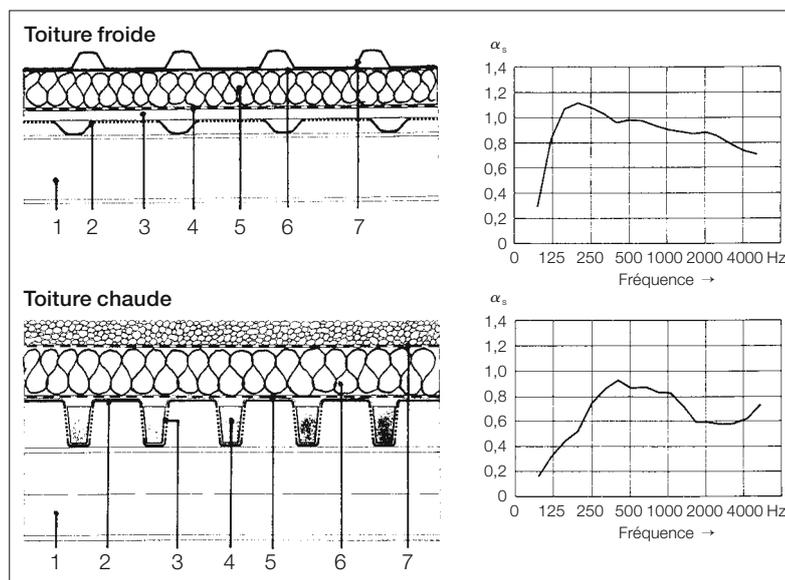


Figure 11
Construction et effet acoustique de toitures en tôle profilée perforée
(source: Sonotec SA, Villmergen).

Toiture froide

- 1 Profil C MONTANA (panne de toiture)
- 2 SWISS PANEL SP 28 A, 0,80 mm, acier galvanisé, perforé dans l'aile, perforation 20,5 %
- 3 Rouleau de feutre en fibre minérale 25 mm, ISOVER type FM (25 kg/m³) avec barrière vapeur en aluminium 0,05 mm
- 4 Profil de distance 100 mm, profil Z, 1,50 mm, acier galvanisé
- 5 Panneau d'isolation thermique 75 mm, FLUMROC type rouleau de feutre crêpe (25 kg/m³)
- 6 Profil en PVC sur profil de distance
- 7 SWISS PANEL SP 41, 0,70 mm, acier galvanisé, prélaqué

Toiture chaude

- 1 Poutre/panne de toiture
- 2 SWISS PANEL SP 95 A, 1,00 mm, perforé dans l'âme, perforation 25,2 %
- 3 Tissu non-tissé antipoussière (50 g/m²)
- 4 Bande trapézoïdale FLUMROC type 1 (32 kg/m³)
- 5 Barrière vapeur SARNAVAP 1 000, 1,60 mm (300 g/m²)
- 6 Panneau d'isolation thermique 100 mm (2 x 50 mm), FLUMROC type 341 (180 kg/m³)
- 7 Etanchéité SARNAFIL G 21 441, 2,40 mm (2,7 kg/m³)

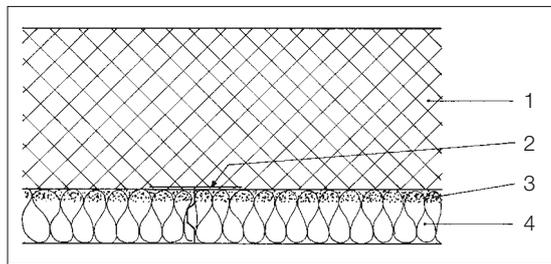


Figure 12
Panneaux légers en laine de bois intégrés dans le coffrage (à recommander uniquement pour l'utilisation de béton sec ou lorsque l'aspect esthétique importe peu).

- 1 Béton
- 2 Bord collé
- 3 Béton incorporé dans un panneau léger
- 4 Panneau léger en laine de bois

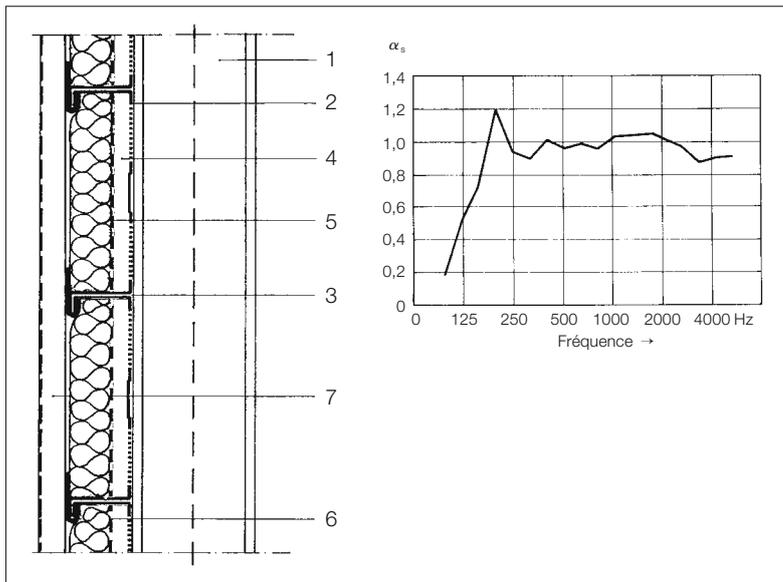


Figure 13
Panneaux pour murs extérieurs, combinés pour l'isolation thermique et l'absorption phonique (source: Sonotec SA, Villmergen).

- 1 Pilier métallique
- 2 MONTANA bardage WP 100/333 A, 1,00 mm, acier galvanisé, perforé, perforation 25,2 %
- 3 Bande d'étanchéité G 410, 19 x 3,2 mm, mousse PVC expansée à cellules fermées
- 4 Panneau de fibre minérale 25/23 mm, ISOVER type PS 81 (80 kg/m³), avec barrière vapeur en aluminium 0,05 mm
- 5 Panneau d'isolation thermique 80 mm, FLUMROC type 1 (32 kg/m³)
- 6 Profil en PVC rigide expansé (4 x 64 mm)
- 7 SWISS Panel SP 41, 0,70 mm, acier galvanisé, prélaqué

4.3.2 Locaux annexes

Dans les locaux dont l'aspect esthétique était secondaire (p. ex. les locaux fournissant l'énergie pour le chauffage, la ventilation, le froid ou l'air comprimé), on avait l'habitude d'intégrer directement un matériau approprié dans le coffrage (p. ex. panneaux légers en laine de bois, fig. 12). Ce procédé est rarement satisfaisant, car le béton prêt à l'emploi est nettement plus fluide que naguère (conduit dans le coffrage par des pompes à béton) ce qui crée des problèmes plus importants. Il ne suffit pas simplement de coller soigneusement les jointures des panneaux, car le ciment peut pénétrer à travers les jointures jusqu'à la surface inférieure du coffrage. Les passages de conduites électriques à travers les panneaux acoustiques notamment sont des endroits critiques.

Il est donc nécessaire de procéder à un contrôle des montages directs ultérieurs qui apportent des résultats satisfaisants sur le plan esthétique et des caractéristiques physiques du bâtiment, sans entraîner en général de frais supplémentaires.

4.3.3 Panneaux combinés pour l'isolation thermique et l'absorption phonique

Des panneaux de murs ou de toiture servant à la fois à l'isolation thermique et à l'absorption du son se trouvent dans la construction légère (p. ex. éléments sandwich en acier ou aluminium fig. 13, panneaux légers en laine de bois avec doublure, etc.) ou dans la construction en dur (p. ex. Durisol).

4.4 Corrections acoustiques

Il convient de déterminer la nécessité d'une correction acoustique dans une halle sur la base des mesures acoustiques. Seules les mesures fournissent des résultats sûrs en vue d'une appréciation correcte. Lorsque l'acoustique d'une halle industrielle a besoin d'être améliorée, le choix des matériaux et le type de montage dépendent d'une série de conditions de compatibilité.

Exemples de conditions:

- la hauteur à disposition pour le montage est limitée (hauteur du local, chemin de roulement de grue, ventilation, etc.);
- du fait de la structure de la charpente, la dimension modulaire des panneaux acoustiques est prédéterminée;
- des matériaux spéciaux à surface compacte sont nécessaires pour les locaux humides et les locaux d'hygiène;
- dans le cas de halles à toiture en redents (sheds) avec versants vitrés, il faut savoir où le matériau acoustique peut être fixé;
- l'installation d'éclairage et/ou de ventilation existante ne doit pas être modifiée.

Il est toujours possible, après analyse des conditions de compatibilité, de trouver une solution permettant d'améliorer l'acoustique du local. Selon la situation, une des trois solutions suivantes sera choisie:

- un plafond acoustique lisse, plein
- un plafond en grille, suspendu (ouvert en haut)
- des correcteurs compacts ou baffles.

Il peut arriver qu'il ne soit pas possible de poser du matériau absorbant sur toute la surface du plafond. Dans ce cas, on examinera si les surfaces absorbantes manquantes peuvent être créées sur les murs.

4.5 Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique

Pour procéder à des appréciations sommaires, il suffit de connaître les valeurs moyennes des coefficients d'absorption α_s de certains groupes de matériaux acoustiques (tableau 5). Les fournisseurs de ces matériaux sont en mesure d'indiquer les coefficients d'absorption de leurs produits.

Matériau	CdA en mm	Fréquence en Hz						
		125	250	500	1000	2000	4000	$\bar{\alpha}_s$
Béton lissé brut	–	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04
Fenêtres fermées	–	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04
Crépi usuel	–	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04
Toiture Durisol	–	0,50	0,73	0,75	0,80	0,85	0,90	0,75
Tôle profilée lisse	–	0,06	0,20	0,15	0,14	0,10	0,05	0,12
Tôle profilée perforée	–	0,50	0,85	0,92	0,85	0,75	0,70	0,76
Pavaroc avec dessin	200	0,35	0,45	0,50	0,70	0,85	0,95	0,63
Plafonds métalliques perforés trous 10–12 %	250	0,35	0,70	0,75	0,85	0,90	0,80	0,72
trous 20–25 %	250	0,40	0,75	0,85	0,90	0,95	0,95	0,80
Panneaux légers en laine de bois 50 mm	50	0,20	0,45	0,60	0,75	0,85	0,90	0,63
Absorbeurs en feuille pour locaux humides	50	0,10	0,70	0,80	0,80	0,75	0,45	0,60
Panneaux pyramidaux en matériau alvéolaire	–	0,15	0,40	0,80	1,05	1,05	1,05	0,75
Crépi acoustique 20 mm	–	0,05	0,15	0,35	0,57	0,72	0,64	0,41
Panneaux de fibres minérales verre/laine de pierre 50 mm		0,20	0,70	1,00	1,00	1,00	1,05	0,83
Baffles, h/d = 1/1	–	0,20	0,40	0,70	0,80	0,85	0,80	0,63

Tableau 5

Coefficients d'absorption acoustique α_s (valeurs moyennes de produits divers).

CdA = Couche d'air

4.6 Coût

Il est très difficile de donner des prix indicatifs de matériaux absorbant le son, car ils ont subi de fortes pressions ces dernières années et dépendent des facteurs suivants:

- surface à couvrir en m²,
- type de montage (grille de lattes, construction métallique, etc.),
- type de construction porteuse (béton, tôle, maçonnerie, etc.),
- hauteur du local,
- accessibilité (local vide ou occupé),
- travaux d'adaptation (éclairage, conduites d'énergie, chemin de roulement pour grue, etc.)
- moment du montage (jour, nuit ou durant le week-end).

Il convient néanmoins d'avoir à disposition une évaluation des coûts des divers systèmes acoustiques (tableau 6).

Matériau, montage	Coût en CHF par m ²	
	Valeur moyenne	Echelle de prix
Enduit acoustique	50.—	40.— à 75.—
Tôle profilée perforée (supplément de prix)	25.—	20.— à 35.—
Panneaux légers en laine sur grille	55.—	40.— à 70.—
Panneaux de fibres minérales (Pavaroc, Armstrong, Rockfon, etc.) sur grille	55.—	42.— à 75.—
Panneaux pyramidaux en mousse	100.—	70.— à 120.—
Plafonds en métal perforé	70.—	55.— à 100.—
Baffles	85.—	55.— à 140.—

Tableau 6
Coût approximatif de systèmes acoustiques complètement montés (2006).

Lorsqu'on projette la construction d'un nouveau bâtiment, il est intéressant de comparer le coût des éventuelles corrections acoustiques et celui du gros-œuvre (uniquement les locaux destinés à la fabrication, sans le bâtiment des bureaux, ni les machines et installations). Selon les expériences faites, ce rapport se situe entre **1 et 2 %** environ. Les grands projets de construction demandent parfois de gros investissements (en francs, non en %) pour les corrections acoustiques. Cependant, il faut bien tenir compte du type d'entreprise: si la construction d'un atelier de serrurerie se chiffre à 1 million de francs, l'investissement acoustique s'élèvera à 10 000 ou 20 000 francs tandis qu'une nouvelle usine chimique coûtant 100 millions de francs consacra 1 à 2 millions de francs aux corrections acoustiques.

Encore un conseil à propos des coûts: demandez des offres à plusieurs entreprises, car il vaut la peine de comparer les prix.

Ici comme ailleurs: le plus cher n'est pas toujours le meilleur!

Comparez aussi le rendement acoustique des systèmes offerts (valeur α_s seulement).

4.7 Exemples

Le montage de matériaux absorbant le bruit s'effectue de différentes manières. Les fig. 14 à 19 présentent quelques possibilités utilisées dans l'industrie.



Figure 14
Panneaux acoustiques en fibres minérales dans
une entreprise de mécanique.



Figure 15
Panneaux acoustiques doublés de laine minérale dans
une ferblanterie.



Figure 16
Baffles en panneaux acoustiques en laine minérale dans l'industrie des boissons (installation de remplissage).



Figure 17
Correcteurs compacts absorbeurs dans un atelier de découpage.



Figure 18
Tôles en métal profilées et perforées dans un atelier de serrurerie (les zones sombres sont perforées).

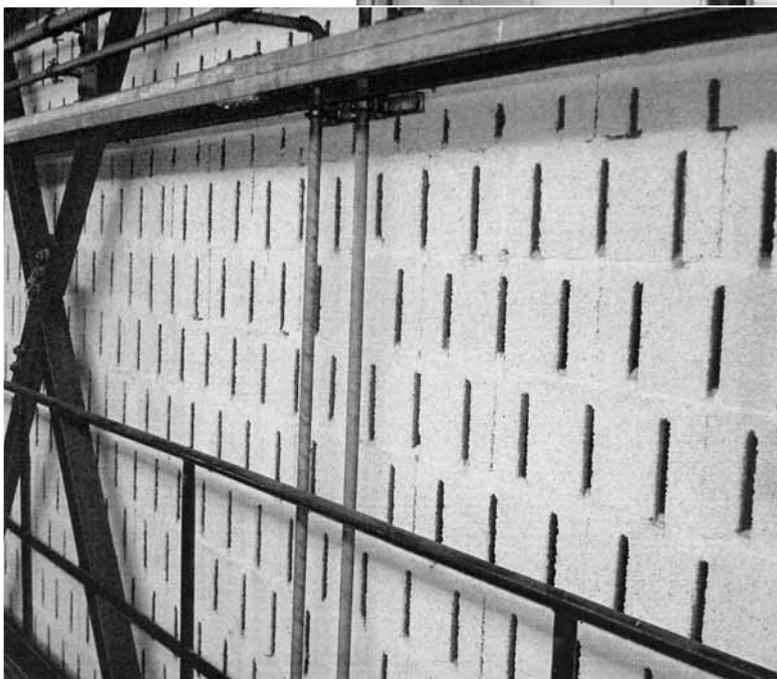


Figure 19
Pierres spéciales fissurées avec vides et éléments amortisseurs dans un atelier de serrurerie.

5 Estimation de l'acoustique des locaux

5.1 Généralités

A l'heure actuelle, nous disposons d'un large éventail de possibilités pour faire des estimations. En fonction du problème et des moyens techniques disponibles, on retiendra l'une des variantes suivantes:

1. calcul des temps de réverbération pour un nouveau bâtiment,
2. calcul des temps de réverbération modifiés sur la base de mesures pour un bâtiment avec corrections acoustiques,
3. calcul du coefficient d'absorption sonore moyen $\bar{\alpha}_s$ pour un nouveau bâtiment,
4. calcul du coefficient d'absorption sonore moyen modifié $\bar{\alpha}_s$ pour un bâtiment avec corrections acoustiques,
5. calcul de la courbe de propagation du son pour un nouveau bâtiment,
6. calcul de la courbe de propagation du son modifiée pour un bâtiment avec corrections acoustiques.

Chaque variante vise à fournir les estimations les plus précises possibles. Les variantes 1 à 4 sont en fait un peu moins précises, car elles se fondent en général sur un champ diffus. Comme ces méthodes de calcul sont encore largement appliquées dans la pratique, nous en présenterons toutefois un exemple. Afin de permettre une comparaison entre les différents procédés, nous calculerons d'abord un exemple avec la méthode classique de détermination du temps de réverbération sans et sous l'influence des diffuseurs puis avec la méthode de la courbe de propagation du son (et la méthode basée sur le remplacement des sources sonores par des sources virtuelles réfléchies par les cloisons, selon le point 2.6.4).

5.2 Méthode classique de calcul des temps de réverbération

5.2.1 Bases de calcul

L'exemple suivant est calculé selon la méthode du point 2.4. Cela signifie que les installations du local (machines en tant que diffuseurs) ne sont pas prises en compte et que les résultats des calculs valent uniquement pour le local vide.

5.2.2 Exemple

On projette un nouveau bâtiment de 40 m de long, 20 m de large et 5,5 m de haut. Les deux longs côtés sont constitués par moitié de fenêtres et de tôle profilée. Les deux petits côtés sont des murs crépis (maçonnerie). Le toit doit être construit en tôle profilée. Les temps de réverbération doivent être calculés pour de la tôle profilée lisse ou perforée.

5.2.3 Calcul des données de base

$V = 40 \times 20 \times 5,5$	= 4 400 m ³
Surface sol/plafond	= 800 m ²
Surface des fenêtres	= 220 m ²
Surface des murs en tôle	= 220 m ²
Murs crépis	= 220 m ²

5.2.4 Calcul de la capacité d'absorption du son

Nous calculons d'abord la capacité d'absorption du son (surface d'absorption équivalente) A du local sans le plafond (tableau 7). Nous tirons les valeurs moyennes α_s du tableau 5.

Nous calculons ensuite (tableau 8) la capacité d'absorption du son pour les deux variantes de plafond ($S = 800 \text{ m}^2$).

Nous calculons enfin la capacité d'absorption totale A_1 et A_2 et les temps de réverbération (tableau 9).

Partie de construction	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	α_s	A										
800 m ² sol en béton	0,02	16	0,03	24	0,03	24	0,04	32	0,05	40	0,05	40
220 m ² fenêtres	0,10	22	0,04	9	0,03	7	0,02	4	0,02	4	0,02	4
220 m ² mur en tôle	0,06	13	0,20	44	0,15	33	0,14	31	0,10	22	0,05	11
220 m ² mur crépi	0,02	4	0,02	4	0,03	7	0,04	9	0,05	11	0,05	11
A_{Total}		55		81		71		76		77		66

Tableau 7
Calcul des données de base acoustiques.

Variantes de plafond	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
	α_s	A										
Variante 1 tôle profilée lisse	0,06	48	0,20	160	0,15	120	0,14	112	0,10	80	0,05	40
Variante 2 tôle profilée perforée	0,50	400	0,85	680	0,92	736	0,85	680	0,75	600	0,70	560

Tableau 8
Capacité d'absorption du son pour les variantes de plafond.

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
Variante 1 $A_1 =$	103	241	191	188	157	106	m ²
$T_1 = \frac{0,163 \times V}{A_1} = \frac{0,163 \times 4400}{A_1} =$	6,95	3,00	3,75	3,80	4,55	6,75	s
Variante 2 $A_2 =$	455	761	807	756	677	626	m ²
$T_2 = \frac{0,163 \times V}{A_2} =$	1,60	0,95	0,90	0,95	1,05	1,15	s
Valeur limite selon figure 9: $T =$	1,85	1,50	1,3	1,2	1,2	1,2	s

Tableau 9
Calcul de la capacité d'absorption totale et des temps de réverbération.

5.2.5 Calcul des temps de réverbération

Les temps de réverbération calculés ou mesurés sont représentés habituellement sous la forme d'un diagramme (fig. 20).

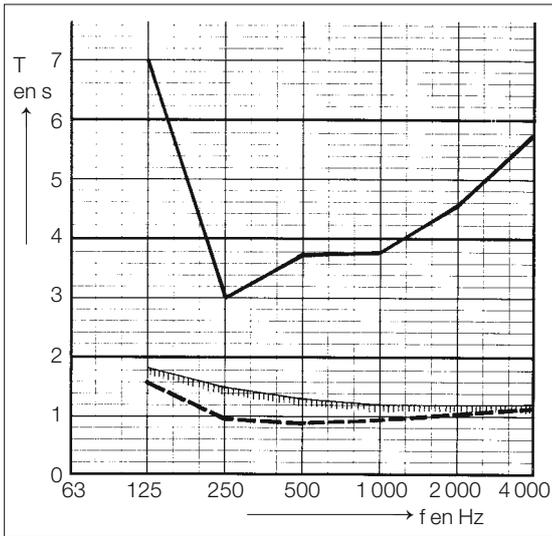


Figure 20
Résultats des calculs des temps de réverbération pour un nouveau bâtiment

- Variante 1: plafond en tôle lisse
- - - Variante 2: plafond en tôle perforée
- ||||| Valeurs limites pour les temps de réverbération

5.3 Calcul informatique des temps de réverbération

En calculant les temps de réverbération pour le même local (point 5.2.2) à l'aide d'un programme informatique qui tient compte de la densité des diffuseurs (parc de machines) et de la forme du local (réflexion des murs), on obtient un résultat différent, en particulier pour les basses fréquences (notamment pour le cas «plafond en tôle lisse»). L'évolution des temps de réverbération estimés pour un local quasiment vide (peu de machines) est représentée figure 21.

Comme le montre la figure 22, les temps de réverbération varient en fonction de l'importance du parc de machines.

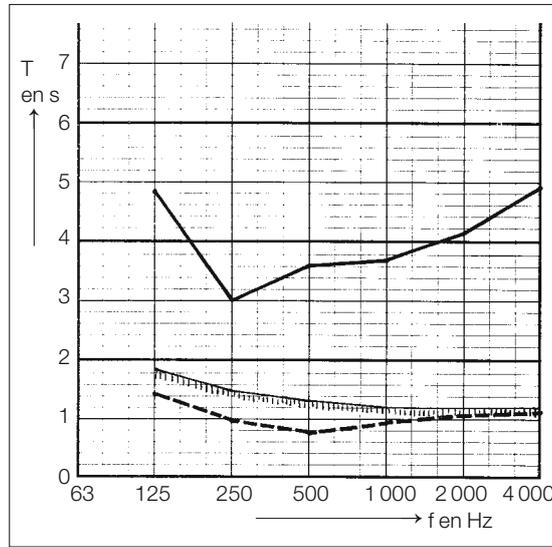


Figure 21
Résultats des calculs informatisés des temps de réverbération pour un nouveau bâtiment (peu de machines installées).

- Variante 1: plafond en tôle lisse
- - - Variante 2: plafond en tôle perforée
- ||||| Valeurs limites pour les temps de réverbération

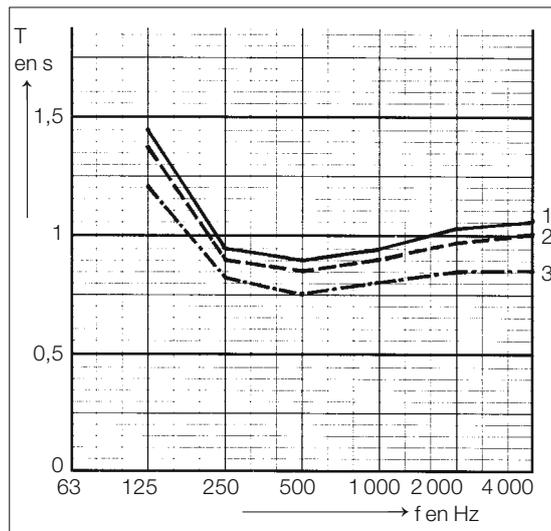


Figure 22
Influence du parc de machines sur les estimations des temps de réverbération calculées par ordinateur, variante 2 (plafond en tôle perforée).

- Courbe 1: petit parc de machines
- Courbe 2: parc de machines moyen
- Courbe 3: grand parc de machines

Critères d'appréciation	Plafond lisse	Plafond perforé
Moyenne des temps de réverbération de 125 – 4000 Hz		
Calcul par la méthode traditionnelle (point 5.2)	4,80 s	1,10 s
Calcul par ordinateur (point 5.3)		
Densité de diffuseurs très faible	4,00 s	1,05 s
faible	3,36 s	1,00 s
forte	2,32 s	0,88 s

Diminution de la distance DL2		
Densité de diffuseurs très faible		
faible	1,2 dB	2,9 dB
forte	1,8 dB	3,7 dB
	3,2 dB	5,3 dB

Tableau 10
Comparaison des estimations calculées par différents procédés.

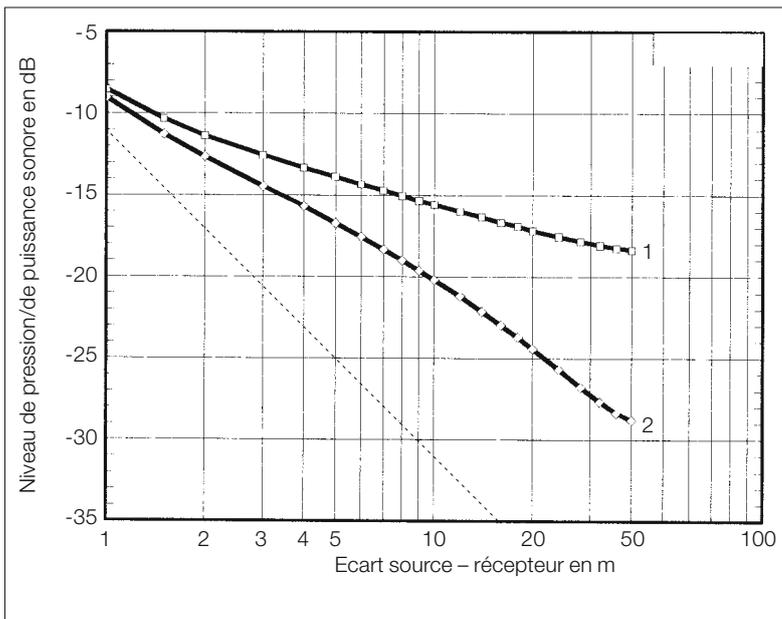


Figure 23
Courbes de décroissance sonore spatiale SAK pour un petit parc de machines.

Courbe 1: plafond en tôle lisse

Courbe 2: plafond en tôle perforée

La droite à forte pente descendante représente la courbe de décroissance sonore spatiale à l'extérieur (baisse de 6 dB par doublement de la distance).

Les estimations par ordinateur permettent en outre de calculer les valeurs DL2 pour des densités de diffuseurs variables (parc de machines d'importance variable).

5.4 Calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale SAK et détermination de DL2

Les calculs du point 5.3 nous montrent directement l'évolution envisageable des courbes de décroissance sonore spatiale ainsi que la valeur DL2 nécessaire pour l'appréciation. La figure 23 présente les résultats pour les variantes 1 et 2 pour un petit parc de machines. Les résultats pour DL2 sont rassemblés dans le tableau 10.

5.5 Examen des résultats des calculs

En comparant les résultats des calculs avec les valeurs limites, on constate que dans le cas du plafond en tôle profilée lisse (variante 1) les valeurs limites sont nettement dépassées. Dans le cas du plafond en tôle profilée perforée (variante 2), on obtient des valeurs qui satisfont aux exigences.

5.5.1 Comparaison

A ce stade, il est intéressant de comparer les résultats des estimations rassemblées dans le tableau 10.

5.5.2 Interprétation

a. Temps de réverbération

Comme prévu, les deux méthodes de calcul (traditionnelle/informatique) ne donnent pas de différence notable pour la variante «plafond en tôle lisse» lorsque le local est vide. En revanche, si l'on tient compte des installations dans les locaux (machines en tant que diffuseurs), on obtient des résultats totalement différents.

On peut faire la même constatation dans la pratique (comme mentionné dans les principes) bien que, dans de nombreux cas, les temps de réverbération estimés ne correspondent pas aux valeurs mesurées dans des locaux occupés même si l'on apporte une correction.

Pour la variante «plafond en tôle perforée», les différences entre les modes de calcul sont relativement minimales, car la densité des diffuseurs n'influence plus tellement les résultats.

b. Diminution du niveau sonore par doublement de la distance (diminution de la distance DL2)

Par comparaison au temps de réverbération, la diminution de la distance DL2 livre des informations plus précises sur les conditions acoustiques envisageables. Il est par exemple intéressant de comparer une halle sans plafond acoustique avec un grand parc de machines et une halle quasiment vide dotée d'un plafond acoustique. On peut constater que les temps de réverbération sont deux fois moins élevés dans une halle vide avec plafond acoustique. La diminution de la distance nous livre en revanche de meilleurs résultats pour une halle avec grand parc de machines sans plafond acoustique. Cette seconde estimation se confirme en effet dans la pratique.

5.6 Coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$

Les moyennes de $\bar{\alpha}_s$ sont déterminées grâce à la capacité d'absorption A (point 5.2.4, calcul des temps de réverbération) et à la surface totale du local. On établit d'abord les valeurs moyennes de A pour toutes les fréquences:

$$\text{variante 1: } A_{m1} = 164 \text{ m}^2$$

$$\text{variante 2: } A_{m2} = 680 \text{ m}^2$$

La surface totale du local est $S_V = 2260 \text{ m}^2$.

On obtient donc:

$$\text{variante 1: } \bar{\alpha}_{s1} = \frac{A_{m1}}{S_V} = \frac{164}{2260} = 0,073$$

$$\text{variante 2: } \bar{\alpha}_{s2} = \frac{A_{m2}}{S_V} = \frac{680}{2260} = 0,30$$

La valeur recherchée $\bar{\alpha}_s \geq 0,25$ selon le point 3.3 est déjà obtenue pour la variante 2.

La méthode informatique est par contre plus élégante puisqu'elle nous livre directement les valeurs $\bar{\alpha}_s$ recherchées.

$$\text{Variante 1: } \bar{\alpha}_{s1} = 0,08$$

$$\text{Variante 2: } \bar{\alpha}_{s2} = 0,32$$

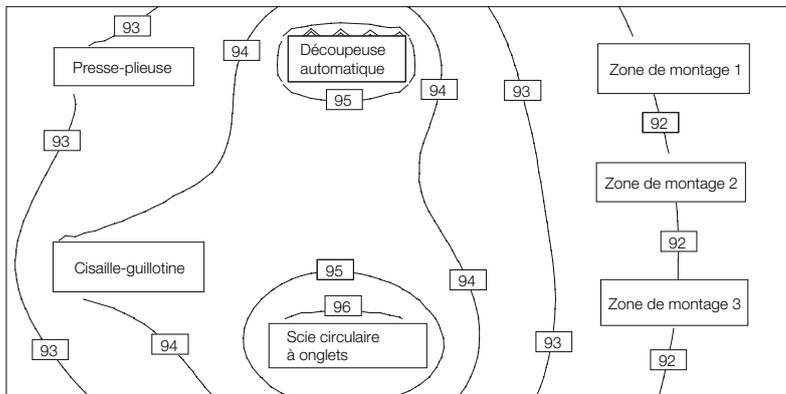


Figure 24
Répartition des niveaux de pression sonore dans une halle de fabrication sans correction acoustique ($DL_2 = 1,8 \text{ dB}$, $DL_f = 14,2 \text{ dB}$).
Le niveau de pression sonore estimé dans toute la halle se situe entre 92 et 96 dB(A).

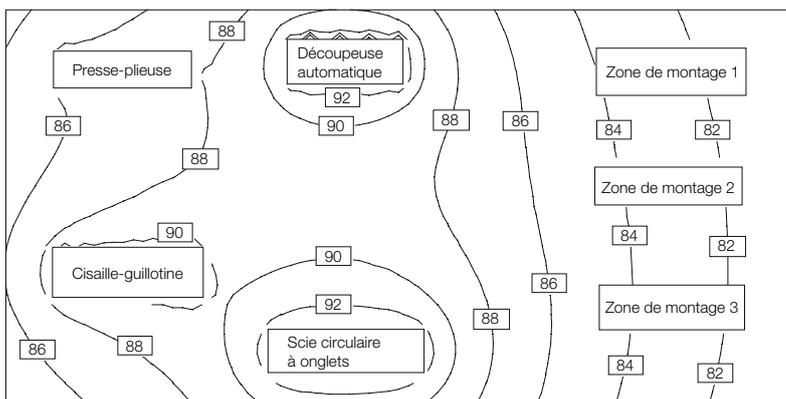


Figure 25
Répartition des niveaux de pression sonore dans une halle de fabrication avec des corrections acoustiques ($DL_2 = 4,2 \text{ dB}$, $DL_f = 8,2 \text{ dB}$).
Le niveau de pression sonore tombe à environ 82 – 84 dB(A) dans la direction de la zone de montage.

5.7 Estimation de la répartition des niveaux sonores

L'estimation de la répartition des niveaux sonores dans un local de travail (topographie acoustique) est sans doute la méthode de prévision la plus efficace. Sur ce plan, il est surtout intéressant de comparer les locaux avec et sans corrections acoustiques. Pour ce faire, il faut connaître les valeurs d'émission des machines et installations (niveau de puissance acoustique L_W) ainsi que la disposition des machines. Une fois de plus, ces calculs ne sont possibles qu'avec l'aide d'un programme informatique performant. Un exemple de calcul pour le même local (principe: caractéristiques des locaux selon le point 5.2.3) est présenté (pour de raisons techniques, malheureusement seulement en noir et blanc) aux figures 24 (sans corrections acoustiques) et 25 (avec corrections acoustiques). Les calculs se basent sur les niveaux d'émission sonore suivants:

- Presse plieuse: $L_W = 95 \text{ dB(A)}$
- Cisaille-guillotine: $L_W = 102 \text{ dB(A)}$
- Découpeuse automatique: $L_W = 105 \text{ dB(A)}$
- Scie circulaire à onglets pour aluminium: $L_W = 107 \text{ dB(A)}$
- Zones de montage 1-3: $L_W = 80 \text{ dB(A)}$

Les niveaux sonores au poste de travail correspondants (niveaux de pression sonore) sont inférieurs de 10 dB(A) environ.

Interprétation

Sans correction acoustique (fig. 18), le niveau de pression sonore estimé s'établit à 92 dB(A). Il faut donc porter des protecteurs d'ouïe dans toute la halle. Les corrections acoustiques (plafond acoustique) par contre ramènent le niveau de pression sonore à 82 – 84 dB(A) dans la zone de montage. Dans ce cas, le port de protecteurs d'ouïe n'est indispensable qu'à proximité des quatre machines.

Cet exemple démontre l'efficacité des corrections acoustiques et met en lumière une méthode d'estimation simple et accessible.

5.8 Résumé

Ces exemples prouvent que des appréciations sommaires de l'acoustique des locaux, et notamment des locaux inoccupés et réverbérants, peuvent être effectuées au moyen de méthodes simples et accessibles à tous. Par contre, pour les estimations plus précises, il faut recourir à des moyens appropriés. C'est le cas pour les corrections des locaux à réverbération relativement importante. Il convient alors de s'adresser à un spécialiste de l'acoustique dont une liste est fournie par la Suva (liste des ingénieurs conseils n° 86021).

Les calculs nous prouvent que les corrections acoustiques dans les locaux industriels améliorent sensiblement les conditions de travail.

6 Parois mobiles

6.1 Introduction

La qualité acoustique des locaux peut également être influencée par des systèmes de séparation. Il faut néanmoins préciser que les données de base nécessaires à l'appréciation sommaire diffèrent considérablement de celles que nous venons de présenter pour l'acoustique architecturale. Aussi, il nous a semblé préférable de développer ce point dans un nouveau chapitre.

Les parois mobiles sont destinées à séparer les zones de travail bruyantes des zones calmes, mais leur efficacité est variable.

6.2 Effet acoustique d'une paroi mobile

Les caractéristiques acoustiques des parois mobiles sont représentées à la figure 26:

Le bruit direct (1) atteint le mur, une partie (2) le traverse et parvient au récepteur. Les fréquences plus basses passent au-dessus du bord du mur (3). Une partie du bruit est réfléchi sur le mur (4) et au plafond (5).

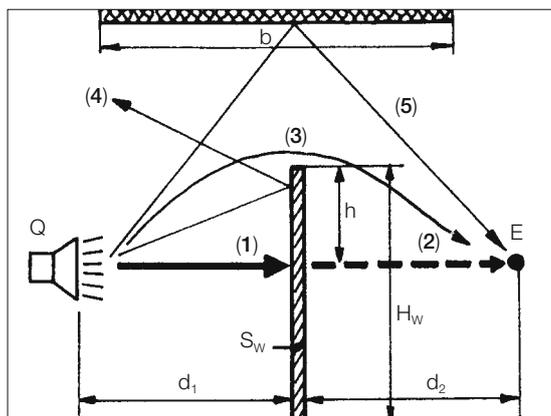


Figure 26
Caractéristiques acoustiques des parois mobiles.

Q = source sonore
E = récepteur
SW = paroi mobile
 d_1 = écart source – paroi
 d_2 = écart paroi – récepteur
 H_w = hauteur de la paroi
h = hauteur efficace de la paroi

Sans insister sur un élément sonore en particulier, nous pouvons dresser une liste des caractéristiques requises pour les parois mobiles.

6.3 Caractéristiques requises

- Les parois mobiles doivent permettre une isolation satisfaisante du son aérien. Il suffit en général d'utiliser un matériau dont la valeur d'isolation acoustique pondérée R' est ≥ 20 dB.
- Le côté de la paroi exposé au bruit doit être conçu dans un matériau absorbant, de telle sorte que le coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$ soit $\geq 0,7$.
- La hauteur efficace h doit être aussi importante que possible puisque c'est d'elle seule et non pas de la hauteur H que dépend l'efficacité de la paroi mobile.
- La paroi mobile doit être installée le plus près possible de la source sonore, d_1 sera donc le plus petit possible.
- Pour éviter des réflexions au sol, la fente dans le sol doit être la plus petite possible.
- Il est essentiel de poser au plafond un revêtement absorbant au-dessus de la paroi mobile. La largeur b requise est fonction de l'emplacement de la source sonore mais représente généralement 1,5 à 2 fois la hauteur du local.

6.4 Efficacité d'une paroi mobile

L'efficacité d'une paroi mobile est déterminée par l'**indice de qualité d'isolement contre les sons aériens** ΔL_e . Cette méthode consiste à mesurer le niveau de pression sonore à un point à isoler, avec et sans paroi mobile, et à calculer la différence ΔL_e . Le maximum théorique que l'on peut atteindre est de 15 dB. Il est difficile d'obtenir des résultats précis étant donné que ΔL_e varie en fonction de la fréquence. C'est pourquoi il est préférable de présenter ici un procédé d'évaluation simplifié qui fournit des résultats satisfaisants lorsqu'on mesure le niveau sonore total pondéré en dB(A) sur les machines émettant des bruits normaux.

Les calculs sont effectués à l'aide des valeurs de la figure 27 (voir aussi point 6.2):

On définit en premier lieu l'indice théorique de qualité d'isolement contre les sons aériens ΔL_z à l'aide du diagramme (figure 28). Pour simplifier, on suppose que $a = b$ ou $d_1 = d_2$. A des distances de plus de 5 m, on peut simplifier davantage en établissant que $a = d_1$ ou $b = d_2$.

L'indice de qualité d'isolement contre les sons aériens ΔL_e d'une paroi mobile dépend largement de la capacité d'absorption du plafond. Plus le coefficient moyen d'absorption acoustique $\bar{\alpha}_D$ est faible, plus ΔL_z diminue. En d'autres termes:

plus le plafond est absorbant, plus la paroi mobile est efficace.

Cette relation ressort nettement à la figure 29.

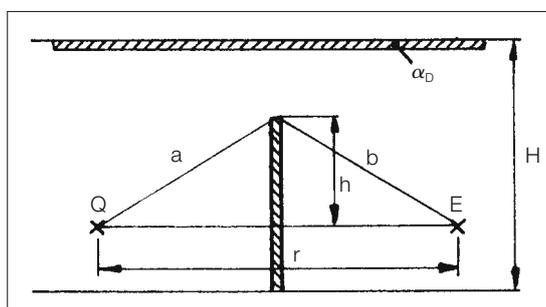


Figure 27
 α_D = coefficient d'absorption du plafond
 h = hauteur efficace de la paroi

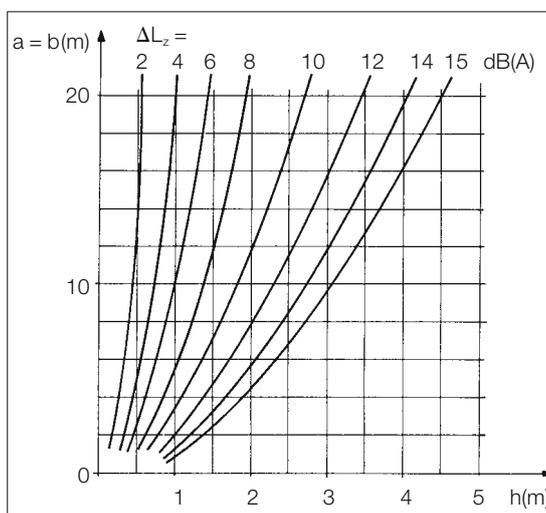


Figure 28
 Détermination de l'indice théorique de qualité d'isolement contre les sons aériens ΔL_z en fonction des écarts $a = b$ et de la hauteur efficace h de la paroi.

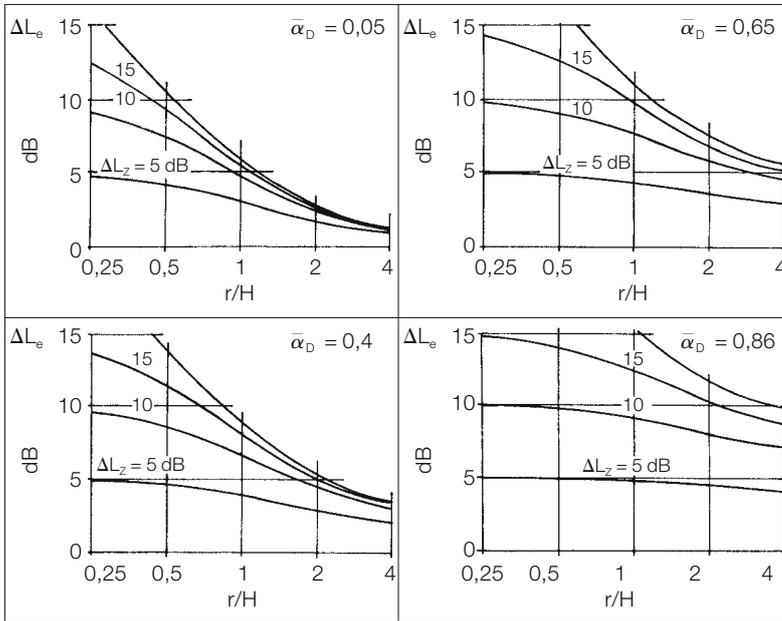


Figure 29
Indice de qualité d'isolement contre les sons aériens ΔL_e en fonction de l'indice théorique d'isolation contre les sons aériens ΔL_z , de la capacité d'absorption du plafond et du rapport r/H pour des halles basses.

- $\bar{\alpha}_D = 0$: béton, plafond en métal profilé
- $\bar{\alpha}_D = 0,4$: plafond acoustique, couche du milieu (p. ex. matériaux intégrés dans le coffrage)
- $\bar{\alpha}_D = 0,65$: plafond acoustique de qualité, courant dans les locaux industriels
- $\bar{\alpha}_D = 0,86$: plafond acoustique de très bonne qualité, uniquement dans les locaux spéciaux.

6.5 Exemple de calcul

La source sonore et le récepteur se trouvent à 6 m de la paroi mobile. La hauteur efficace du mur est de 1,5 m et le local a une hauteur de 6 m. On a intégré, dans le milieu du plafond, une couche acoustique. Quelle est l'efficacité de cette paroi?

Données: $a = b = 6 \text{ m}$
 $h = 1,5 \text{ m}$
 $r = 12 \text{ m}$
 $H = 6 \text{ m}$
 $\bar{\alpha}_D = 0,4$

Déterminer: ΔL_e

Solution: Selon le diagramme
 $\Delta L_z = 11 \text{ dB(A)}$
 $r/H = 12/6 = 2$

Par conséquent

$\Delta L_e = 5 \text{ dB(A)}$

Ce résultat peut surprendre à première vue. Pourtant, il correspond aux expériences pratiques et indique nettement les conditions dans lesquelles la paroi mobile est la plus efficace.

6.6 Exemples tirés de la pratique

Nous avons retenu trois exemples présentés aux figures 30 à 32. La paroi mobile de la figure 30 est quasiment inefficace puisque le plafond n'a pas de pouvoir absorbant (la diminution du niveau sonore mesurée par des moyens techniques est de 2 à 3 dB(A) selon l'écart). La figure 31 donne un exemple de séparation dans un local par un «écran» placé à environ 3 mètres du sol et atteignant le plafond. Son efficacité est tout à fait comparable à celle d'une paroi mobile. Le but d'un écran étant de créer une séparation acoustique des différentes zones de bruit, il se prête en particulier aux locaux de grandes dimensions. La figure 32 présente un modèle de paroi mobile utilisé dans l'industrie.

6.7 Résumé

Les bases de calcul présentées dans ce chapitre permettent de conclure que les parois mobiles ne réduisent le niveau sonore que de 10 dB(A) environ. En effet, leur efficacité dépend largement du pouvoir absorbant du plafond.



Figure 30
Paroi mobile peu efficace (plafond non absorbant).



Figure 31
Ecran de séparation acoustique des zones de travail très bruyantes.



Figure 32
Exemple d'une paroi mobile industrielle à grande résistance mécanique utilisée dans les entreprises de constructions métalliques (source: Otto Ramseyer, Berne).

7 Exemples tirés de la pratique

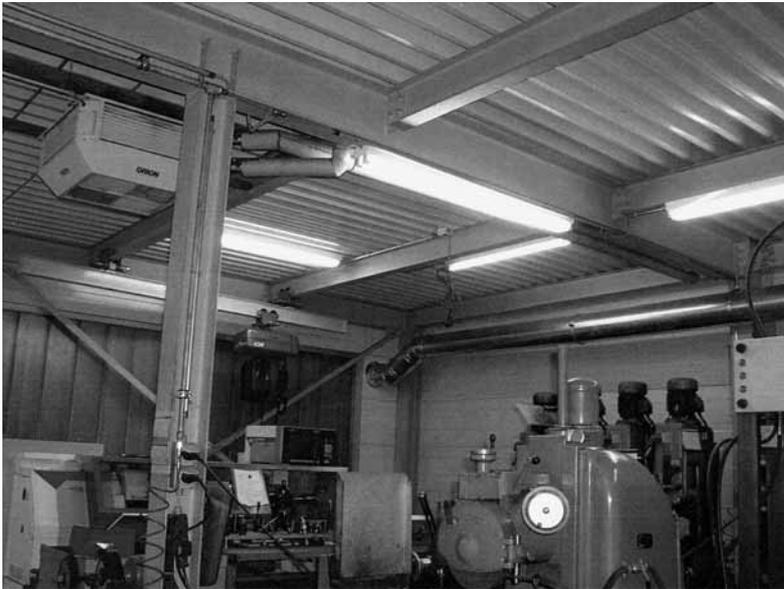


Figure 33
Construction métallique (tôle profilée aux murs et au plafond).



Figure 34
Transformation des matières plastiques, bâtiment en dur (murs: maçonnerie, plafond: béton).

7.1 Généralités

Nous venons de voir que l'appréciation de la qualité acoustique des locaux peut s'effectuer de différentes façons. Alors que nos calculs se fondaient sur le temps de réverbération, nous passons aujourd'hui progressivement à l'appréciation par diminution de la distance (en effet, la plupart des acousticiens ne peuvent mesurer que les temps de réverbération), ce qui explique pourquoi nous avons retenu plusieurs exemples différents.

7.1.1 Temps de réverbération

Le tableau 11 rassemble les valeurs moyennes établies à partir des résultats d'un grand nombre de mesures des temps de réverbération (40 locaux de «mauvaise» et 24 de «bonne» qualité acoustique). Le volume du local n'a pas été pris en compte.

Le résultat du tableau 11 ne surprend guère. Si la moyenne de toutes les fréquences se situe à 2,8 s pour les locaux de «mauvaise» qualité, elle est égale à 1,0 s pour les locaux de «bonne» qualité.

Les «mauvais» locaux peuvent être répartis en deux catégories:

- les constructions métalliques avec tôle profilée (fig. 33)
- bâtiment en dur en béton et briques ou ciment (fig. 34).

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
Locaux de «mauvaise» qualité (sans correction acoustique)	2,95	2,89	3,07	3,09	2,72	2,01	s
Locaux de «bonne» qualité (avec correction acoustique)	1,23	1,04	0,97	0,96	0,96	0,85	s

Tableau 11
Moyenne des temps de réverbération mesurés.

On peut constater que les temps de réverbération diffèrent considérablement entre les deux types de construction. Les valeurs moyennes de 26 locaux jugés «mauvais», appartenant à ces deux catégories, sont rassemblées à la figure 35.

On peut déduire de la figure 35 que dans les constructions métalliques les temps de réverbération maximums correspondent aux moyennes et hautes fréquences. Cela implique surtout des conditions acoustiques défavorables pendant les travaux de transformation du métal, car les principales composantes sonores émises par les machines et outils utilisés habituellement (p. ex. rectifieuses) se situent justement dans ces fréquences. Des matériaux acoustiques efficaces devront remédier à cette situation.

Dans les bâtiments en dur par contre, il faut prévoir des mesures plus importantes pour réduire efficacement les temps de réverbération étant donné que les valeurs sont bien trop élevées dans les basses fréquences. Il faut par exemple monter des matériaux acoustiques avec une couche d'air nettement plus grande que dans le cas des constructions métalliques.

Une présentation détaillée des locaux de «bonne» qualité est superflue, car le but recherché est le respect des exigences relatives aux temps de réverbération.

7.1.2 Taux de décroissance spatiale

Pour les critères d'appréciation, à savoir le taux de décroissance spatiale DL2 et l'amplification du niveau de pression acoustique DLf, nous disposons de nombreuses mesures prouvant l'importance des corrections acoustiques. Les moyennes du tableau 9 sont extraites de la directive VDI 3760 et sont le résultat de mesures effectuées dans une certaine de halles industrielles.

Il ressort clairement du tableau 12 que les exigences du point 3.4 ($DL2 \geq 4$ dB) ne peuvent pas être satisfaites sans correction acoustique.

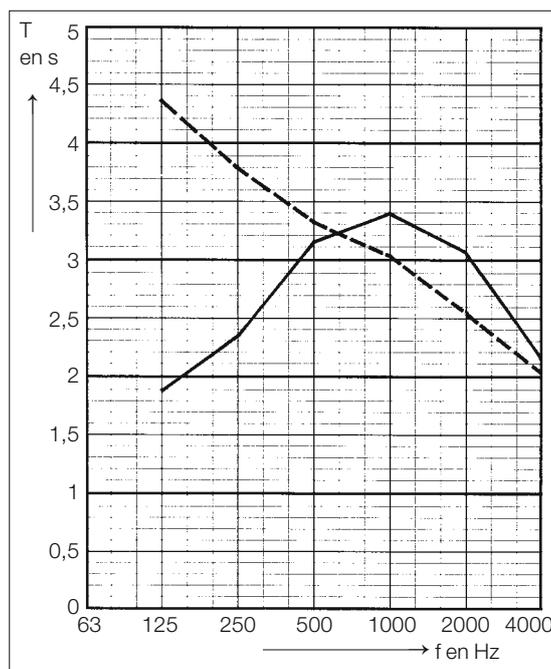


Figure 35
Valeurs moyennes pour des constructions typiques.
— — — Constructions métalliques avec tôle profilée
- - - - - Bâtiment en dur en béton et briques ou ciment

Etat en dB	DL2 en dB	DLf en dB
Locaux bas ($H \leq 5$ m) sans correction acoustique	3,4	14,5
Locaux bas ($H \leq 5$ m) avec corrections acoustiques	4,9	8,8
Locaux hauts ($5 \text{ m} < H \leq 10$ m) sans correction acoustique	3,1	10,9
Locaux hauts ($5 \text{ m} < H \leq 10$ m) avec corrections acoustiques	4,2	9,1

Tableau 12
Valeur moyenne des paramètres DL2 et DLf à des distances moyennes (5 à 16 m).

7.2 Exemples réalisés

Ce chapitre présente quelques exemples de mesures que la Suva a rassemblés. Ils concernent des locaux industriels et artisanaux déjà corrigés. Parmi ces exemples, on trouvera, outre les informations sur l'efficacité des mesures prises, des indications sur leur coût.

Exemple 1

Projet: atelier de découpage

Volume du local: $V = 636 \text{ m}^3$

Surface du plafond: $S = 180 \text{ m}^2$

Indice 1: avant correction acoustique

Indice 2: après correction acoustique

Mesures de correction: montage de panneaux Idikell B 208 au plafond (70 % de la surface) et sur une paroi intérieure (2 rangées), (voir fig. 36 et 37)

Coût: CHF 17 000. — ou CHF 92. —/m²

Appréciation

Les exigences concernant le temps de réverbération sont remplies. Comme le local est relativement étroit et long, la valeur $\bar{\alpha}_s$ après correction est relativement faible. Néanmoins le résultat est bon, particulièrement en ce qui concerne la diminution moyenne du niveau sonore.

Temps de réverbération (exemple 1)

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
T_1 (avant correction)	2,05	1,75	1,7	1,8	1,7	1,6	s
T_2 (après correction)	1,4	0,95	0,7	0,7	0,8	0,8	s
Autorisé	1,45	1,2	1,05	0,95	0,95	0,95	s

Facteur moyen d'absorption: $\bar{\alpha}_{s,1} = 0,10$
 $\bar{\alpha}_{s,2} = 0,20$

Taux moyen de décroissance spatiale: $DL2_1 = 2,6 \text{ dB}$
 $DL2_2 = 4,2 \text{ dB}$



Figure 36
 Vue de l'atelier de découpage (exemple 1). Un plafond acoustique a été installé.

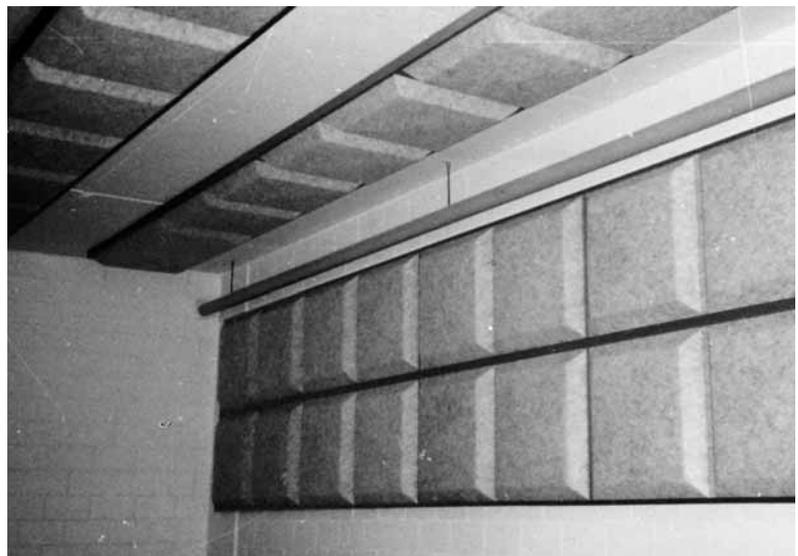


Figure 37
 Revêtement du plafond et d'une paroi.

Exemple 2

Projet: atelier d'étampage et tôlerie

Volume du local: $V = 2\,180\text{ m}^3$

Surface du plafond: $S = 495\text{ m}^2$

Indice 1: avant correction acoustique

Indice 2: après correction acoustique

Mesures de correction: montage de correcteurs absorbeurs compacts (voir fig. 38 et 39)

Coût: CHF 48 500. — ou CHF 98. —/m²

Appréciation

La pose de correcteurs absorbeurs compacts sur le plafond en béton a entraîné une réduction sensible des temps de réverbération. Les exigences acoustiques sont remplies.

Temps de réverbération (exemple 2)

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
T ₁ (avant correction)	2,0	2,0	2,0	1,9	1,8	1,6	s
T ₂ (après correction)	1,45	1,1	0,95	0,9	0,9	0,8	s
Autorisé	1,4	1,15	1,0	0,9	0,9	0,9	s

Facteur moyen d'absorption: $\bar{\alpha}_{s,1} = 0,13$
 $\bar{\alpha}_{s,2} = 0,25$

Taux moyen de décroissance spatiale: DL2₁ = 1,8 dB
 DL2₂ = 3,9 dB



Figure 38
Atelier d'étampage (exemple 2) avant correction acoustique avec son plafond en béton brut.



Figure 39
Après correction acoustique.

Exemple 3

Projet: ferblanterie pour canalisations d'air

Volume du local: $V = 2\,720\text{ m}^3$

Surface du plafond: $S = 800\text{ m}^2$

Indice 1: avant correction acoustique

Indice 2: après correction acoustique

Mesures de correction: pose d'un plafond acoustique Rockfon (voir fig. 40 et 41)

Coût: CHF 31 500. — ou CHF 42. —/m²

Appréciation

Les temps de réverbération ont été fortement réduits grâce au plafond acoustique choisi.

En raison de la hauteur relativement faible du local (3,4 m), ils sont très nettement inférieurs aux valeurs limites autorisées dans les fréquences élevées.

Temps de réverbération (exemple 3)

Fréquence	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
T ₁ (avant correction)	2,9	2,35	1,95	1,9	1,8	1,5	s
T ₂ (après correction)	1,5	0,95	0,6	0,7	0,8	0,75	s
Autorisé	1,75	1,5	1,25	1,1	1,1	1,1	s

Facteur moyen d'absorption: $\bar{\alpha}_{s,1} = 0,11$
 $\bar{\alpha}_{s,2} = 0,25$

Taux moyen de décroissance spatiale: DL2₁ = 2,4 dB
 DL2₂ = 4,4 dB



Figure 40
Ferblanterie-plomberie (exemple 3) avant correction acoustique avec un plafond en béton brut.



Figure 41
Après correction acoustique.

Exemple 4

Projet: unité de confection dans l'industrie des matières plastiques

Volume du local: 9 600 m³

Surface du plafond: 1 600 m²

Indice 1: avant correction acoustique

Indice 2: après correction acoustique

Mesures de correction: pose d'un plafond acoustique en fibres minérales Pavaroc, Fissura 3, suspendu à 220 mm au-dessous du plafond

Coût: CHF 83 000. — ou CHF 52. —/m²

Courbes de décroissance sonore spatiale SAK

La figure 42 représente les courbes de décroissance sonore spatiale SAK relatives aux deux états, c.-à-d. avant et après correction. Il faut remarquer à ce propos que le local était vide avant la correction, donc sans machines ni installations. Cela explique également le niveau extrêmement bas de DL2.

Appréciation

Le plafond acoustique aménagé donne des résultats remarquables. La plus forte réduction du niveau de pression sonore peut être constatée en particulier à des distances supérieures à 10 m de la source sonore.

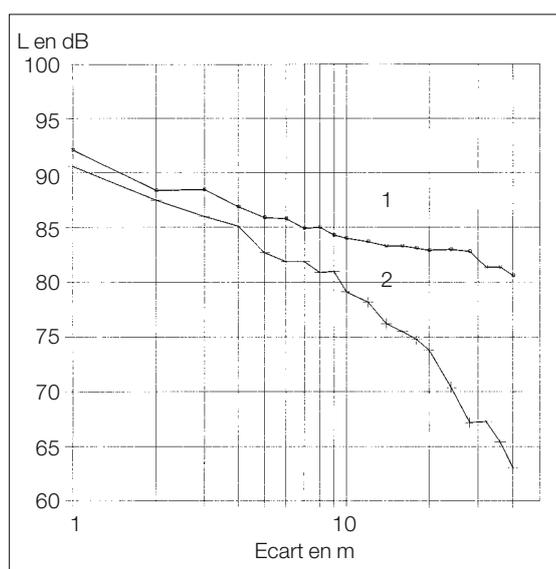


Figure 42

Courbes de décroissance sonore spatiale dans une unité de confection dans l'industrie des matières plastiques.

Courbe 1 avant correction:

DL2 = 1,7 dB, DLf = 14,5 dB

Courbe 2 après correction:

DL2 = 4,6 dB, DLf = 7,6 dB

Exemple 5

Projet: menuiserie d'aluminium

Volume du local: 3 775 m³

Surface du plafond: 624 m²

Indice 1: avant correction acoustique,

Indice 2: estimations avec correction acoustique

Indice 3: résultats des mesures après correction acoustique

Mesures de correction: pose au plafond d'un panneau doublé de laine minérale (Rockfon Industriebats, 50 mm d'épaisseur)

Courbes de décroissance sonore spatiale SAK

La figure 45 présente les courbes de décroissance sonore spatiale SAK avant (1) et après correction (3) ainsi que des estimations avec correction (2).

Appréciation

La valeur atteinte avec $DL2 = 3,8 \pm 0,2$ dB correspond aux estimations. La prise de mesures supplémentaires apparaît dans le cas présent inutile et peu appropriée. Il résulte par exemple du revêtement d'une bande d'une hauteur avoisinant 2,5 m sur la cloison longitudinale extérieure une augmentation de $DL2$ de moins de 0,1 dB

Cet exemple illustre bien l'efficacité des matériaux acoustiques installés. Il est également frappant de voir que les estimations de $DL2$ coïncident avec les mesures lorsque l'on utilise le programme informatique présenté dans cette publication.



Figure 43
Menuiserie d'aluminium, avant correction acoustique, avec un plafond en tôle perforée.



Figure 44
Après correction acoustique.

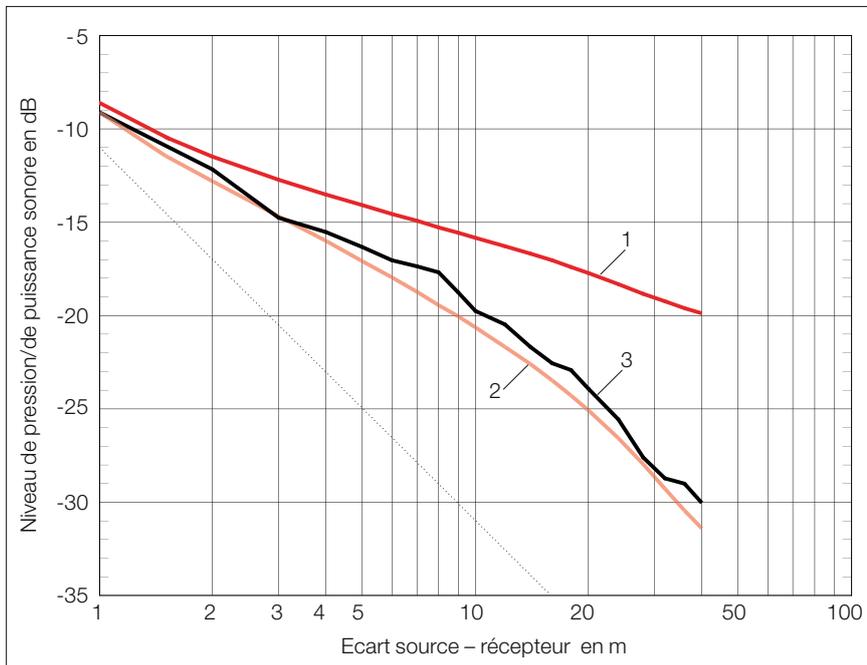


Figure 45
 Courbes de décroissance sonore spatiale dans une menuiserie d'aluminium.

- courbe 1: avant correction acoustique DL2 = 1,8 dB
- courbe 2: estimations avec un plafond acoustique DL2 = 3,8 dB
- courbe 3: résultats des mesures avec un plafond acoustique DL2 = 3,8 dB

8 Conclusion

Nous avons démontré à quel point l'acoustique des locaux industriels influe sur l'aménagement de postes de travail «humains». Si le coût de l'insonorisation paraît souvent très élevé, il ne représente qu'une part relativement faible du coût total d'une construction.

Nos estimations sont aujourd'hui beaucoup plus fiables que par le passé grâce aux nouveaux procédés de mesure et d'appréciation (comme les cartes de bruit), qui permettent de démontrer l'efficacité des surfaces absorbantes dans un local. Simultanément, ces méthodes modernes mettent en évidence les limites de telles corrections acoustiques.

Il n'est plus concevable aujourd'hui que le maître d'ouvrage, l'entrepreneur, l'architecte ou l'ingénieur fasse l'impasse sur les mesures acoustiques dans un bâtiment industriel. Il existe non seulement des recommandations en la matière mais aussi de nouvelles prescriptions légales sur l'art de construire. C'est donc pour sensibiliser le lecteur à ces problèmes que nous venons d'énumérer les différentes possibilités d'estimations, d'appréciation et de mise en pratique.

Il existe à l'heure actuelle des bâtiments industriels exemplaires sur le plan de l'acoustique (voir par exemple figure 46).



Figure 46
Usine avec des baffles au plafond.

Référence bibliographiques

- (1) Lips, W. Akustik für HLKS-Ingenieure. Fachhochschule Zentralschweiz, Hochschule für Technik und Architektur, Lucern, 2006.
- (2) VDI 3760 Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen, 1996
- (3) EN ISO 11690-1 Acoustique – Pratique recommandée pour la conception de lieux de travail à bruit réduit contenant des machines – Partie 1: Stratégies de réduction du bruit (ISO 11690-1: 1996), 1997
- (4) EN ISO 11690-2 Acoustique – Pratique recommandée pour la conception de lieux de travail à bruit réduit contenant des machines – Partie 2: Moyens de réduction du bruit (ISO 11690-2:1996), 1997
- (5) EN ISO 11690-3 Acoustique – Pratique recommandée pour la conception de locaux de travail à bruit réduit contenant des machines – Partie 3: Propagation du son et prévision du bruit réduit dans les locaux de travail. (ISO/TR 11690-3:1997), 1999
- (6) DataKustik Handbuch zum Computerprogramm Cadna/SAK, 1994
- (7) Probst, W. Schallabstrahlung und Schallausbreitung, Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund, Fb 556, 1988
- (8) – Documentation sur les produits de la société Sonotec Schallschutz AG, Villmergen

Sauf indication contraire, tous les résultats des mesures figurant dans cette brochure sont extraits de la collection de la Suva.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements aux entreprises qui nous ont autorisés à publier des photographies de leurs locaux de fabrication.

