

MISE AU POINT ET VALIDATION D'UN CRITERE PERMETTANT DE JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS

A.M. Ondet et J. Sueur

I.N.R.S., Centre de Recherche, B.P. 27, 54501 Vandoeuvre cedex, France.

1. INTRODUCTION

Les caractéristiques acoustiques d'un local dépendent d'un grand nombre de paramètres qui rendent complexe toute tentative de classement des locaux industriels en fonction du pouvoir absorbant de leurs parois. En effet, les locaux industriels ont des géométries très variées: ils peuvent être plats ($L, l \gg h$), allongés ($L \gg l, h$), en forme de L; le plafond peut être plat, mais peut avoir une forme complexe (structure en sheds...). De même, les parois des locaux industriels ont des types très variés: elles peuvent être homogènes ou hétérogènes (parties vitrées ...). De plus, l'encombrement est très diversifié au sein d'un même local.

Compte tenu de cette complexité, une expérimentation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel prévisionnel Rayscat [1]. Les simulations numériques effectuées ont permis de définir un critère pour juger de la qualité acoustique des locaux industriels. Ce critère a ensuite été validé à partir de données expérimentales obtenues dans plus de 200 locaux industriels.

La première partie de cet article décrit l'expérimentation numérique effectuée à l'aide de Rayscat et les résultats obtenus. La seconde partie présente le critère choisi. Enfin, dans la troisième partie ce critère est validé à l'aide de données expérimentales.

2. CARACTERISATION ACOUSTIQUE D'UN LOCAL INDUSTRIEL.

Le paramètre qui a été choisi pour élaborer le critère est la pente par doublement de distance de la courbe de décroissance spatiale relevée dans une zone dégagée du local. Ce paramètre donne une idée de la participation respective du champ direct et du champ réverbéré. La pente par doublement de distance de la courbe de décroissance spatiale est indépendante de la puissance acoustique de la source. Elle dépend fortement de la réverbération due au local: une valeur de 0 dB correspond au cas d'un local très réverbérant (champ parfaitement diffus); une valeur de 6 dB correspond au cas d'un local idéalement traité (champ libre).

Cette courbe de décroissance est celle qui minimise les effets ponctuels dus à l'encombrement (réflexions locales, effet de masque...) [2]. Elle est donc plus reproductible que celle mesurée dans les zones encombrées d'un local.

3. EXPERIMENTATION NUMERIQUE - CONFIGURATIONS ETUDIEES.

Une expérimentation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel RAYSCAT. Basé sur la technique des rayons, ce modèle prend en compte la géométrie réelle du local ainsi que la répartition de l'encombrement. Il permet de calculer les niveaux sonores dans les locaux vides ou encombrés. Pour une source sonore de référence seule en fonctionnement, il donne la courbe de décroissance spatiale de l'énergie sonore. Les simulations numériques ont été réalisées pour observer l'évolution de la pente de la courbe de

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

décroissance spatiale de l'énergie sonore en fonction de la géométrie du local, de son encombrement et du pouvoir absorbant de ses parois.

3.1 Géométrie des locaux

Les cas types ont été choisis en fonction des situations les plus fréquemment rencontrées dans la pratique. Ce sont des parallélépipèdes rectangles. Il s'agit de 20 locaux dont les dimensions sont données dans le tableau 1 et correspondent à 2 hauteurs sous plafond $h=4m$ (locaux 1 à 10) et $h=10m$ (locaux 11 à 20).

Local N°	L(m)	l(m)	h(m)	Local N°	L(m)	l(m)	h(m)
1	15	10	4	11	15	10	10
2	25	5	4	12	25	5	10
3	25	10	4	13	25	10	10
4	25	25	4	14	25	25	10
5	50	10	4	15	50	10	10
6	50	20	4	16	50	20	10
7	25	100	4	17	25	100	10
8	50	50	4	18	50	50	10
9	75	75	4	19	75	75	10
10	100	100	4	20	100	100	10

Tableau 1: Géométrie des locaux étudiés

3.2 Propriétés d'absorption des parois

Trois types de locaux ont été définis en fonction des propriétés absorbantes de leurs parois:

. cas 1: local réverbérant. Les coefficients d'absorption du sol, des parois verticales et du plafond sont respectivement:

sol : $\alpha=0.05$

murs : $\alpha=0.1$

plafond : $\alpha=0.1$

. cas 2: local moyennement absorbant. La partie supérieure des parois verticales ($h>2m$) et le plafond sont moyennement absorbants:

sol : $\alpha=0.05$

murs($h<2m$) : $\alpha=0.1$

murs($h>2m$) : $\alpha=0.5$

plafond : $\alpha=0.5$

. cas 3: local très absorbant. La partie supérieure des parois verticales ($h>2m$) et le plafond sont très absorbants:

sol : $\alpha=0.05$

murs($h<2m$) : $\alpha=0.1$

murs($h>2m$) : $\alpha=0.9$

plafond : $\alpha=0.9$

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

3.3 Encombrement

Deux types de locaux ont été définis à partir de leur encombrement:

- local totalement vide. La fréquence de diffusion est nulle: $v=0.0 \text{ m}^{-1}$, ce qui signifie que le libre parcours moyen entre obstacles est infini.

- local encombré par des obstacles réfléchissants. L'encombrement est supposé réparti aléatoirement dans la partie basse du local ($h < 2\text{m}$), la partie haute du local est vide. Une allée de 3m de large est modélisée sur l'axe principal du local par une zone vide. Dans les zones vides, la fréquence de diffusion est $v = 0.0 \text{ m}^{-1}$. Dans les zones encombrées, elle a été choisie égale à $v = 0.2 \text{ m}^{-1}$ ce qui correspond à un libre parcours moyen entre obstacles de l'ordre de 5 m. De même que précédemment, le coefficient d'absorption des obstacles a été choisi égal à $\alpha = 0.1$.

4. CALCULS EFFECTUES.

Pour chaque local, pour chaque configuration d'absorption et d'encombrement, la ligne de mesurage constituée par la source de bruit et les points récepteurs a été placée sur l'axe longitudinal du local et centrée sur cet axe. La hauteur de la source de bruit et des points récepteurs est de 1.5 m. Les points récepteurs sont situés à 2m, 4m, 6m, 8m, 10m, 12m, 14m et 16m de la source de bruit. Pour les locaux 1 et 11, qui ont la plus petite longueur ($L=10\text{m}$), seuls les 5 premiers points ont été considérés.

Le logiciel utilise des cellules de réception sphériques de 1m^3 de volume. Pour chaque cas étudié, 100000 rayons ont été suivis sur 30 réflexions. L'absorption atmosphérique n'a pas été considérée. Le niveau sonore L_p calculé aux différents points récepteurs permet de tracer la courbe de décroissance spatiale de l'énergie sonore.

Pour chacune des courbes de décroissance ainsi obtenues, on a effectué une régression linéaire afin d'exprimer chacune des courbes sous la forme:

$$L_p(\text{dB}) = A - B \log(r) \quad (1)$$

où r est la distance entre la source et le récepteur; A et B sont les deux constantes caractérisant la courbe de décroissance.

La pente par doublement de distance de la courbe de décroissance P_{dd} s'obtient à partir de B :

$$P_{dd} = -B \log(2)$$

5. LES RESULTATS OBTENUS.

Une étude paramétrique effectuée a permis de mettre en évidence que la pente par doublement de distance de la courbe de décroissance spatiale dépendait principalement des trois paramètres suivants: la surface au sol du local, le coefficient d'absorption des parois et l'encombrement.

Les figures 1 et 2 présentent pour toutes les configurations d'encombrement et d'absorption étudiées, les valeurs de la pente par doublement de distance de la courbe de décroissance en fonction de la surface au sol du local.

Sur chacune de ces figures les valeurs sont données pour les 20 locaux; la hauteur du local est discriminée par un symbole différent: • $h=4\text{m}$ + $h=10\text{m}$.

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

5.1. Cas des locaux vides

Les résultats obtenus pour les locaux vides (fig.1) montrent que:

a - La pente par doublement de distance augmente avec la surface au sol du local. Elle varie de 1dB à 3 dB dans le cas d'un local réverbérant (fig 1.a) et de 2 dB à 5 dB dans le cas d'un local idéalement traité (fig 1.c). Elle augmente de façon quasi linéaire avec le logarithme de la surface.

b - La pente par doublement de distance augmente avec l'absorption des parois d'un local. Pour un petit local, elle varie de 1 dB (local réverbérant) à 2.5 dB (local idéalement traité). Pour un grand local, elle varie de 3 dB (local réverbérant) à 5 dB (local idéalement traité).

5.2 Cas des locaux encombrés

Les calculs réalisés dans les locaux encombrés (fig 2), montrent que la pente de la courbe de décroissance est généralement plus importante dans une allée d'un local encombré que dans le local vide. Dans une allée, l'encombrement apporte de l'énergie diffusée par les obstacles et diminue l'effet des parois verticales parallèles à la ligne de mesurage.

L'influence de l'encombrement sur la pente par doublement de distance est faible dans les locaux réverbérants ou de grandes dimensions. Par contre, elle est très importante dans les locaux traités acoustiquement et de petites dimensions: elle atteint 1.5 dB dans le cas de petits locaux idéalement traités.

Dans les locaux réverbérants, la pente par doublement de distance dépend de la surface au sol du local. Elle varie de 1dB à 3 dB comme dans le cas des locaux vides réverbérants.

Cette dépendance diminue lorsque l'absorption des parois du local augmente. Dans les locaux encombrés parfaitement traités (fig 2.c), la pente par doublement de distance est de l'ordre de 5 dB pour tous les locaux de surface supérieure à 1000 m². Elle dépasse 3.5 dB pour les locaux plus petits.

6. RECHERCHE D'UN CRITERE

L'analyse des résultats montre que le critère permettant de classer les locaux industriels doit dépendre de la surface au sol du local et de son encombrement au moment du contrôle. Par ailleurs, ce critère doit être applicable pour les bandes d'octave comprises entre 500 Hz à 4000 Hz.

Le critère a été élaboré en considérant comme suffisamment traité acoustiquement un local dont les propriétés d'absorption sont au moins égales à celles du cas n°2 pour lequel le plafond et la partie haute des parois verticales ont un coefficient d'absorption de $\alpha = 0.5$.

Il est possible de séparer les locaux réverbérants de ceux ayant reçu un traitement acoustique suffisant en utilisant le tracé de la pente par doublement de distance en fonction de la surface du local et ce pour les deux encombrements extrêmes étudiés. La limite D séparant les locaux traités des locaux réverbérants est représentée sur la figure 3:

- pour les locaux vides

$$D = D_v = 2 \text{ dB} \quad \text{pour} \quad S < 210 \text{ m}^2$$

$$D = D_v = 1.5 \text{ Log}(S) - 1.5 \quad \text{pour} \quad 210 \text{ m}^2 < S < 4600 \text{ m}^2$$

$$D = D_v = 4 \text{ dB} \quad \text{pour} \quad S > 4600 \text{ m}^2$$

où S représente la surface au sol du local.

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

- pour les locaux encombrés

$$D = D_e = 3 \text{ dB} \quad \text{pour} \quad S < 210 \text{ m}^2$$

$$D = D_e = 1.5 \text{ Log}(S) - 0.5 \quad \text{pour} \quad 210 \text{ m}^2 < S < 1000 \text{ m}^2$$

$$D = D_e = 4 \text{ dB} \quad \text{pour} \quad S > 1000 \text{ m}^2$$

où S représente la surface au sol du local.

Ainsi un local peut être considéré comme traité acoustiquement si la décroissance de l'énergie sonore par doublement de distance est supérieure à D . Si ce n'est pas le cas, il sera considéré comme un local réverbérant sur lequel devra être entreprise une action de traitement acoustique.

7. APPLICATION DU CRITERE PROPOSE A DES DONNEES EXPERIMENTALES.

Des mesures de courbes de décroissance spatiales de l'énergie sonore, effectuées dans 228 locaux industriels, ont permis de valider ce critère. Ces locaux ont été répartis en 6 classes:

Classe 1: 27 locaux vides n'ayant pas reçu de traitement acoustique

Classe 2: 107 locaux encombrés n'ayant pas reçu de traitement acoustique

Classe 3: 9 locaux vides dont au moins le plafond est recouvert d'un matériau isolant thermiquement. Il s'agit souvent d'un matériau fibreux revêtu d'une feuille d'aluminium.

Classe 4: 35 locaux encombrés dont au moins le plafond est recouvert d'un matériau isolant thermiquement (mêmes matériaux que pour les locaux de la classe 3).

Classe 5: 18 locaux vides dont au moins le plafond est recouvert d'un matériau absorbant.

Classe 6: 32 locaux encombrés dont au moins le plafond est recouvert d'un matériau absorbant.

Sur la Figure 4 sont représentées les distributions des écarts entre la pente par doublement de distance mesurée P_{dd} et la valeur fixée par le critère D . On observe que pour plus de 75% des cas, le critère permet bien de séparer les locaux industriels réverbérants de ceux ayant reçu un traitement acoustique.

- 15 % des locaux n'ayant pas reçu un traitement acoustique (classes 1 et 2) sont considérés comme traités acoustiquement d'après le critère. Pour la plupart des cas, il s'agit soit de locaux où les conditions de mesure sont particulières (décroissance relevée près d'une ouverture ou près d'une paroi absorbante), soit de locaux où l'encombrement constitué de textile est très dense et joue le rôle d'un traitement acoustique.

- 75% des locaux ayant reçu un traitement thermique (classes 3 et 4) ne satisfont pas le critère: ce type de traitement est jugé insuffisant par le critère proposé.

- 20% des locaux ayant reçu un traitement acoustique sont considérés comme réverbérants par le critère. Parmi ces locaux, on trouve surtout des locaux allongés ou de petites dimensions dont seul le plafond a reçu un traitement acoustique. Pour satisfaire le critère proposé, un traitement acoustique des parois verticales est nécessaire. Par ailleurs, on trouve aussi, comme précédemment des cas où les conditions de mesure sont particulières: certaines courbes de décroissance ont été relevées le long d'une cloison partielle réfléchissante.

Enfin, on a reporté sur la figure 5 des résultats obtenus par le B.I.A. [3] dans 95 locaux industriels encombrés parmi lesquels 65 locaux n'ont pas reçu de traitement acoustique et 30 locaux ont reçu un traitement acoustique.

Pour plus de 85% des cas, le critère permet de séparer les locaux non traités des locaux ayant reçu un traitement acoustique. Ce résultat confirme la validation effectuée précédemment.

8. CONCLUSION

Un critère permettant de juger de la qualité acoustique d'un local industriel a été élaboré à partir de simulations numériques réalisées à l'aide du logiciel d'acoustique prévisionnelle Rayscat. Des données expérimentales provenant de plus de 200 locaux industriels ont permis de valider ce critère. Pour plus de 80 % des cas, il permet bien de séparer les locaux réverbérants de ceux dont le plafond est recouvert d'un matériau absorbant.

Ce critère est utilisé aujourd'hui dans la nouvelle réglementation française. Celle-ci exige que tout local dans lequel doivent être installées des machines bruyantes doit être conçu de manière à minimiser la réverbération du bruit sur les parois lorsque cette réverbération doit occasionner une augmentation notable du niveau d'exposition. Cette nouvelle réglementation devrait conduire à terme, à la prise en compte du problème acoustique dès la conception d'un local industriel.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.M.ONDET, J.L.BARBRY - Modelling of sound propagation in fitted workshops using ray-tracing. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1989, 85, 2, pp 787-796.
- [2] A.M.ONDET, J.L.BARBRY - Sound propagation in fitted rooms. Comparison of different models. *Journal of Sound and Vibration*, 1988, 125, 1, pp 137-149.
- [3] J.MAUE - Raumakustische analyse von Werkhallen im rahmen von larminderungsbetriebsberatungen des BIA, VDI-KLM Tagung, 1990, Köln.

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

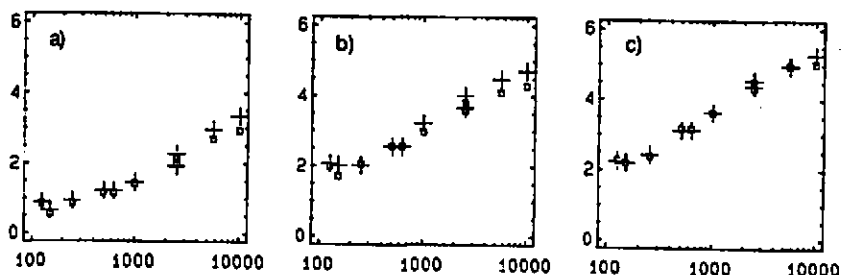


Figure 1 : Pente par doublement de distance en fonction de la surface au sol S des locaux vides étudiés pour les trois cas d'absorption considérés: (a) local réverbérant, (b) local moyennement absorbant, (c) local idéalement traité.

o : Hauteur du local = 4 m ; + : hauteur du local = 10 m

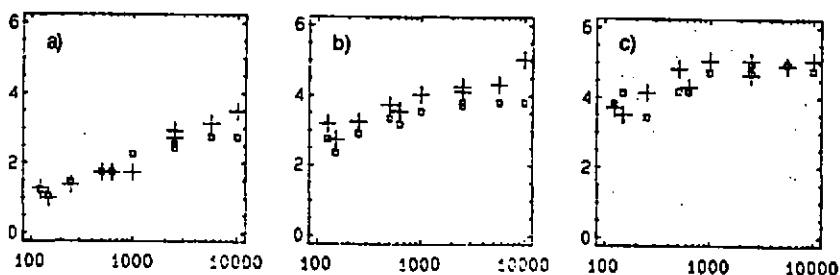


Figure 2 : Pente par doublement de distance en fonction de la surface au sol S des locaux encombrés étudiés pour les trois cas d'absorption considérés: (a) local réverbérant, (b) local moyennement absorbant, (c) local idéalement traité.

o : Hauteur du local = 4 m ; + : hauteur du local = 10 m

CRITERES POUR JUGER DE LA QUALITE ACOUSTIQUE DES LOCAUX INDUSTRIELS.

Figure 3 :
Illustration du critère séparant les locaux traités acoustiquement des locaux réverbérants.

— locaux vides;
- - - locaux encombrés.

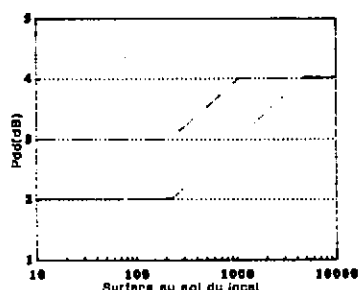


Figure 4 :
Distribution des écarts entre la pente par doublement de distance P_{dd} et le critère D pour tous les locaux industriels étudiés:

Classe 1 : Locaux vides dont le plafond n'a pas reçu de traitement acoustique
Classe 2 : Locaux encombrés dont le plafond n'a pas reçu de traitement acoustique

Classe 3 : Locaux vides dont le plafond a reçu un traitement thermique

Classe 4 : Locaux encombrés dont le plafond a reçu un traitement thermique

Classe 5 : Locaux vides dont le plafond a reçu un traitement acoustique

Classe 6 : Locaux encombrés dont le plafond a reçu un traitement acoustique

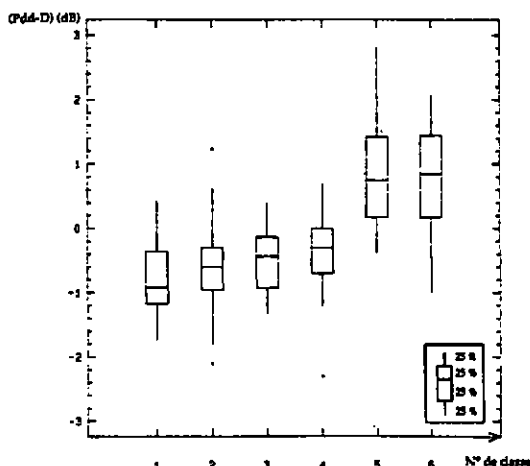


Figure 5 :
Pente par doublement de distance P_{dd} en fonction de la surface au sol du local.

Locaux encombrés sans o et avec + traitement acoustique.

— Critère pour les locaux encombrés.

Courbe extraite de [3].

