



Acoustique des locaux industriels

Informations destinées aux projeteurs,
architectes et ingénieurs

La présente publication traite de la propagation du bruit dans les locaux industriels. Il s'agit d'un phénomène que l'on peut réduire sensiblement grâce à des mesures de correction acoustique. Les projeteurs, architectes et ingénieurs trouveront dans ce document des informations importantes pour optimiser l'acoustique des locaux.

| | | | |
|---|-----------|---|-----------|
| 1 Introduction | 4 | 5 Estimation de l'acoustique des locaux | 22 |
| 2 Principes de l'acoustique des locaux | 6 | | |
| 2.1 Propagation du son | 6 | 5.1 Généralités | 22 |
| 2.2 Coefficient d'absorption acoustique | 6 | 5.2 Méthode classique de calcul des temps de réverbération | 22 |
| 2.3 Temps de réverbération | 6 | 5.2.1 Bases de calcul | 22 |
| 2.4 Aire d'absorption acoustique équivalente | 7 | 5.2.2 Exemple | 22 |
| 2.5 Réduction du niveau sonore au moyen de mesures de correction acoustique | 8 | 5.2.3 Calcul des données de base | 22 |
| 2.6 Taux de décroissance spatiale DL2 | 8 | 5.2.4 Calcul de la capacité d'absorption du son | 23 |
| 2.6.1 Introduction | 8 | 5.2.5 Calcul des temps de réverbération | 24 |
| 2.6.2 Normes et directives relatives à DL2 | 9 | 5.3 Calcul informatique des temps de réverbération | 24 |
| 2.6.3 Détermination de DL2 à partir de mesures | 10 | 5.4 Calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale et détermination de DL2 | 25 |
| 2.6.4 Estimations à partir de DL2 établi par calcul | 11 | 5.5 Évaluation des résultats des calculs | 25 |
| | | 5.5.1 Comparaison | 25 |
| | | 5.5.2 Interprétation | 26 |
| | | 5.6 Coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$ | 26 |
| | | 5.7 Estimation de la répartition des niveaux sonores | 27 |
| | | 5.8 Résumé | 28 |
| 3 Exigences | 13 | 6 Cloisons mobiles | 29 |
| 3.1 Choix des paramètres | 13 | 6.1 Introduction | 29 |
| 3.2 Coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}_s$ | 13 | 6.2 Effet acoustique d'une cloison mobile | 29 |
| 3.3 Temps de réverbération | 14 | 6.3 Caractéristiques requises | 29 |
| 3.4 Taux de décroissance spatiale DL2 | 14 | 6.4 Efficacité d'une cloison mobile | 30 |
| 4 Solutions pratiques | 15 | 6.5 Exemple de calcul | 31 |
| 4.1 Variantes de base | 15 | 6.6 Exemples tirés de la pratique | 31 |
| 4.2 Indications pour l'utilisation de matériaux absorbant le son | 15 | 6.7 Résumé | 31 |
| 4.3 Constructions nouvelles | 16 | | |
| 4.3.1 Toitures en tôle profilée | 16 | | |
| 4.3.2 Locaux annexes | 17 | | |
| 4.3.3 Panneaux combinés pour l'isolation thermique et l'absorption acoustique | 17 | | |
| 4.4 Corrections acoustiques | 18 | | |
| 4.5 Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique | 18 | | |
| 4.6 Coûts | 19 | | |
| 4.7 Exemples | 19 | | |
| | | 7 Conclusion | 33 |

1 Introduction

La présente publication traite du problème de la propagation du bruit dans les locaux industriels. Il s'agit d'un phénomène que l'on peut réduire sensiblement en optimisant l'acoustique des locaux. Diverses modifications ont été récemment apportées aux méthodes d'évaluation du bruit et aux dispositions légales. Vous les trouverez ici dans leur version mise à jour. Projeteurs, architectes et ingénieurs sont invités à se référer à cette publication afin de concevoir correctement des locaux industriels sur le plan acoustique.

Les réflexions des ondes sonores sur les surfaces délimitant le local industriel (plafond, murs) peuvent être réduites par des mesures de correction acoustiques. On obtient ainsi une diminution du niveau du bruit de fond et une réduction du niveau sonore aux postes de travail, où le niveau de bruit dépend largement du bruit en provenance des postes de travail voisins.

Pourquoi utiliser des matériaux qui absorbent le son pour améliorer l'acoustique des locaux?

1. La loi fédérale sur l'assurance-accidents (LAA) du 20 mars 1981 énumère à l'art. 82, al. 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 à l'art. 34, al. 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 sécurité ou à la santé des travailleurs.

2. L'art. 6 de la loi sur le travail (LTr du 13 mars 1964) définit les obligations des employeurs et des travailleurs en matière de protection de la santé.

L'ordonnance 3 relative à la loi sur le travail (OLT 3 du 18 août 1993) fixe dans son art. 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'art. 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'isolation des sources de bruit;
- d) de prendre des mesures concernant l'organisation du travail.

Le commentaire de l'OLT 3 présente les valeurs indicatives de bruit concrètes en fonction des activités, les exigences et valeurs indicatives concernant l'acoustique des locaux ainsi que les valeurs indicatives concernant le bruit de fond. La formulation relative au respect des valeurs indicatives concernant l'acoustique a été renforcée dans l'édition révisée de mi-2006. Ces valeurs doivent être respectées depuis lors dans les locaux où sont installés des postes de travail permanents.

Entièrement remanié en juin 2020, le chapitre consacré au bruit définit notamment des exigences particulières quant aux valeurs indicatives pour les postes de travail dans l'industrie et l'artisanat d'une part et pour les locaux de bureaux et les laboratoires d'autre part.

3. La construction de locaux industriels modernes n'utilise souvent que des matériaux réverbérants (béton, tôle profilée, verre, etc.). Les locaux sans mesures de correction acoustique sont très bruyants et se caractérisent par une forte réverbération (fig. 1). Les postes de travail dans ces locaux sont généralement peu appréciés.

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



1 Exemple typique d'un atelier de fabrication sans correction acoustique (local très réverbérant).

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 par conséquent moins l'ouïe.

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

5. Une conception optimale permet de combiner isolation thermique et isolation phonique de façon à diminuer sensiblement les coûts. Des économies importantes peuvent être aussi réalisées en incluant les mesures de correction acoustique 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 cloisons mobiles (absorbantes). Ces cloisons ne remplacent pas les mesures de correction acoustique, mais elles en sont des compléments utiles.

En conclusion:

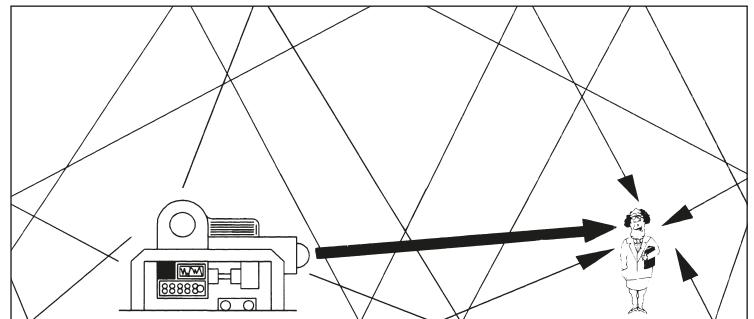
Intégrer des mesures de correction acoustique dans vos projets de locaux industriels ou de production neufs ou devant subir d'importantes transformations (p. ex. un simple plafond acoustique). Ces mesures sont aujourd'hui incontournables dans l'architecture industrielle. Et pour les locaux existants bruyants, étudiez une correction.

Le team acoustique de la Suva se tient à votre disposition pour étudier tout problème d'acoustique dans vos locaux. Une liste de spécialistes des travaux de correction acoustique est disponible sur le site www.sga-ssa.ch ou www.bruit.ch.

2 Principes de l'acoustique des locaux

2.1 Propagation du son

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



2 Son direct et son réfléchi dans une halle industrielle.

2.2 Coefficient d'absorption acoustique

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

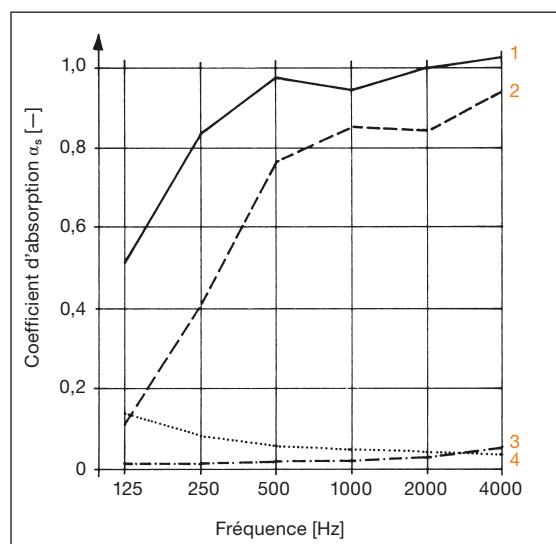
Le coefficient d'absorption est déterminé de manière expérimentale dans ce que l'on appelle une salle réverbérante, en fonction de la fréquence (habituellement dans les bandes de tiers d'octave de 100 à 5000 Hz, et, pour avoir un aperçu général, dans les bandes d'octave de 125 à 4000 Hz).

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

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 d'instruments spécifiques. 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.

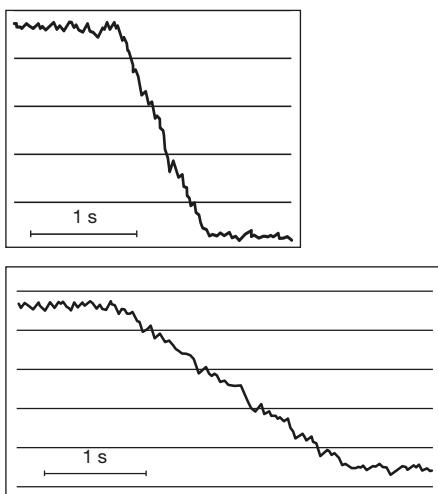


3 Exemples de coefficients d'absorption α_s en fonction de la fréquence.

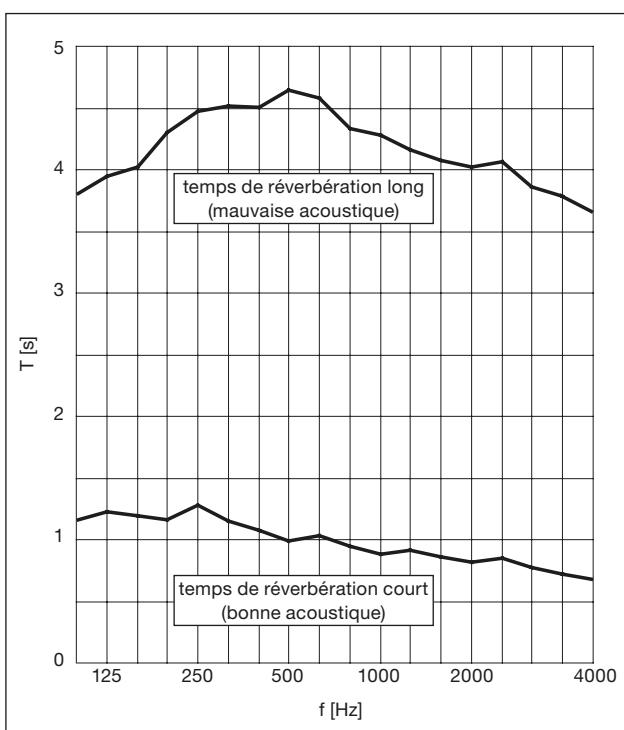
- 1 Panneaux de fibre minérale
- 2 Panneaux légers en laine de bois
- 3 Béton brut
- 4 Tôle profilée

Si la source sonore est coupée, la pression acoustique mesurée par le microphone diminue tout 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 en cas de mauvaise acoustique et court en cas de bonne acoustique du local (bonne absorption des sons).



4 Courbes de décroissance (fréquence 1000 Hz) dans un local à bonne (en haut) et mauvaise (en bas) acoustique.



5 Résultats de mesures des temps de réverbération.

Les temps de réverbération sont indiqués généralement dans les bandes d'octave (125 – 4000 Hz) ou de tiers d'octave (100 – 5000 Hz) (fig. 5). La source sonore utilisée pour les mesures est soit une installation de haut-parleur (bruit rose) soit un pistolet chargé à blanc ou un ballon qui éclate (bruit impulsif).

Les valeurs indicatives relatives aux temps de réverbération figurent au point 3.3.

2.4 Aire d'absorption acoustique équivalente

La description mathématique de la capacité d'absorption du son 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 m^3) et l'aire d'absorption équivalente A (en m^2):

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

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

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

S = surface en m^2

Si l'on connaît le coefficient d'absorption α_i de toutes les surfaces partielles S_i d'un local, il est possible de calculer l'aire d'absorption équivalente comme suit:

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

Le résultat de ce calcul permet de déterminer la durée de réverbération à l'aide de la formule 1. Un exemple détaillé figure au point 5.2.4.

Certaines normes (p. ex. ISO 3746 et DIN 45635) montrent comment il est possible d'évaluer la qualité acoustique d'un local à l'aide du coefficient d'absorption moyen α_s (voir aussi point 3.2). Le coefficient d'absorption moyen est déterminé par mesure directe ou par calcul selon la formule suivante:

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

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

Le coefficient d'absorption moyen α_s représente la moyenne arithmétique de toutes les fréquences (analyse par bande d'octave: 125 – 4000 Hz; analyse par bande de tiers d'octave: 100 – 5000 Hz).

Remarques importantes

Tous les calculs effectués à l'aide des notions de base décrites dans ce paragraphe se fondent sur un champ sonore diffus. Pour que les conditions de champ diffus soient réunies dans un local, il faut que les composantes sonores émises par une source aient une intensité quasi-égale en tout point du local et que le rapport entre la plus grande et la plus petite dimension du 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 délimitant le local.

Or, il s'avère que les locaux de travail (bureaux, ateliers) sont généralement des lieux à plafond bas qui ne remplissent pas les conditions propres à un champ sonore diffus. C'est pour cette raison et parce que l'influence des objets diffusants 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:

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

T_1 = temps de réverbération au départ en s

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

Dans la pratique, cela signifie qu'une réduction du temps de réverbération d'un 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 (p. ex. au poste de travail sur une poinçonneuse). Elle n'est vérifiable qu'à une certaine distance.

2.6 Taux de décroissance spatiale DL2

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 le taux de décroissance spatiale par doublement de la distance. On trouve uniquement certaines approches qui montrent comment utiliser le coefficient d'absorption acoustique moyen α_s pour résoudre ce problème.

Dans le cas d'un son émis par une source sonore ponctuelle et se propageant librement, on peut en effet escompter (théoriquement) une diminution maximale du niveau de pression acoustique de 6dB 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, qui indique la diminution du niveau de pression acoustique en fonction de la distance, représente une grandeur introduite en 1988 en Allemagne et en Suisse dans le but d'améliorer l'évaluation des conditions acoustiques dans les locaux industriels. Cette courbe, qu'elle soit calculée ou mesurée, tient compte non seulement de l'absorption acoustique, 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. En fonction du coefficient d'absorption des surfaces 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'évaluation de la qualité acoustique des locaux relativement grands ne se fait d'ailleurs même plus que par ce critère.

DL2

Le premier paramètre établi à partir de la courbe de décroissance sonore spatiale est la valeur DL2. Celle-ci indique la diminution moyenne du niveau de pression acoustique par doublement de la distance, dans un domaine de distances donné.

Il n'est pas nécessaire de connaître la puissance sonore de la source utilisée pour mesurer DL2 par des procédés techniques. Aussi, 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 acoustique émis par une source sonore normalisée dans un local et dans un domaine de distances donné et le niveau sonore en cas de propagation libre du son (idéalement sans réflexions), le premier niveau étant supérieur au second.

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

Il n'existe aucune exigence relative à l'amplification du niveau de pression acoustique DLf dans les dispositions relevant du droit du travail. De ce fait, la suite du document aborde exclusivement le taux de décroissance DL2.

2.6.2 Normes et directives relatives à DL2

Les normes EN ISO 11690, partie 1 (2020) et EN ISO 14257 (2001), présentent entre autres les critères d'évaluation de DL2.

L'art. 22 de l'ordonnance 3 relative à la loi sur le travail du 18 août 1993 et le commentaire correspondant mentionnent également DL2.

2.6.3 Détermination de DL2 à partir de mesures

La courbe de décroissance sonore spatiale est déterminée sur un trajet de mesure droit 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 comme trajet de mesure, p. ex., des voies de circulation au centre du local et, si possible, d'effectuer également des mesurages le long d'un second trajet orthogonal au premier.

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'octave aux fréquences centrales de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz et 4000 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. Le trajet de mesure doit se trouver à 1,5 m au moins des surfaces réfléchissantes. La hauteur de mesure se situe habituellement à 1,55 m au-dessus du niveau du sol.

On considère trois domaines de distances différents pour évaluer les résultats:

- distance proche: $1 \text{ m} \leq r \leq 5 \text{ m}$
- distance intermédiaire: $5 \text{ m} \leq r \leq 16 \text{ m}$
- distance lointaine: $16 \text{ m} \leq r \leq 64 \text{ m}$

La valeur déterminante pour évaluer la qualité acoustique d'un local est exclusivement la moyenne arithmétique de l'évolution du niveau sonore mesuré dans les bandes d'octave de 125 à 4000 Hz, à une distance intermédiaire de 5 à 16 m.

L'analyse des résultats des mesures s'effectue à l'aide d'un programme informatique. Certains programmes permettent de saisir et d'exploiter directement les données indiquées sur l'instrument de mesure. Un tel exemple figure dans le tableau 1 (mesures établies par programme informatique) et à la figure 6 (représentation graphique du trajet de mesure et analyse). Le taux de décroissance spatiale du niveau de pression acoustique représente dans ce cadre 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, www.datakustik.com.

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

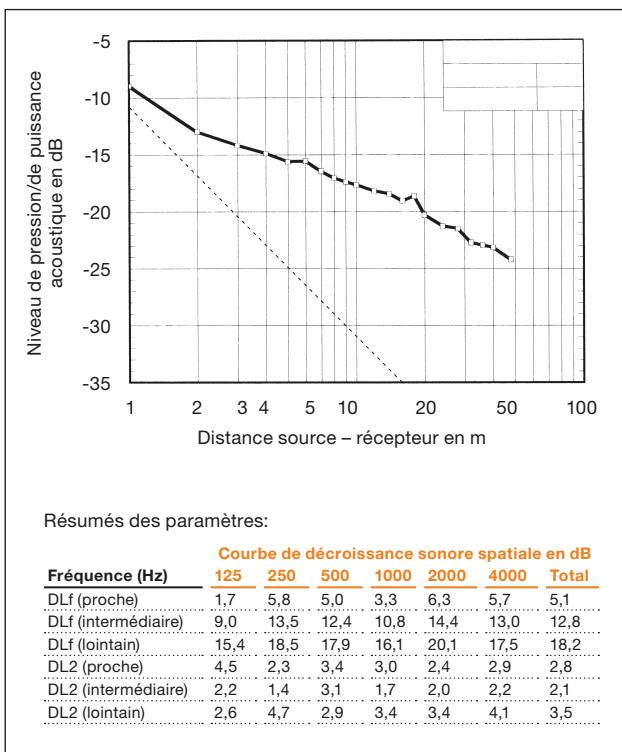
L'importance de DL2 pour l'acoustique des locaux ressort nettement de la figure 7 qui permet de comparer la courbe de décroissance sonore spatiale mesurée avant correction acoustique et celle envisagée après correction.

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 lorsque l'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 d'entre eux très précis exigent un traitement de millions de faisceaux sonores. Plus la réverbération est forte dans un local, plus les calculs seront complexes.

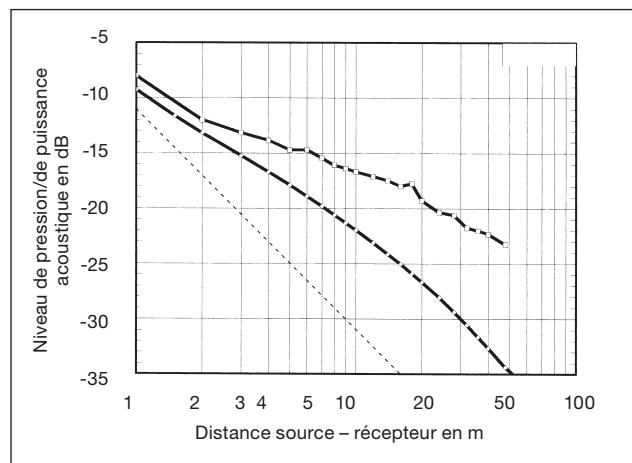
Les estimations voulues peuvent être réalisées au moyen du programme informatique mentionné au point 2.6.3.



Résumés des paramètres:

| Fréquence (Hz) | Courbe de décroissance sonore spatiale en dB | | | | | | |
|---------------------|--|------|------|------|------|------|-------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | Total |
| DLf (proche) | 1,7 | 5,8 | 5,0 | 3,3 | 6,3 | 5,7 | 5,1 |
| DLf (intermédiaire) | 9,0 | 13,5 | 12,4 | 10,8 | 14,4 | 13,0 | 12,8 |
| DLf (lointain) | 15,4 | 18,5 | 17,9 | 16,1 | 20,1 | 17,5 | 18,2 |
| DL2 (proche) | 4,5 | 2,3 | 3,4 | 3,0 | 2,4 | 2,9 | 2,8 |
| DL2 (intermédiaire) | 2,2 | 1,4 | 3,1 | 1,7 | 2,0 | 2,2 | 2,1 |
| DL2 (lointain) | 2,6 | 4,7 | 2,9 | 3,4 | 3,4 | 4,1 | 3,5 |

6 Représentation graphique du trajet de mesure et analyse des valeurs mesurées (valeurs identiques à celles du tableau 1).



7 Courbe de décroissance sonore spatiale 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

Tableau 1

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

| Distance [m] | Courbe de décroissance sonore spatiale à | | | | | | |
|--------------|--|--------|--------|---------|---------|---------|-------|
| | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | Total |
| 1 | -9,9 | -10,2 | -8,0 | -10,5 | -8,1 | -9,1 | -8,9 |
| 2 | -15,5 | -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 |

3 Exigences

3.1 Choix des paramètres

Les paramètres décrits ci-après s'appliquent exclusivement aux postes de travail dans l'industrie et l'artisanat conformément au commentaire de l'ordonnance 3 relative à la loi sur le travail, art. 22.

Pour les locaux de bureaux et les laboratoires, on considère le ratio entre l'aire d'absorption équivalente et le volume du local, dit ratio A/V. Cet aspect ne sera de ce fait pas traité de manière plus approfondie dans cette publication.

Les exigences en matière d'acoustique des postes de travail dans l'industrie et l'artisanat peuvent être exprimées par trois paramètres:

1. coefficient d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$
2. temps de réverbération T
3. taux de décroissance spatiale du niveau de pression acoustique en fonction de la distance DL2

Quel paramètre utiliser et où? Chacun des trois paramètres peut en principe être calculé. Les techniques de mesure ne permettent cependant que de déterminer les temps de réverbération et la valeur DL2 (DL2 avec certaines restrictions pour les petits locaux).

Tableau 2
Choix de la méthode de contrôle

| | Planifica- tion (calcul) | Correction (mesurage) |
|--|-----------------------------|--------------------------|
| Coefficient d'absorption acoustique α_s | × | |
| Temps de réverbération T_m | × | × |
| Taux de décroissance spatiale DL2 (longueur du trajet > 20 m) | × | × |

Tableau 3
Choix de la méthode d'excitation pour les mesures des temps de réverbération

| | Volume du local | Longueur du local |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| Pistolet 6 mm, éclatement d'un ballon | $\leq 100 \text{ m}^3$ | |
| Pistolet 9 mm | $> 100 \text{ m}^3$ | $< 10 \text{ m}$ |
| Bruit, balayage sinusoïdal | $\leq 1000 \text{ m}^3$ | $> 10 \text{ m}$ |



8 Sources sonores pour excitation impulsionnelle

Les temps de réverbération et la valeur DL2 sont en principe valables pour des locaux prêts à être exploités, c.-à-d. contenant des machines et des installations ainsi que des aménagements intérieurs (cabines, conduites d'aération, etc.). Le coefficient d'absorption acoustique moyen sera par contre calculé pour des locaux vides vu qu'il est utilisé avant tout comme un instrument de travail simple pour des projets de construction.

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

Un coefficient d'absorption acoustique moyen calculé sur toutes les surfaces délimitant le local (S_{tot}) $\bar{\alpha}_s$ supérieur à 0,25 est exigé comme valeur pour la conception des locaux vides (sans équipement ni mobilier), soit:

$$\bar{\alpha}_s = \frac{A_{tot}}{S_{tot}} \quad A_{tot} = \text{capacité totale d'absorption du son (m}^2\text{)}$$

Voir aussi le calcul du coefficient d'absorption acoustique moyen d'un local, www.suva.ch/bruit.

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 de parois en plus du plafond.

Il est également possible de convertir l'exigence relative au temps de réverbération selon le point 3.3 en un coefficient d'absorption moyen spécifique du local considéré (en fonction des dimensions de celui-ci). On utilisera dans ce cas la formule 4 (point 2.4).

Exemple

Local de fabrication de $30 \times 20 \times 8 \text{ m}^3$.

$V = 4800 \text{ m}^3$, $S_v = 2000 \text{ m}^2$ (surface intérieure totale du local).

Selon le graphique du point 3.3, pour 4800 m^3 , $T^m = 1,4 \text{ s}$ (moyenne arithmétique).

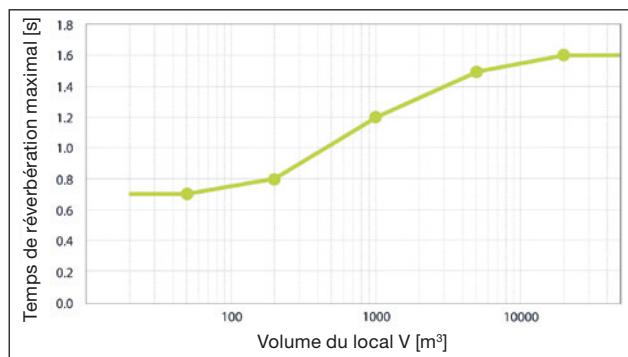
Donc

$$\bar{\alpha}_s = \frac{0,163 \times V}{T_m \times S_v} = \frac{0,163 \times 4800}{1,4 \times 2000} = 0,28$$

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

3.3 Temps de réverbération

La valeur moyenne dans la plage de fréquences de 125 Hz à 4 kHz est utilisée pour le temps de réverbération T . Le temps de réverbération maximal T est donné par le diagramme ci-après. Les valeurs indicatives sont valables pour les locaux de travail adaptés aux conditions normales d'exploitation.



9 Valeurs indicatives pour les durées de réverbération maximales

3.4 Taux de décroissance spatiale DL2

Le taux de décroissance spatiale par doublement de la distance (soit DL2) doit présenter au minimum la valeur suivante

$DL2 \geq 4 \text{ dB}$

à une distance intermédiaire (5 à 16 m), dans les locaux de travail adaptés aux conditions normales d'exploitation. 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 qu'il n'est pas toujours possible de respecter l'exigence $DL2 \geq 4 \text{ dB}$ pour 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.

4 Solutions pratiques

4.1 Variantes de base

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 acoustique (fig. 10b);
3. baffles (fig. 10c, gauche) et correcteurs compacts (fig. 10c, droite).

4.2 Indications pour l'utilisation de matériaux absorbant le son

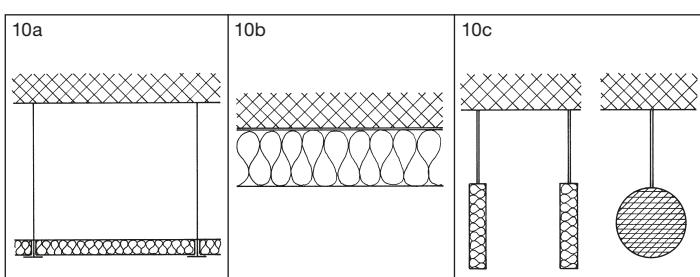
Voici quelques indications pour utiliser correctement en pratique les matériaux absorbant le son.

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 lattes), on améliore sensiblement le pouvoir absorbant dans la gamme des basses fréquences (absorption accrue de la résonance, vitesse acoustique maximale d'une particule dans le domaine de l'isolation).



10 Variantes de base pour le montage de matériaux absorbant le son.

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'épaisseur des panneaux soit inférieure à 10 mm et qu'ils soient montés sur des lattes.

Couches de peinture

Les couches de peinture peuvent altérer sensiblement le pouvoir absorbant des matériaux insonorisants. Il faut par conséquent être vigilant, notamment en cas de rénovations! 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, en plus des propriétés purement acoustiques, également de l'aspect esthétique et des aspects pratiques (p. ex. résistance aux détériorations mécaniques, à la poussière, à 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 à cellules fermées, ils peuvent atteindre des coefficients d'absorption très satisfaisants. Il convient de se référer aux normes applicables (SN EN ISO 14644, VDI 2083) pour une définition plus précise des exigences.

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 peuvent entraîner d'importants dégâts dans les constructions.

En effet, lorsque l'on pose des matériaux acoustiques directement sur des parties de construction (murs, plafonds) en contact avec l'extérieur, ce que l'on appelle le point de rosée est déplacé vers le côté chaud et, dans le même temps, le coefficient de transmission thermique est augmenté. En raison des différences 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 cette exigence: il faut choisir un type de montage permettant une aération par l'arrière, c.-à-d. que l'air du local doit pouvoir circuler entre le matériau acoustique et la partie extérieure de construction. Bien qu'impérative du fait des caractéristiques physiques du bâtiment, cette mesure entraîne toutefois une perte de la capacité d'isolation thermique du matériau acoustique.

4.3 Constructions nouvelles

Lors de constructions nouvelles, on veillera à faire un choix parmi les solutions disponibles sur le marché dès la conception du projet, car certaines sont irréalisables après coup. Il existe des solutions très efficaces en matière d'acoustique des locaux qui sont nettement moins onéreuses qu'un plafond acoustique classique (jusqu'à 50 % d'économies). En voici une sélection.

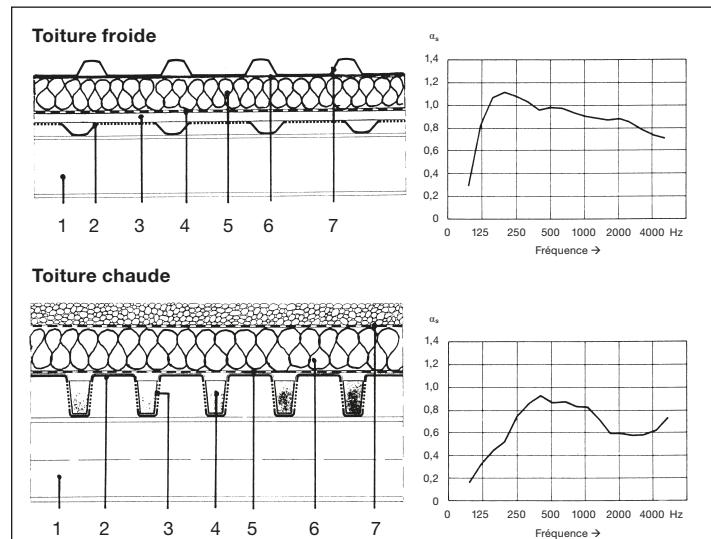
4.3.1 Toitures en tôle profilée

Un type de construction d'un excellent rapport qualité-prix très utilisé pour les locaux industriels 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 de l'absence de matériaux de correction acoustique.

Une solution consiste à perforer les tôles profilées (par le fabricant) et à créer un plafond acoustique hautement efficace. Deux constructions de ce type, avec leurs coefficients d'absorption, sont présentées à la figure 11.

De cette solution convaincante sur le plan acoustique et sur le plan de la technique du bâtiment, nous tirons une conclusion importante pour la planification:

lorsque l'on projette de construire des bâtiments industriels comportant des postes de travail permanents, on devrait d'emblée prévoir une toiture en tôle profilée perforée.



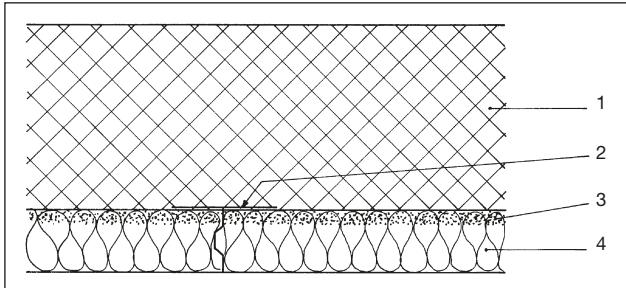
11 Construction et effet acoustique de toitures en tôle profilée perforée (source: Sonotec SA, Villmergen).

Toiture froide

- 1 Profil C MONTANA (panne de toiture)
- 2 SWISS PANEL SP 28 A, 0,80 mm, acier galvanisé, perforé dans l'aile supérieure, perforation 20,5 %
- 3 Rouleau de feutre en fibre minérale 25 mm, ISOVER type FM (25 kg/m³) avec pare-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 Protection anti-fluage (50 g/m²)
- 4 Cale acoustique FLUMROC type 1 (32 kg/m³)
- 5 Pare-vapeur SARNAVAP 1000, 1,60 mm (300 g/m²)
- 6 Panneau d'isolation thermique 100 mm (2 x 50 mm), FLUMROC type 341 (180 kg/m³)
- 7 Membrane d'étanchéité SARNAFIL G 21 441, 2,40 mm (2,7 kg/m²)



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

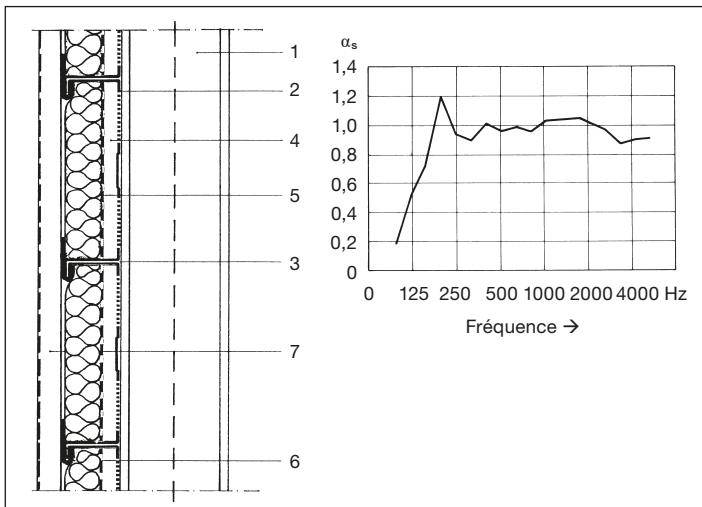
4.3.2 Locaux annexes

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 jusque derrière le coffrage. Les passages de conduites électriques à travers les panneaux acoustiques notamment sont des endroits critiques.

Il est par conséquent nécessaire d'examiner la possibilité d'un montage direct ultérieur qui apporte 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 acoustique

Des panneaux de parois extérieures ou de toiture servant à la fois à l'isolation thermique et à l'absorption acoustique se trouvent sous forme de construction légère (p. ex. éléments sandwich en acier ou aluminium à la fig. 13, panneaux légers en laine de bois avec double, etc.) ou de construction en dur (p. ex. Durisol).



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

- 1 Pilier métallique
- 2 Bardage MONTANA 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 pare-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

4.4 Corrections acoustiques

Pour déterminer s'il est nécessaire de procéder à une correction acoustique dans un bâtiment industriel, on se basera sur des mesures acoustiques. Seules de telles mesures fournissent des résultats fiables en vue d'une évaluation correcte. Lorsque l'acoustique d'un bâtiment industriel a besoin d'être améliorée, le choix des matériaux et le type de montage dépendent d'une série de critères.

Exemples de quelques critères:

- la hauteur à disposition pour le montage est limitée (hauteur du local, voie de roulement de grue, ventilation, etc.);
- la dimension modulaire des panneaux acoustiques est pré-déterminée du fait de la structure de la charpente;
- des matériaux spéciaux à surface compacte sont nécessaires pour les locaux humides et les locaux d'hygiène;
- dans le cas de bâtiments industriels 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 critères, de trouver une solution permettant d'améliorer l'acoustique du local. Selon la situation, l'une des trois solutions suivantes sera choisie:

- un plafond acoustique lisse, plein
- un plafond en grille, suspendu (ouvert en haut)
- des absorbeurs 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 aires d'absorption manquantes peuvent être créées sur les murs.

4.5 Valeurs moyennes des coefficients d'absorption acoustique

Pour procéder à des évaluations sommaires, il suffit de connaître les valeurs moyennes des coefficients d'absorption α_s de certains groupes de matériaux acoustiques (tableau 4). Les fournisseurs de ces matériaux sont en mesure d'indiquer les coefficients d'absorption de leurs produits.

Tableau 4

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

| Matériau | CdA [mm] | Fréquence en Hz | | | | | | $\bar{\alpha}_s$ |
|--|-------------|-----------------|------|------|------|------|------|------------------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | |
| 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 50mm | 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 20mm | – | 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 |

CdA = Couche d'air

4.6 Coûts

Les prix des matériaux absorbant le son dépendent notamment des facteurs suivants:

- surface à couvrir en m²,
- type de montage,
- type de construction porteuse,
- capacité de charge,
- hauteur du local,
- accessibilité (local vide ou occupé),
- travaux d'adaptation (éclairage, conduites d'énergie, pont roulant, etc.),
- moment du montage (jour, nuit ou durant le week-end).

Le panorama ci-après des systèmes et de leurs coûts se base sur les indications fournies par l'Association suisse des entreprises pour systèmes de plafonds et d'aménagements intérieurs VSD, www.vsd.swiss.

Tableau 5
Coûts approximatifs des systèmes acoustiques complètement montés (2021).

| Matériaux, montage | Prix indicatifs en CHF/m ² (à partir de 100 m ²) |
|---|---|
| Enduit acoustique (Sto) | 50.– à 90.– |
| Panneaux en laine de bois 30 mm (Heradesign, UNIAKUSTIK, Fibracoustic, Cewood) | 60.– à 100.– |
| Panneaux de fibre minérale, système d'insertion (Rockfon, OWA, AMF, Parafon, Ecophon) | 50.– à 100.– |
| Baffles de fibre minérale (Rockfon, OWA, AMF, Parafon, Ecophon) | 130.– à 180.– |
| Panneaux en fibres de polyester, baffles, voile (SilentPET, Achisonic, aPerf) | 150.– à 200.– |
| Éléments métalliques perforés (Haag, Metalit, Durlum, FURAL, Armstrong) | 80.– à 120.– |

Lorsque l'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). L'expérience montre que 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, cela dépend beaucoup 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 consacrera 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.

Comparez aussi le rendement acoustique des systèmes proposés (valeur α_w ou α_p selon la norme EN ISO 11654 «Acoustique — Absorbants pour l'utilisation dans les bâtiments — Évaluation de l'absorption acoustique» et α_s selon la norme EN ISO 354 «Acoustique — Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante»). Attention: il n'est pas possible de procéder à des conversions entre les différents types de construction (plafond plat, baffle, cylindre). Demandez dans tous les cas les données de mesure correspondant au type de construction proposé.

4.7 Exemples

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



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



15 Panneaux acoustiques doublés de laine minérale dans une ferblanterie.



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



17 Correcteurs compacts absorbeurs dans un atelier de découpage.



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



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

5 Estimation de l'acoustique des locaux

5.1 Généralités

À l'heure actuelle, nous disposons d'un large éventail de possibilités pour estimer les conditions acoustiques, aussi bien pour les corrections que pour les constructions nouvelles. 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 modifiées sur la base de mesures pour un bâtiment avec corrections acoustiques;
3. calcul du coefficient d'absorption acoustique moyen $\bar{\alpha}_s$ pour un nouveau bâtiment;
4. calcul du coefficient d'absorption acoustique moyen modifié $\bar{\alpha}_s$ pour un bâtiment avec corrections acoustiques;
5. calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale pour un nouveau bâtiment;
6. calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale 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 tout d'abord un exemple avec la méthode classique de détermination de la durée de réverbération sans et sous l'influence des objets diffusants puis avec la méthode de la courbe de décroissance sonore spatiale (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 qu'objets diffusants) 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 de 5,5 m de haut. Les deux longs côtés sont constitués pour 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

$$V = 40 \times 20 \times 5,5 = 4400 \text{ m}^3$$

Surface sol/plafond: 800 m²

Surface des fenêtres: 220 m²

Surface des murs en tôle: 220 m²

Murs crépis: 220 m²

5.2.4 Calcul de la capacité d'absorption du son

Nous calculons tout d'abord la capacité d'absorption du son (aire d'absorption équivalente) A du local sans le plafond (tableau 6). Nous tirons les valeurs moyennes α_s du tableau 4.

Nous calculons ensuite (tableau 7) 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 A1 et A2 et les temps de réverbération (tableau 8).

Tableau 6

Calcul des données de base acoustiques

| Partie de construction | 125 Hz | | 250 Hz | | 500 Hz | | 1000 Hz | | 2000 Hz | | 4000 Hz | |
|------------------------------------|------------|----|------------|----|------------|----|------------|----|------------|----|------------|----|
| | α_s | A |
| 800 m ² de sol en béton | 0,02 | 16 | 0,03 | 24 | 0,03 | 24 | 0,04 | 32 | 0,05 | 40 | 0,05 | 40 |
| 220 m ² de fenêtres | 0,10 | 22 | 0,04 | 9 | 0,03 | 7 | 0,02 | 4 | 0,02 | 4 | 0,02 | 4 |
| 220 m ² de mur en tôle | 0,06 | 13 | 0,20 | 44 | 0,15 | 33 | 0,14 | 31 | 0,10 | 22 | 0,05 | 11 |
| 220 m ² de 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

Capacité d'absorption du son pour les variantes de plafond

| 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 |

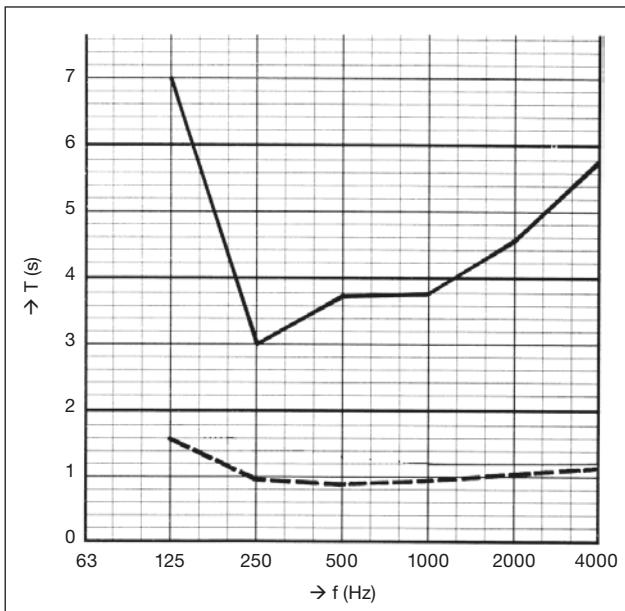
Tableau 8

Calcul de la capacité d'absorption totale et des temps de réverbération. Temps de réverbération maximal selon la figure 9 (valeur indicative pour un volume de local de 4400 m³) = 1,46 s

| Fréquence | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | Hz | Moyenne des temps de réverbération |
|--|------|------|------|------|------|------|----------------|------------------------------------|
| | | | | | | | | |
| 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 | 4,8s |
| Variante 2 A ₂ = | 455 | 761 | 807 | 756 | 677 | 626 | m ² | |
| $T_2 = \frac{0,163 \times V}{A_2} = \frac{0,163 \times 4400}{A_2} =$ | 1,60 | 0,95 | 0,90 | 0,95 | 1,05 | 1,15 | s | 1,1s |

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).



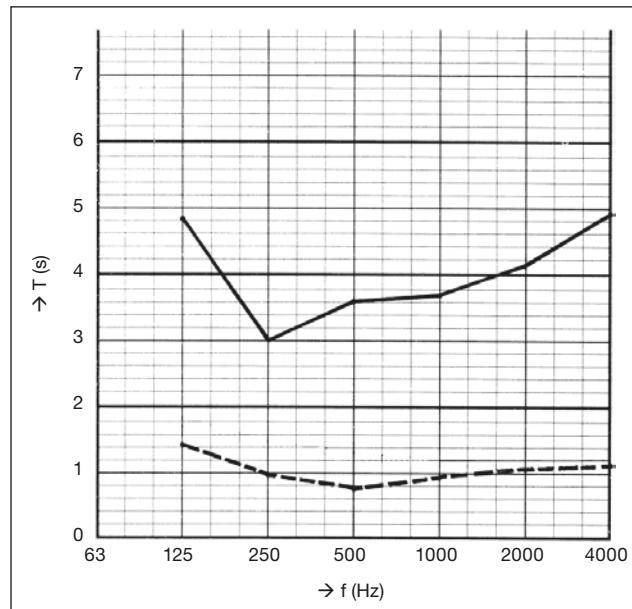
20 Résultats des calculs des temps de réverbération classiques pour un nouveau bâtiment.

----- Variante 1: plafond en tôle lisse
----- Variante 2: plafond en tôle perforée

5.3 Calcul informatique des temps de réverbération

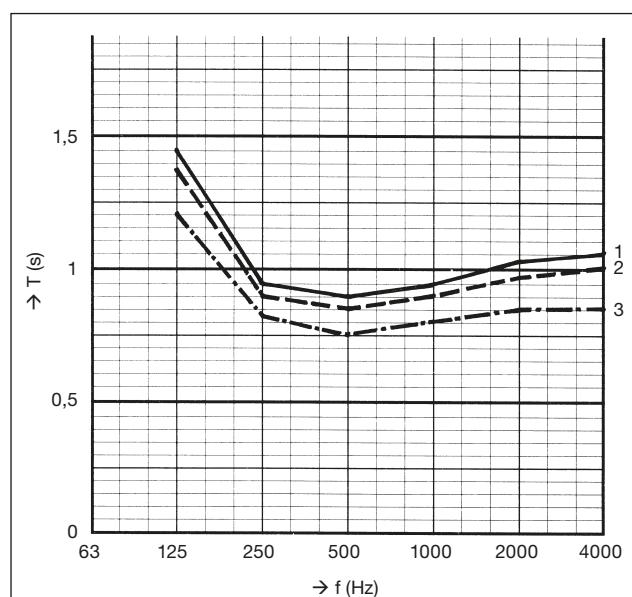
En calculant les temps de réverbération pour le même local (point 5.2.2) à l'aide d'un programme informatique qui tient compte de la densité des objets diffusants (parc de machines) et de la forme du local (réflexion des murs), on obtient un résultat différent, en particulier pour les basses fréquences (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 à la figure 21.

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



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

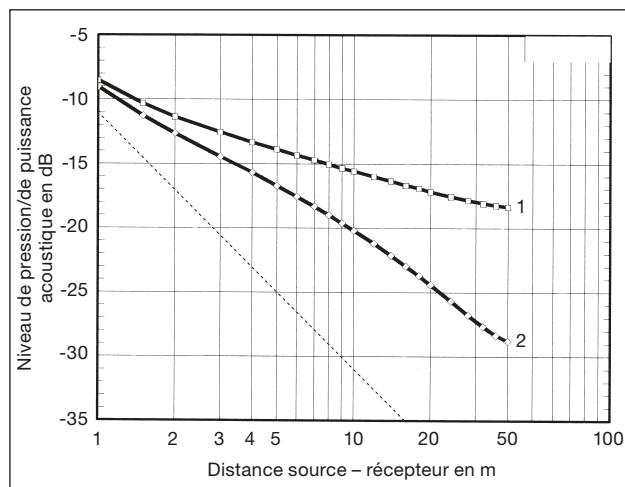


22 Influence du parc de machines sur les estimations des temps de réverbération calculés par ordinateur, variante 2 (plafond en tôle perforée).

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

Tableau 9
Comparaison des estimations calculées par différents procédés

| Critères d'appréciation | Plafond lisse | Plafond perforé |
|---|---------------|-----------------|
| Moyenne des temps de réverbération de 125–4000Hz | | |
| Calcul par la méthode traditionnelle (point 5.2) | 4,80s | 1,10s |
| Calcul par ordinateur (point 5.3) | | |
| Densité de diffuseurs | | |
| très faible | 4,00s | 1,05s |
| faible | 3,36s | 1,00s |
| forte | 2,32s | 0,88s |
| Diminution de la distance DL2 | | |
| Densité de diffuseurs | | |
| très faible | 1,2dB | 2,9dB |
| faible | 1,8dB | 3,7dB |
| forte | 3,2dB | 5,3dB |



23 Courbes de décroissance sonore spatiale 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 (décroissance: 6dB par doublement de la distance).

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

5.4 Calcul de la courbe de décroissance sonore spatiale 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'évaluation. 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 9.

5.5 Évaluation 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, on obtient des valeurs qui satisfont aux exigences.

5.5.1 Comparaison

À ce stade, il est intéressant de comparer les résultats des estimations figurant dans le tableau 9.

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 qu'objets diffusants), 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 méthodes de calcul sont relativement minimes, car la densité des objets diffusants n'influence plus tellement les résultats.

b. Taux de décroissance spatiale par doublement de la distance (DL2)

Par comparaison avec le temps de réverbération, le taux de décroissance spatiale DL2 livre des informations plus précises sur les conditions acoustiques envisageables. Il est par exemple intéressant de comparer un bâtiment industriel sans plafond acoustique avec un grand parc de machines et ce même bâtiment quasiment vide doté d'un plafond acoustique. On peut constater que les temps de réverbération sont deux fois moins élevés dans un bâtiment vide avec plafond acoustique. Le taux DL2 nous livre en revanche de meilleurs résultats pour un bâtiment avec un 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 tout 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:

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

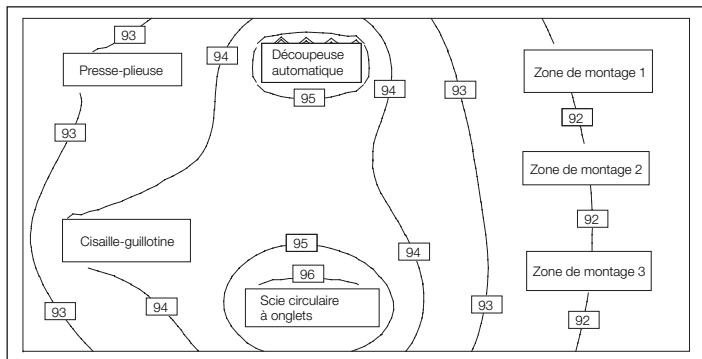
$$\text{variante 2: } \bar{\alpha}_{s2} = \frac{A_{m2}}{S_v} = \frac{680}{2260} = 0,30$$

La valeur recherchée $\bar{\alpha}_s \geq 0,25$ selon le point 3.2 est déjà obtenue pour la variante 2.

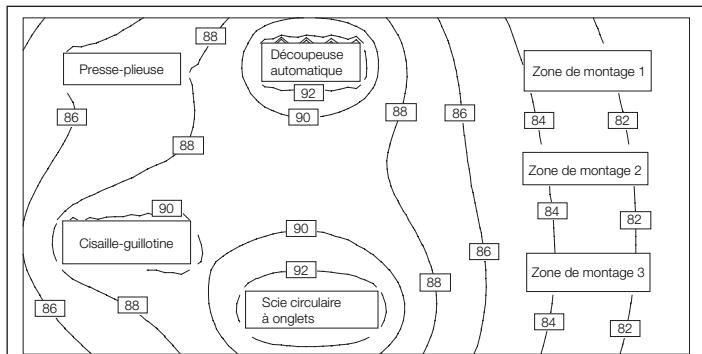
La méthode informatique est par contre plus élégante puisqu'elle nous livre directement les valeurs $\bar{\alpha}_s$ recherchées.

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

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



24 Répartition des niveaux de pression acoustique dans un local de fabrication sans corrections acoustiques (DL2 = 1,8 dB).
Le niveau de pression acoustique estimé dans tout le local se situe entre 92 et 96 dB(A).



25 Répartition des niveaux de pression acoustique dans le même local de fabrication avec des corrections acoustiques (DL2 = 4,2 dB).
Le niveau de pression acoustique 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 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 aux figures 24 (sans corrections acoustiques) et 25 (avec corrections acoustiques). (Ces figures sont malheureusement seulement en noir et blanc pour des raisons techniques). Les calculs se basent sur les niveaux d'émission sonore suivants:

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

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

Interprétation

Sans correction acoustique (fig. 24), le niveau de pression acoustique estimé s'établit à 92 dB(A) dans la zone de montage. Il faut donc porter des protecteurs d'ouïe dans tout le local industriel. Les corrections acoustiques (plafond acoustique) par contre ramènent le niveau de pression acoustique 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 évaluations 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 des 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 (acousticien).

Une liste est disponible sur www.sga-ssa.ch ou www.bruit.ch.

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

6 Cloisons mobiles

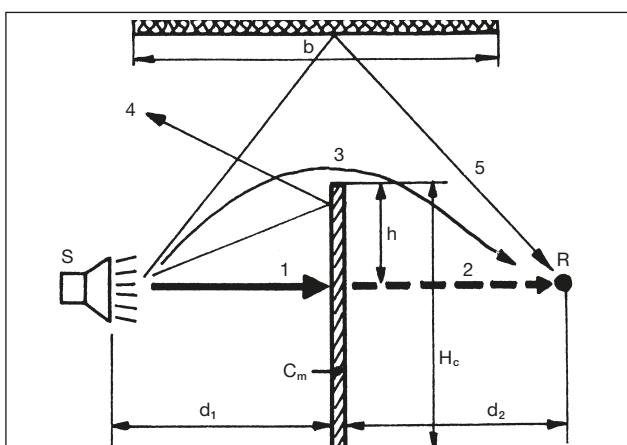
6.1 Introduction

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'évaluation 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 cloisons mobiles sont destinées à séparer les zones de travail bruyantes des zones calmes, mais leur efficacité est variable.

6.2 Effet acoustique d'une cloison mobile

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



26 Caractéristiques acoustiques des cloisons mobiles.

S = source sonore

R = récepteur

CM = cloison mobile

d_1 = distance source - cloison

d_2 = distance cloison - récepteur

H_c = hauteur de la cloison

h = hauteur efficace de la cloison

b = largeur du plafond acoustique

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 réfléchie sur le mur (4) et au plafond (5).

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

6.3 Caractéristiques requises

- Les cloisons mobiles doivent permettre une isolation satisfaisante du son aérien. Il suffit en général d'utiliser un matériau dont l'indice d'affaiblissement acoustique apparent pondéré $R'w$ est ≥ 20 dB.
- Le côté de la cloison 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 cloison mobile.
- La cloison mobile doit être installée le plus près possible de la source sonore ou du récepteur, c'est-à-dire que la différence entre d_1 et d_2 doit être la plus grande 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 cloison 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 cloison mobile

L'efficacité d'une cloison 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 acoustique à un point à isoler, avec et sans cloison mobile, et à calculer la différence ΔL_e . Le maximum théorique que l'on peut atteindre est de $\Delta L_e = 15$ 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 lorsque l'on mesure le niveau sonore total pondéré en dB(A) pour des bruits normaux de machines.

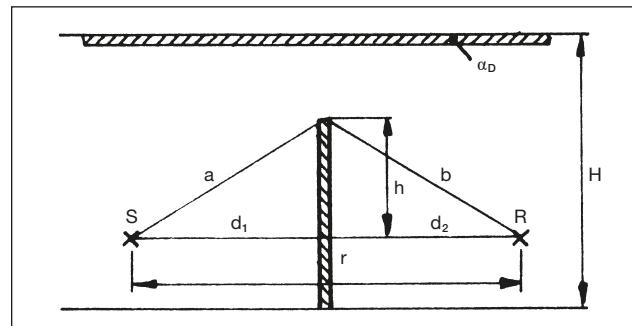
Les calculs sont effectués à l'aide des valeurs de la figure 27 (voir aussi point 6.2):

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

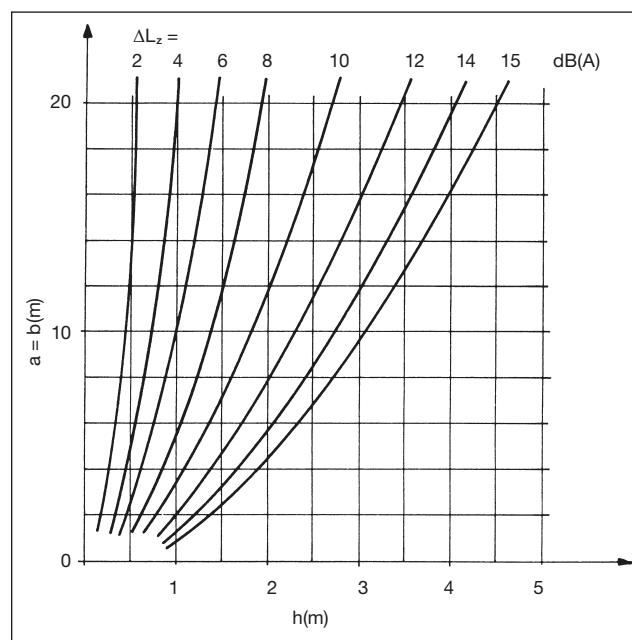
L'indice de qualité d'isolement contre les sons aériens ΔL_e d'une cloison mobile dépend largement de la capacité d'absorption du plafond. Plus le coefficient moyen d'absorption acoustique α_D est faible, plus ΔL_z diminue. En d'autres termes,

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

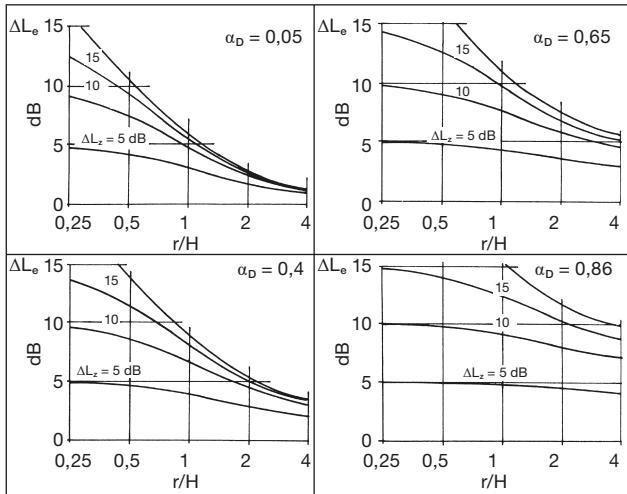
Ce ratio ressort nettement sur la figure 29.



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



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



29 Indice de qualité d'isolation 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 locaux à plafonds bas.

$\alpha_D = 0$: béton, plafond en métal profilé

$\alpha_D = 0,4$: plafond acoustique, couche du milieu (p. ex. matériaux intégrés dans le coffrage)

$\alpha_D = 0,65$: plafond acoustique de qualité, courant dans les locaux industriels

$\alpha_D = 0,86$: plafond acoustique de très bonne qualité, uniquement dans les locaux spéciaux

On obtient donc:

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

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

6.6 Exemples tirés de la pratique

Nous avons retenu trois exemples présentés aux figures 30 à 32. La cloison 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) en fonction de la distance). 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 cloison 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 cloison mobile utilisé dans l'industrie.

6.5 Exemple de calcul

La source sonore et le récepteur se trouvent à 6 m de la cloison 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, un plafond acoustique. Quelle est l'efficacité de cette cloison?

Données: $a = b = 6 \text{ m}$

$h = 1,5 \text{ m}$

$r = 12 \text{ m}$

$H = 6 \text{ m}$

$\alpha_D = 0,4$

Déterminer: ΔL_e

Solution: selon le diagramme

$\Delta L_z = 11 \text{ dB(A)}$

$r/H = 12/6 = 2$

6.7 Résumé

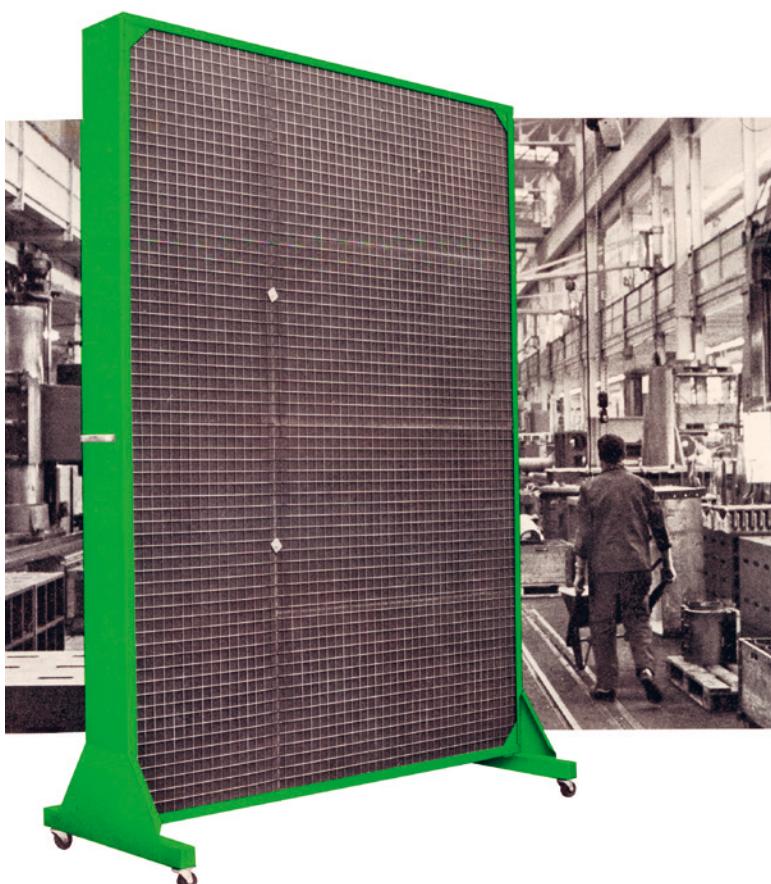
Les bases de calcul présentées dans ce chapitre montrent que les cloisons mobiles ne permettent pas de réduire le niveau sonore de plus de 10 dB(A) environ. Leur efficacité dépend en effet largement de la capacité d'absorption du plafond.



30 Cloison mobile peu efficace (plafond non absorbant).



31 Écran de séparation acoustique des zones de travail très bruyantes.



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

7 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.

Les estimations sont aujourd'hui beaucoup plus fiables que par le passé grâce aux nouveaux procédés de mesure et d'évaluation (comme les cartes de bruit), qui permettent de démontrer l'efficacité des surfaces absorbantes dans un local. Dans le même temps, 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 des 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'évaluation et de mise en pratique.



33 Usine avec des baffles au plafond.

Le modèle Suva Les quatre piliers



La Suva est mieux qu'une assurance: elle regroupe la prévention, l'assurance et la réadaptation.



La Suva est gérée par les partenaires sociaux. La composition équilibrée du Conseil de la Suva, constitué de représentants des employeurs, des travailleurs et de la Confédération, permet des solutions consensuelles et pragmatiques.



Les excédents de recettes de la Suva sont restitués aux assurés sous la forme de primes plus basses.



La Suva est financièrement autonome et ne perçoit aucune subvention de l'État.



Suva
Sécurité au travail
Case postale, 6002 Lucerne

Renseignements
Case postale, 1001 Lausanne
Tél. 058 411 12 12
service.clientele@suva.ch

Commandes
www.suva.ch/66008.f

Titre
Acoustique des locaux industriels

Imprimé en Suisse
Reproduction autorisée, sauf à des fins commerciales, avec mention de la source.
1^{re} édition: juin 1989
Édition revue et corrigée: mai 2022

Référence
66008.f (disponible uniquement au format pdf)