

L'ACOUSTIQUE DES PORTES

Marcelo Blasco, arch. & ir., chercheur,
division Physique du bâtiment et Climat
intérieur, CSTC

Une porte s'intègre dans une paroi de séparation dont les propriétés, conjointement à celles de la porte, déterminent l'isolement acoustique global. Outre les voies de transmission au travers de la paroi, il convient de tenir compte de la transmission latérale et structurelle du bruit. De nombreux autres paramètres sont également susceptibles d'influer sur l'isolement acoustique de l'ensemble. Enfin, pour compliquer le tout, il faut savoir que des résultats de mesures faites en laboratoire n'ont rien à voir avec des résultats obtenus dans un bâtiment réel. Cet article tente d'apporter quelques éclaircissements dans cette matière complexe.

1 NOTIONS ACOUSTIQUES DE BASE

1.1 PROPAGATION DES SONS ET ISOLEMENT ACOUSTIQUE

Nous étudierons dans cet article l'isolement des portes aux bruits aériens.

Lorsqu'un front sonore incident généré dans un local d'émission rencontre une surface séparant le local d'émission et le local de réception, il se divise en :

- ◆ une onde de réflexion
- ◆ une onde de transmission
- ◆ une onde absorbée par la paroi de séparation elle-même.

L'onde de transmission est créée par rayonnement de la surface de séparation, qui entre en vibration sous l'effet de l'onde incidente et augmente le niveau sonore dans le local de réception.

Il est clair que, pour améliorer l'isolement acoustique entre les deux locaux, il faut limiter l'onde de transmission. Plus celle-ci est réduite, meilleur est l'isolement acoustique de la paroi de séparation.

En règle générale, on a l'équation suivante :

$$x = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + \text{terme d'adaptation}$$

où :

x = spectre sonore R , D_n ou D_{nT} dépendant de la fréquence (il ne s'agit donc pas d'un indice unique)

$L_{\text{émission}}$ = niveau de pression acoustique dans le local d'émission (dB)

$L_{\text{réception}}$ = niveau de pression acoustique dans le local de réception (dB)

terme d'adaptation = $10 \log S/A$, $10 \log T/T_0$, ...

avec :

A = aire d'absorption (m^2)

S = surface de la paroi de séparation (m^2)

T = temps de réverbération (s)

$T_0 = 0,5$ s.

En réalité, dans un bâtiment, le bruit traverse les cloisons non seulement en ligne directe, mais aussi par des voies indirectes dites aussi voies de transmission latérales (cf. § 3). La figure 1 montre les voies de transmission latérales possibles au point d'intersection de deux murs ou d'un mur et d'une dalle de plancher.

Des ondes aériennes produites dans un local d'émission sont transformées en ondes mécaniques dans les murs latéraux, lesquels propagent ensuite des ondes sonores dans le local de réception.

L'importance de la transmission latérale dans le niveau de réception total dépend des pro-

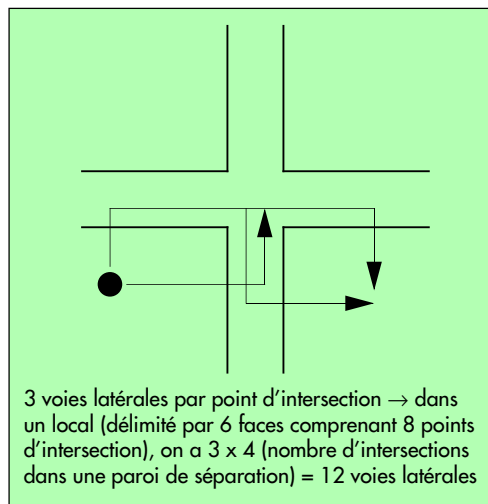


Fig. 1 Voies de transmission latérales au croisement de deux murs ou d'un mur et d'une dalle (coupe verticale ou horizontale).

3 voies latérales par point d'intersection → dans un local (délimité par 6 faces comprenant 8 points d'intersection), on a 3×4 (nombre d'intersections dans une paroi de séparation) = 12 voies latérales

priétés de la paroi de séparation par rapport aux parois latérales et aux discontinuités (joints) et jonctions présentes dans la structure.

Les plus grandes pertes d'isolement aux bruits aériens par transmission latérale surviennent dans les parois latérales légères ($30 \text{ kg/m}^2 < m'' < 100 \text{ kg/m}^2$), rigides en flexion et assemblées de manière rigide. Elles sont directement proportionnelles au pouvoir isolant de la cloison. La fréquence critique de ces parois est basse (voir plus loin) : $200 \text{ Hz} < f_{\text{crit}} < 1000 \text{ Hz}$.

Les parois souples ont une fréquence critique plus élevée qui favorise l'isolement aux bruits aériens (voir plus loin).

L'isolement aux bruits aériens des éléments de construction peut s'exprimer à l'aide d'un indice unique : R_w (C ; C_{tr}) selon la norme EN ISO 717-1 (1996). En règle générale, on peut dire que l'isolement aux bruits aériens est d'autant meilleur que l'indice R_w et/ou les termes d'adaptation C ; C_{tr} sont élevés.

Tableau 1 Exemples de valeurs R'_w (l'accent signifie que l'on tient compte de la transmission latérale, cf. § 3).

R'_w (dB)	PERCEPTION SUBJECTIVE DANS LE LOCAL VOISIN
62	inaudible (radio réglée sur une puissance élevée)
57	inaudible si radio réglée sur une puissance normale, perceptible si radio réglée sur une puissance élevée
52	perceptible (radio réglée sur une puissance normale)
47	conversation animée à peine perceptible, mélodies reconnaissables
42	conversation normale à peine perceptible
37	conversation normale clairement perceptible
32	radio mise en sourdine dans le local de réception

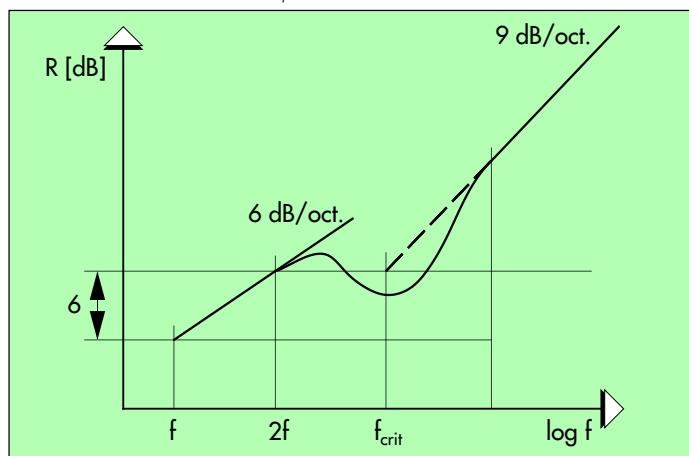
1.2 LOI DE MASSE

La courbe d'isolement acoustique des structures simples (non dédoublées) présente trois zones distinctes (figure 2).

□ La première est caractérisée par une hausse de l'isolement acoustique de 6 dB par octave (domaine de doublement de la fréquence) due à l'absorption de l'énergie sonore par la masse de la structure (loi de masse).

□ Dans la deuxième zone se produit un phénomène de coïncidence (à partir de la fréquence

Fig. 2 Courbe d'isolement acoustique des structures simples (R : isolement en dB; f : fréquence en Hz).



critique f_{crit}), qui infléchit la courbe d'isolement acoustique. La coïncidence survient lorsque la vitesse des ondes flexionnelles libres (ondes de vibration flexionnelle propres à une paroi soumise à un choc mécanique) est égale à celle des ondes forcées (résultant de l'onde incidente qui inculque à la paroi un schéma de déformation donné). Il s'agit d'élever la fréquence critique f_{crit} de manière à la situer dans un domaine moins pertinent pour l'acoustique du bâtiment (de préférence $f_{\text{crit}} > 2500 \text{ Hz}$).

La fréquence critique (dite aussi fréquence de coïncidence) est donnée par l'expression :

$$f_{\text{crit}} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m''}{B}} \text{ [Hz]}$$

dans laquelle :

c^2 vitesse du son ($\approx 344 \text{ m/s}$)

m'' masse surfacique de la paroi (kg/m^2)

B raideur flexionnelle par unité de largeur (Nm).

La fréquence critique f_{crit} augmente si la masse m'' s'accroît et/ou si la raideur B diminue.

Tout élément possède sa constante spécifique pour le produit $f_{\text{crit}} \cdot d$, d étant l'épaisseur de l'élément en mètres. Si l'épaisseur de la structure augmente, la fréquence critique f_{crit} baisse; toutefois, l'isolement acoustique global augmentera avec l'accroissement de la masse.

MATÉRIAU	$f_{\text{crit}} \cdot d$ [Hz.m]
Béton	17,3
Carton-plâtre	35,5
Verre	12,8
Bois	25,0
Plomb	51,2
Acier	12,8

Tableau 2
Produit de $f_{\text{crit}} \cdot d$
pour différents
matériaux.

C'est manifestement le plomb qui présente les meilleures propriétés d'isolement acoustique (f_{crit} élevée et grande flexibilité).

□ Dans la troisième zone, l'isolement acoustique augmente en théorie de 9 dB par octave.

1.3 PRINCIPE MASSE-RESSORT-MASSE

Les structures doubles (figure 3) peuvent, elles aussi, présenter une courbe d'isolement en trois zones (figure 4).

□ Zone 1 : $f < f_r$ (fréquence de résonance); l'isolement acoustique augmente en théorie de 6 dB par octave sous l'effet de la loi de masse.

□ Zone 2 : $f \geq f_r$; l'isolement acoustique augmente théoriquement de 18 dB par octave (effet de la double paroi) à partir de la fréquence de résonance, soit :

$$f_r = \frac{C}{\sqrt{d}} \sqrt{\frac{1}{m''_1} + \frac{1}{m''_2}} \text{ [Hz]}$$

Fig. 3
Modélisation d'une structure double.

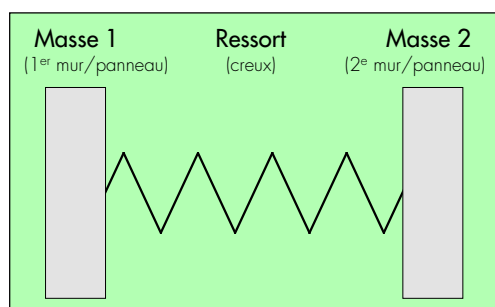
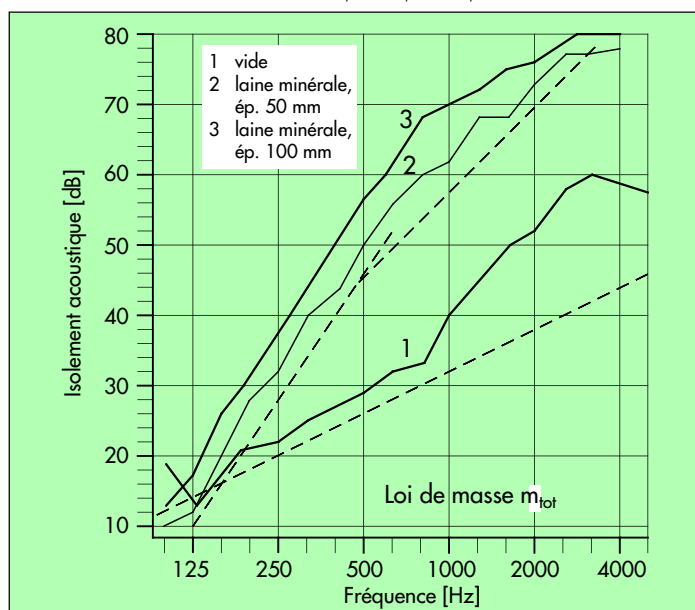


Fig. 4 Courbe d'isolement acoustique d'une structure double (composition : panneau dur de fibres de bois 3 mm / vide 160 mm / panneau dur de fibres de bois 6 mm, sans ponts phoniques).



avec :

$C = 60$ pour des ondes incidentes perpendiculaires, 75 pour des ondes incidentes obliques et 90 pour des ondes incidentes omnidirectionnelles

$d =$ épaisseur du vide entre les deux masses (m)

$m'' =$ masse surfacique des deux parois (kg/m^2).

La fréquence de résonance f_r doit être aussi basse que possible, car c'est à partir de celle-ci que la hausse de l'isolement devient effective. Le rendement ne porte réellement ses effets qu'à partir d'une valeur de $1,5 f_r$.

□ Zone 3 : $f \gg f_r$; la courbe (théoriquement + 12 dB par octave) évolue au gré de la résonance produite par les ondes stationnaires dans le creux. On limite le phénomène en garnissant ce dernier d'un matériau possédant des propriétés d'absorption acoustique, telle la laine minérale ("ressort" acoustique).

Le matériau absorbant doit posséder les caractéristiques suivantes :

- ◆ ne pas former de liaison rigide entre les deux parois
- ◆ offrir une résistance au passage de l'air qui, sans être excessive, soit suffisamment élevée (on doit pouvoir souffler au travers).

Dans les applications constructives, on s'efforce d'obtenir les valeurs suivantes :

- $f_r < 80$ Hz pour les maisons et les immeubles soumis à des exigences acoustiques sévères
- $f_r < 60$ Hz pour les studios d'enregistrement
- $f_{crit} > 2500$ Hz ou $f_{crit} < 100$ Hz pour les maisons et les immeubles courants
- $f_{crit} > 3500$ Hz ou $f_{crit} < 100$ Hz pour les studios d'enregistrement.

1.4 STRUCTURES PERFORMANTES A DOUBLE PAROI

Le respect des règles ci-après permettra de réaliser des structures offrant de bonnes performances acoustiques :

1. éviter les ponts phoniques, c'est-à-dire les liaisons rigides entre les parois des structures doubles; ce principe est d'autant plus important que les parois sont rigides elles aussi. Parmi les moyens d'assemblage souple, citons notamment les profilés métalliques légers ou les joints en néoprène
2. adopter une fréquence de coïncidence f_{crit} différente pour chaque paroi, afin de répartir l'effet. On utilise pour ce faire des parois d'épaisseur différente, bien que cette mesure

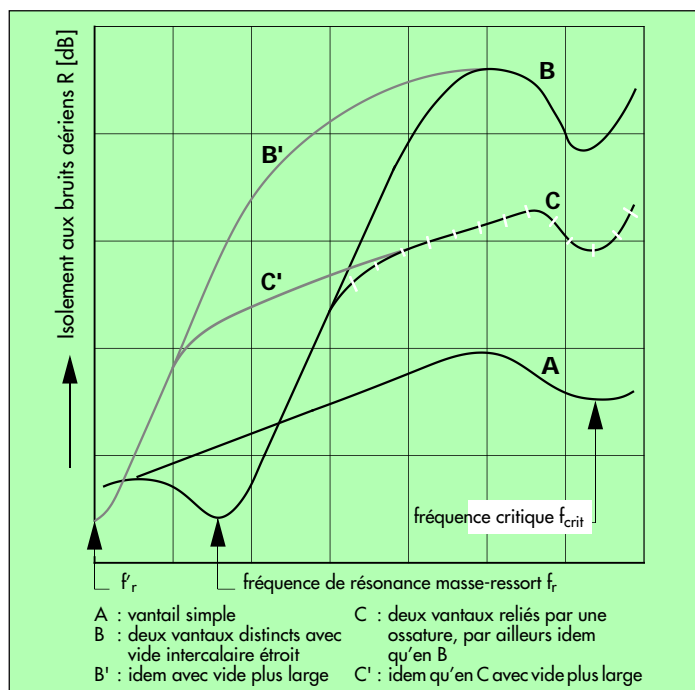


Fig. 5 Synthèse des données relatives aux structures simples et aux structures doubles.

- n'ait quasiment plus d'effet si $f_{crit} > 2500$ Hz
- garnir le creux d'un matériau absorbant poreux, afin d'empêcher la résonance. Un remplissage complet ne peut renforcer la raideur de l'ensemble. Le creux doit en fait agir comme une juxtaposition de petits ressorts indépendants
 - choisir une fréquence de résonance f_r aussi basse que possible et en tout cas < 100 Hz
 - éviter les interstices en assurant leur étanchéité à l'air; cette mesure permettra surtout d'améliorer l'isolement acoustique dans les hautes fréquences.

1.5 SYNTHÈSE

On trouvera, à la figure 5, une synthèse des données relatives aux structures simples et aux structures doubles.

La composition de la plupart des portes est représentée par les courbes A, C et C'. Des solutions conformes à B et B' sont difficiles à réaliser et requièrent un soin particulier.

2 APPLICATION AUX PORTES

2.1 PAROI DE SÉPARATION

Une porte s'intègre dans une paroi de séparation dont les propriétés déterminent, conjointement

à celles de la porte, l'isolement acoustique global :

- la cloison peut être conçue ou non comme une structure creuse
- la chape (flottante) est interrompue de préférence au droit de la porte; on augmente ainsi l'isolement acoustique de 2 à 3 dB, puisqu'on élimine une voie de transmission latérale. La finition du plancher est réalisée au moyen d'un revêtement absorbant (tapis) ou d'un matériau plus réfléchissant (revêtement de sol dur, par exemple)
- quant au plafond, il peut être doublé d'un faux plafond, qui modifie le coefficient d'absorption du local.

Une cloison est généralement constituée de plusieurs éléments dotés de caractéristiques acoustiques différentes. Pour déterminer son isolement global (R_{tot}), il faut connaître la part de la surface de chaque élément dans la surface totale de la cloison ainsi que l'isolement acoustique propre à chaque élément (R_i), soit la relation :

$$R_{tot} = -10 \log \left(\sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_i}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_i}{10}} \right)$$

avec S_i = surface de l'élément i (m^2).

La surface totale d'une cloison comportant une porte équivaut à la surface de la porte plus celle des parties fixes de la cloison. L'expression précédente prend alors la forme suivante :

$$-10 \log \left(\frac{S_{porte}}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{porte}}{10}} + \frac{S_{paroi}}{S_{tot}} 10^{\frac{-R_{paroi}}{10}} \right)$$

Cette expression ne tient pas compte de la transmission latérale et structurelle du bruit (notamment par l'huissierie, cf. § 2.2).

2.2 HUISSIERIE

Les défaillances locales dans l'isolement, telles que l'absence d'étanchéité à l'air ou la présence de mousse synthétique rigide sont susceptibles de réduire considérablement les performances acoustiques de l'ensemble.

Le nombre de feuillures prévues dans l'huissierie joue un rôle capital pour l'étanchéité à l'air de la porte. Plus il y a de feuillures, plus on a de chances d'assurer cette étanchéité. Cependant, une huissierie très soignée comportant une seule feuillure peut, à ce point de vue,

offrir des performances similaires. Par ailleurs, les systèmes à feuillures multiples exigent une finition très soignée, et la sollicitation relative des joints est moindre qu'avec une seule feuillure : il faut en effet moins de force pour fermer la porte et exercer une pression suffisante sur les joints (cf. § 2.4).

Les paramètres importants en ce qui concerne l'huissierie sont :

- ◆ la jonction avec la cloison
- ◆ la masse des profilés d'encadrement
- ◆ la jonction au plancher
- ◆ la précision du montage.

Ajoutons à cela les sollicitations mécaniques qui peuvent provoquer des déformations, surtout dans les profilés en bois (cintrage, ...). L'acier, de par sa plus grande stabilité dimensionnelle, engendre moins de problèmes acoustiques.

L'huissierie peut se trouver dans un mur massif comme dans un mur creux.

2.2.1 RACCORD DANS UN MUR MASSIF (MUR SIMPLE)

Une *huissierie en acier* enserme le mur sur toute son épaisseur; l'espace compris entre l'huissierie (qui est d'une seule pièce) et le mur est rempli de béton liquide. Ce dernier assure la continuité de l'ensemble et garantit donc l'étanchéité à l'air. Ce type d'application rencontre des exigences d'isolement acoustique supérieures à 35 dB.

L'assemblage d'une *huissierie en bois* se fera de préférence en biseau pour mieux garantir l'étanchéité à l'air lorsque la porte est fermée. La partie médiane des surfaces de contact entre l'huissierie et le vantail sera couverte d'une couche de feutre. L'huissierie en bois étant constituée de plusieurs éléments (ébrasement, chambranles, etc.), l'étanchéité à l'air sera plus délicate à réaliser et les performances acoustiques s'en trouveront donc affaiblies.

Dans le meilleur des cas, l'espace compris entre l'huissierie et le mur sera rempli de laine minérale (pas de mousse synthétique). Le masticage des joints permettra d'améliorer l'étanchéité à l'air, mais il est généralement omis pour des raisons d'esthétique.

Lorsque l'huissierie n'est pas biseautée, la présence de plusieurs feuillures (deux à trois) gagne en intérêt (voir aussi § 2.4).

2.2.2 RACCORD DANS UN MUR CREUX (MUR DOUBLE)

L'*huissierie en acier* est similaire à celle utilisée dans les murs massifs, mais elle comporte une rupture acoustique, afin de conserver l'avantage du mur double. En effet, il est évident qu'en l'absence de mesures particulières, l'huissierie risque de faire fonction de pont phonique.

La transmission des sons d'un local à l'autre s'opère par l'huissierie (transmission structurelle) parce que cette dernière est constituée d'une seule pièce. Il est donc indispensable d'y incorporer une rupture acoustique pour faire obstacle au passage du bruit. Pour ce faire, on pratique généralement un trait de scie dans l'ébrasement.

On peut également ancrer l'huissierie dans une seule paroi du mur creux afin d'améliorer les performances acoustiques. Il convient dans ce cas d'obturer le creux en évitant tout contact rigide entre les deux parois. Les huissieries en acier sont généralement plus étanches à l'air que les huissieries en bois (voir § 2.2.1). On y a recours dans les cas où des valeurs d'isolement acoustique supérieures à 35 dB sont exigées.

Composées de plusieurs pièces (collées ou clouées), les *huissieries en bois* se prêtent moins aisément à la transmission structurelle, mais, ici encore, l'étanchéité à l'air n'est pas à négliger.

2.3 VANTAIL

2.3.1 PORTE PLEINE OU A SIMPLE EPAISSEUR (LOI DE MASSE)

Les paramètres suivants ont une incidence sur l'isolement acoustique des portes pleines :

- ◆ la masse par unité de surface (m'' en kg/m^2)
- ◆ la raideur flexionnelle (B en Nm).

L'isolement aux bruits aériens sera d'autant plus grand que la masse de la porte est élevée et que sa raideur flexionnelle est faible.

Il existe plusieurs techniques permettant d'accroître la masse d'une porte :

- ◆ soit utiliser des matériaux lourds (de masse m'' plus élevée)
- ◆ soit appliquer un lestage (plomb en vrac ou en plaques).

Parmi les portes pleines, on distingue :

- ◆ la porte massive
- ◆ la porte à panneaux tubulaires en aggloméré, remplis ou non de sable
- ◆ la porte légère à structure alvéolée en papier ou en carton, ou à ossature légère revêtue de panneaux durs collés en fibres de bois ou en triplex de 4 mm d'épaisseur
- ◆ la porte lamellaire, dont les caractéristiques déterminantes sont le nombre de feuilles (un nombre de feuilles élevé augmente la masse sans accroître d'autant la raideur en flexion), le type de matériau et l'encollage (complet ou par points). La finition est généralement réalisée par placage (0,5 mm).

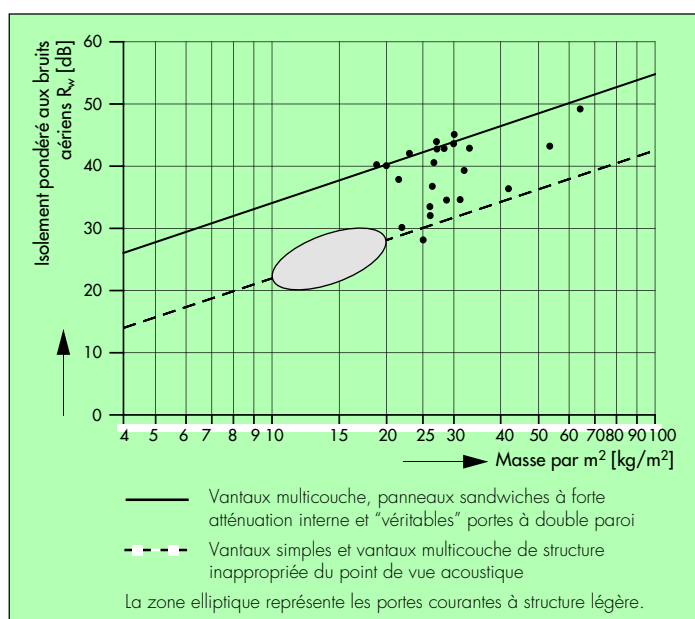


Fig. 6 Isolement acoustique R_w des portes en fonction de leur masse surfacique.

2.3.2 PORTE A DOUBLE PAROI (SYSTEME MASSE-RESSORT-MASSE)

Pour les portes à double paroi présentant une structure masse-ressort-masse, il y a lieu de tenir compte des paramètres suivants :

- ◆ la largeur du creux (d en m)
- ◆ la masse surfacique des panneaux (m" en kg/m^2)
- ◆ la raideur flexionnelle (B en Nm).

L'isolement aux bruits aériens s'améliore lorsque la valeur de d et/ou de m" augmente et que la valeur de B diminue.

Pour absorber les sons dans le creux, on utilise un matériau poreux à cellules ouvertes (non rigide) et on évite les raccords entre les deux panneaux. Pour le vantail, on conseille les pan-

neaux de particules et les panneaux de multi-plex (épaisseur < 10 mm); un lestage de plomb améliorera les résultats.

On peut obtenir des valeurs d'isolement supérieures à 40 ou 50 dB notamment avec des portes en acier à double paroi composées de panneaux fléchissants enserrant un large creux (les tôles ondulées sont conseillées pour obtenir un assemblage moins rigide).

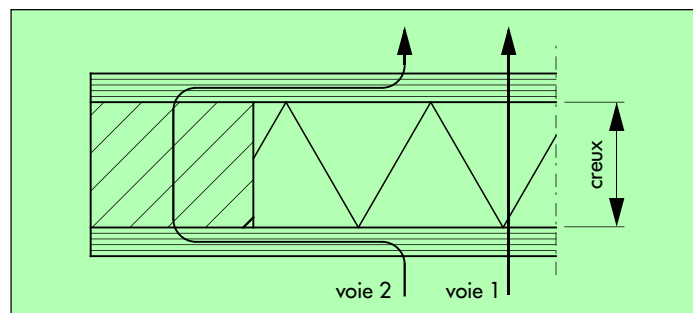


Fig. 7 Exemple de vantail où le principe MRM n'est pas correctement appliqué : la voie 2 entrave l'action du système. Des solutions de continuité telles que des joints en néoprène (rupture acoustique) permettent d'améliorer la situation.

2.4 ETANCHÉITÉ DES INTERSTICES

L'isolement acoustique de la porte dépend dans une large mesure de la manière dont est traitée l'étanchéité des interstices et surtout l'étanchéité périphérique du vantail, c'est-à-dire :

- ◆ le joint entre la porte et l'hubriserie
- ◆ le joint entre la porte et le plancher (déterminant pour l'isolement acoustique).

La jonction entre la porte et l'hubriserie est réalisée à l'aide des profilés synthétiques suivants :

- ◆ à section fermée (tubulaire) : leur déformation exige une force assez importante, tandis que leur surface de contact avec la porte est réduite, ce qui est un inconvénient lorsque l'élément "travaille". Un effort important est nécessaire pour bien comprimer les profilés sur tout le pourtour de la porte
- ◆ à lèvres : ces profilés se déforment bien et conviennent mieux aux grandes portées; ils sont également indiqués lorsque les portes ne sont pas planes.

On obtient des valeurs d'isolement plus élevées avec des joints doubles dotés d'un profil à lèvres.

Dans le cas de joints à languette, une languette métallique appliquée sur les bords de la porte comprime une mousse souple à cellules fermées (figure 9).

Fig. 8 Types de joints et leur qualité acoustique.

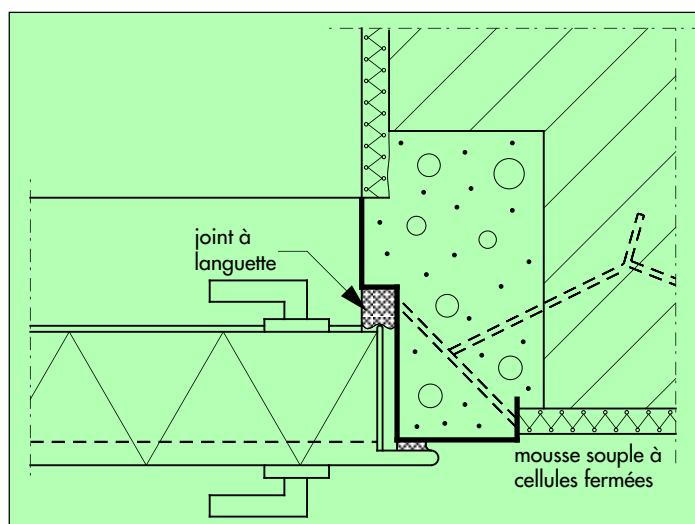
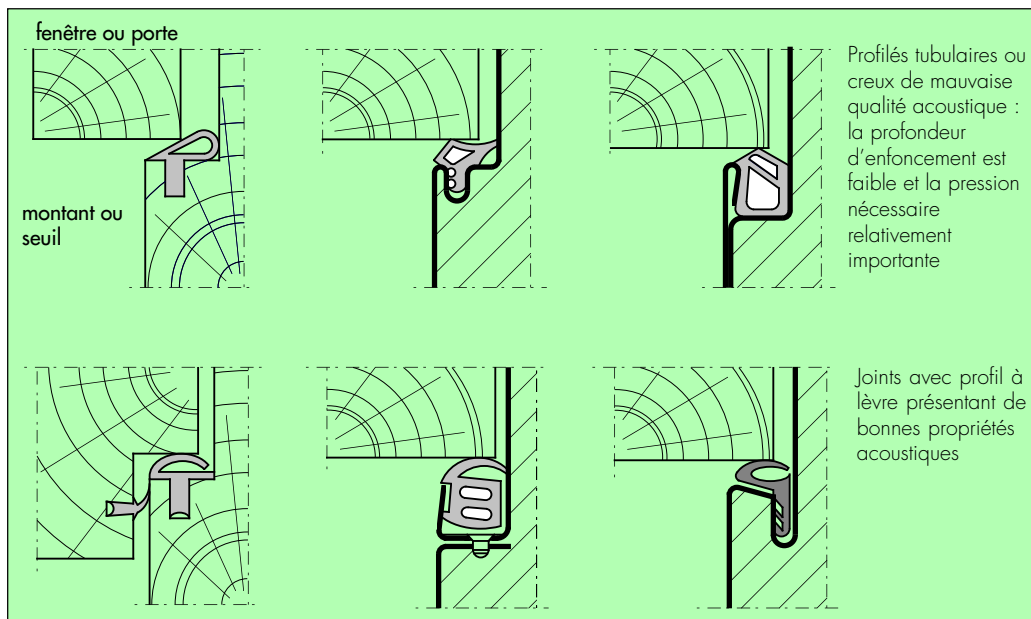


Fig. 9 Joint de porte métallique.

2.4.1 ETANCHÉITÉ VANTAIL-PLANCHER

Pour assurer l'étanchéité entre le vantail et le plancher, on peut faire appel aux techniques suivantes :

- ◆ seuil surélevé contre lequel la porte vient buter par le biais de profilés synthétiques; cette solution n'est toutefois pas idéale pour la circulation (transport de chariots, ...)
- ◆ profilé mobile monté à la base de la porte, qui se plaque, à la fermeture, sur une bande d'acier plat intégrée dans le plancher
- ◆ profilé fixe (tubulaire ou à lèvres) balayant le plancher et butant contre un seuil concave en métal ou en matière plastique
- ◆ bords absorbants : le jour entre la porte et le plancher est limité, d'un côté, par une bande de matériau poreux absorbant, généralement recouverte d'une plaque perforée.

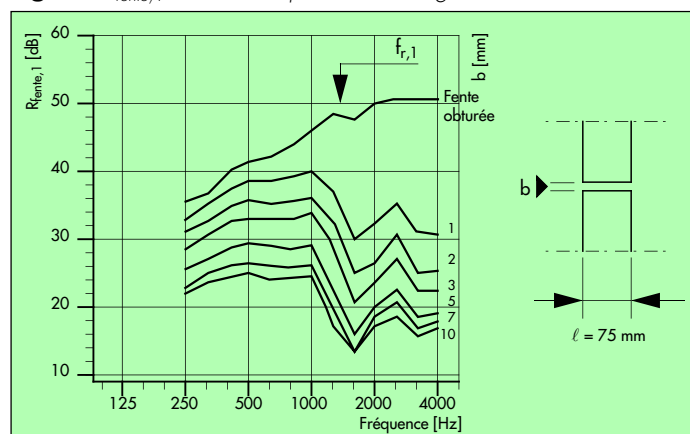
Le tableau 3 et la figure 10 montrent combien la présence d'interstices est néfaste pour l'isolement acoustique. Les valeurs reprises dans le tableau sont des valeurs limites, quelles que soient par ailleurs la masse et l'obturation de la fente. Elles s'appliquent aux revêtements de sol réfléchissants synthétiques, aux parquets et aux carrelages réfléchissants. En présence de tapis, la valeur d'isolement de la fente est > 0 (dans les moyennes et les hautes fréquences).

C'est surtout dans les hautes fréquences que les ouvertures réduisent l'isolement acoustique (ondes plus courtes), mais à mesure que la fente s'élargit, l'impact sur les basses fréquences se fait plus sensible.

Tableau 3 Influence des interstices sur l'isolement acoustique.

Hauteur du jour sous la porte (mm)	0,5	1	5	10	20	30	40
Valeur limite de l'isolement (dB)	36	33	26	23	20	18	17

Fig. 10 $R_{fente,1}$ selon la fréquence et la largeur de l'interstice.



Les vantaux présentant de bonnes performances acoustiques nécessitent une attention plus particulière pour tous les aspects qui influencent l'isolement acoustique.

2.4.2 COMPRESSION DES JOINTS

Les chiffres ci-après illustrent l'impact de l'ouverture des fentes autour des portes (côté charnière / côté opposé / haut / bas) :

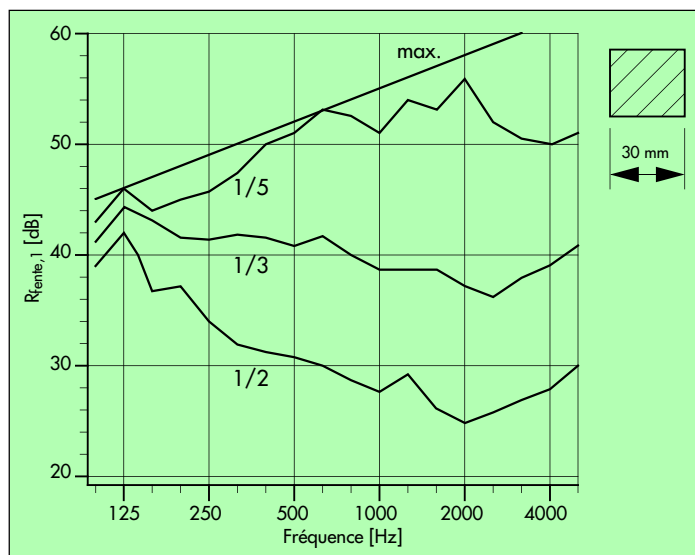
- ◆ porte de 45 dB(A) : 1 / 1 / 1 / 3 mm
- ◆ porte de 40 dB(A) : 2 / 2 / 2 / 3 mm.

Le facteur de compression du matériau est un paramètre très significatif de l'efficacité du joint : plus celui-ci est comprimé (lorsque la porte est fermée), meilleur est l'isolement acoustique.

La figure 11 montre l'évolution, en fonction de la fréquence, de l'isolement acoustique d'une fente garnie d'un joint, lorsqu'on prend comme critère le facteur de compression. Nous voyons que, si le joint est comprimé jusqu'à un cinquième de son épaisseur initiale, l'isolement acoustique est meilleur que si la compression était moins forte.

La localisation de la fente a également son importance : une ouverture entre deux éléments de paroi situés dans un même plan réduit l'isolement acoustique de quelque 3 dB, alors qu'une fente dans un angle (dièdre) peut conduire à une baisse de 6 dB. Il importe donc d'être attentif à l'ouverture des joints, surtout au bas des portes.

Fig. 11 Isolement acoustique d'une fente garnie d'un joint en fonction de la fréquence.



2.5 SERRURES ET PENTURES

On recherche généralement un équilibre entre les performances acoustiques de la porte et sa maniabilité (facilité d'utilisation). Si la masse du vantail joue un rôle déterminant à ce point de vue, les organes de verrouillage interviennent également (fermeture à un, deux ou trois points). Pour des portes offrant une bonne isolation (> 40 dB), on prévoit au minimum une fermeture à deux points ou, mieux, à trois points afin de bien comprimer le joint de manière uniforme sur toute sa longueur et de garantir ainsi un bon isolement acoustique (cf. § 2.4).

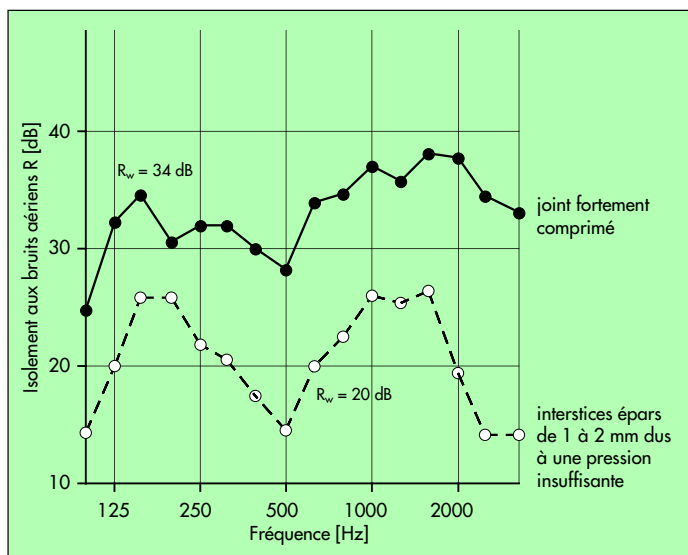
Il est évident que les organes de commande ne peuvent compromettre l'étanchéité à l'air de l'ensemble de la porte et que leur manipulation ne peut être source de bruit.

3 VOIES DE TRANSMISSION DU BRUIT

3.1 CAS DES PAROIS EN GENERAL

En cas de transmission directe du bruit entre deux locaux, les ondes sonores générées dans un des locaux frappent une paroi de séparation. Selon les propriétés de cette dernière, une partie des ondes incidentes traverse directement la paroi pour aboutir dans le local adjacent (cf. § 1).

Fig. 12 Influence de la compression des joints.



VANTAIL ($R_{w-lab} = 42$ dB) AU-DESSUS DU TAPIS, JOINT NON ÉTANCHE

- A. VANTAIL MASSIF, JOUR 2 mm
- B. VANTAIL AVEC ENCOCHE
- C. VANTAIL AVEC ENCOCHE garnie de laine minérale et fermée par une membrane poreuse

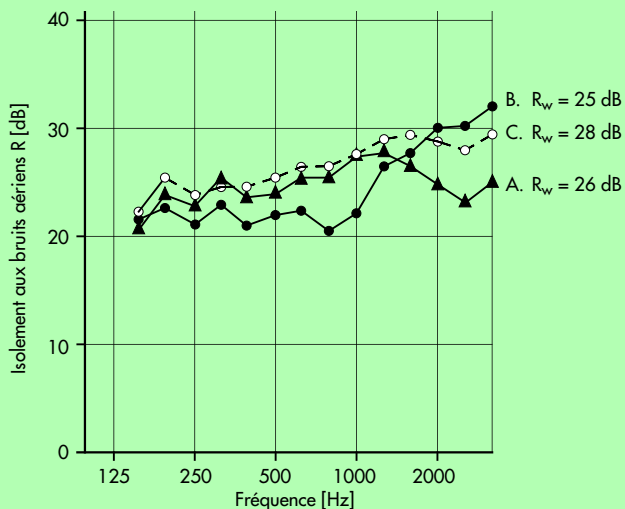
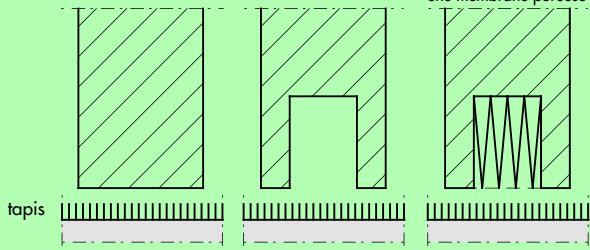


Fig. 13 Influence d'un tapis plain et de la finition au bas de la porte.

VANTAIL ($R_{w-lab} = 42$ dB) AU-DESSUS DU REVÊTEMENT EN PVC, JOINT NON ÉTANCHE

- A. VANTAIL MASSIF, JOUR 5 mm
- B. VANTAIL AVEC ENCOCHE
- C. VANTAIL AVEC ENCOCHE garnie de laine minérale et fermée par une membrane poreuse

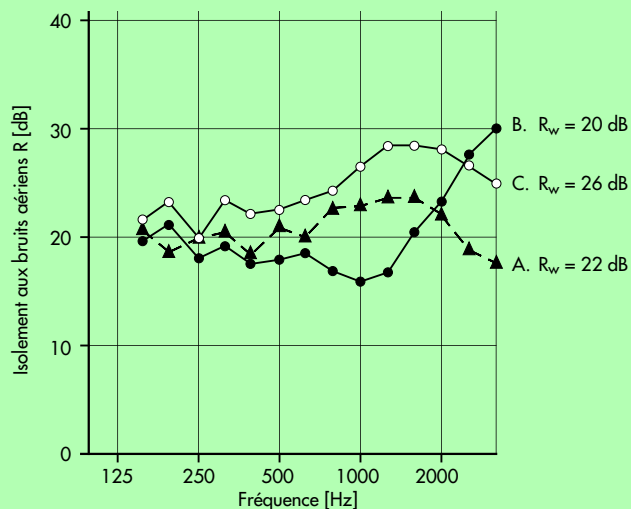
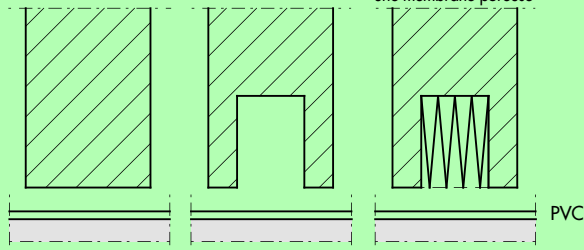


Fig. 14 Influence d'un revêtement de sol en PVC.

Fig. 15 Types de joints permettant d'assurer l'étanchéité entre une porte et le sol.

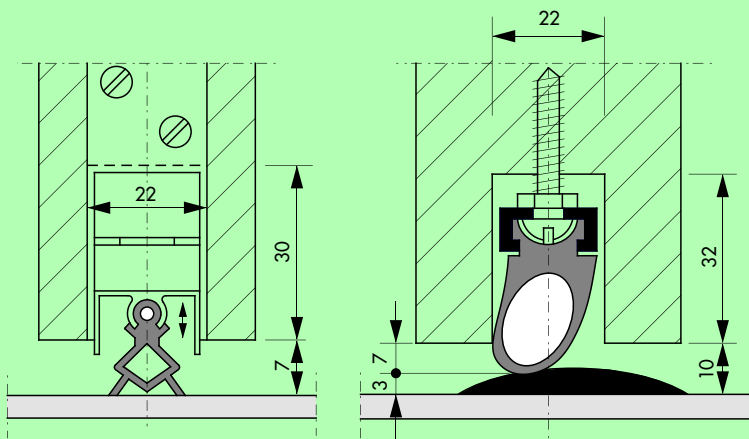
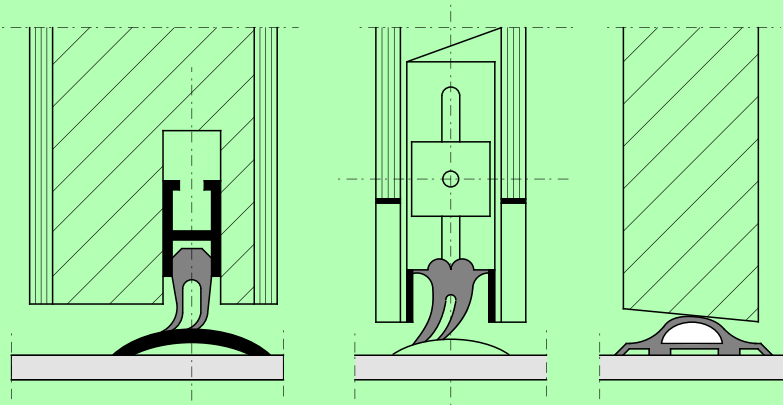


Fig. 16 Joints à lèvres permettant d'assurer l'étanchéité entre une porte et le sol.



Toute voie de transmission autre qu'une voie directe est, par définition, une voie de transmission indirecte (latérale ou structurelle) entre deux locaux.

Il existe douze voies (principales) de transmission indirecte entre deux locaux (sachant qu'une paroi de séparation comporte quatre sommets d'angle).

La transmission latérale aura, en termes relatifs, d'autant plus d'importance que la surface de séparation directe est très isolante et que la surface de transmission latérale est plus grande que la surface de séparation directe (du point de vue géométrique).

Dans le meilleur des cas, l'isolement acoustique d'une paroi de séparation diminuera de 2 à 3 dB si sa masse surfacique (en kg/m^2) est inférieure à celle des parois latérales. Dans le pire des cas, l'isolement acoustique baissera de plus de 10 dB si la masse surfacique de la paroi de séparation est environ deux fois supérieure à celle des parois latérales.

In situ, les voies de transmission latérales sont toujours présentes dans les logements de construction courante. Les matériaux testés en laboratoire ont un isolement acoustique plus faible *in situ* du fait de la transmission latérale, les essais de laboratoire étant (généralement) réalisés en l'absence de transmission latérale.

3.2 VOIES DE TRANSMISSION DES PORTES

La transmission directe des sons à travers un vantail de porte s'opère de la même façon que dans le cas d'une paroi.

Toutefois, l'isolement acoustique est mis à mal par les ouvertures qui se situent le plus souvent au bas de la porte, mais aussi tout le long de l'hubrisserie si la pression sur les joints est insuffisante (cf. § 2.4).

Pour déterminer l'isolement acoustique global du mur et de la porte, on veillera à appliquer la formule de l'isolement acoustique des éléments composites. Celle-ci tient compte de la proportion des différentes surfaces qui contribuent à l'isolement global de la paroi de séparation. C'est l'élément le moins performant du point de vue acoustique qui déterminera l'isolement total, et son impact sera d'autant plus important que la surface qu'il occupe dans la paroi est étendue.

En cas de transmission indirecte (structurelle), la propagation des sons s'effectue par l'intermédiaire de l'hubrisserie. Celle-ci constitue la surface d'incidence des ondes sonores; la structure transmet leur énergie dans le local voisin, où elle est à nouveau transformée en ondes sonores. Les pertes, considérables dans les murs doubles (murs creux), sont moindres dans les murs simples (de l'ordre de 2 à 3 dB). Le problème se pose avec plus d'acuité dans les hubrisseries métalliques d'un seul tenant. La désolidarisation acoustique (trait de scie, ancrage dans une seule paroi du mur) revêt toute son importance lorsqu'on est en présence d'une bonne porte isolante et d'un mur double (mur creux). L'utilisation d'un mastic à élasticité permanente est également recommandé pour le raccord entre l'hubrisserie et le mur.

Remarque : la comparaison entre une structure mesurée en laboratoire et *in situ* est malaisée. Des études approfondies sont en cours afin de pouvoir poser *in situ* un pronostic valable quant à l'isolement acoustique sur la base de mesures réalisées en laboratoire.

Il faut tenir compte des facteurs suivants :

- ◆ pour effectuer des mesures sur un vantail en laboratoire, on obture entièrement le pourtour de la porte afin de connaître la valeur d'isolement acoustique réelle de l'élément
- ◆ dans le cas d'une porte complète (sans calfeutrement), celle-ci est confectionnée avec le plus grand soin et dans des conditions optimales, ce qui est généralement (quasi) impossible *in situ*
- ◆ les mesures de laboratoire s'effectuent (la plupart du temps) sans transmission latérale
- ◆ la part que représente la surface de la porte dans le mur est différente en laboratoire et *in situ*.

Les résultats atteints en laboratoire sont généralement plus favorables que ceux obtenus dans la pratique. Il en va de même pour les portes extérieures. En laboratoire, on effectue toujours les mesures en champ diffus, c'est-à-dire avec une pression acoustique composée d'ondes sonores omnidirectionnelles de même intensité. Dans le cas d'une porte extérieure *in situ*, on se trouve en présence d'un champ libre (réel), bien différent du champ diffus du laboratoire. L'incidence sur la porte sera alors plus grande (à pression acoustique égale, l'intensité est quatre fois supérieure en champ libre qu'en champs diffus). En pratique, pour une porte extérieure, on retiendra que les mesures de laboratoire conduisent à une surestimation de l'isolement acoustique de 3 dB. Dans le cas

des portes extérieures, il vaut donc mieux, pour se ménager une marge de sécurité, déduire ces 3 dB afin de tenir compte du caractère non diffus du bruit extérieur pénétrant dans le bâtiment.

En théorie, on devrait obtenir un écart de 6 dB; toutefois, en raison de phénomènes diffus qui se manifestent malgré tout en milieu extérieur (réflexions sur les bâtiments voisins, etc.), on retient en pratique une valeur de 3 dB.

3.3 AMÉLIORATION DE L'ISOLEMENT ACOUSTIQUE DES PORTES *IN SITU*

□ Dans certains cas, le couvre-joint n'est pas suffisamment comprimé sur toute sa longueur, notamment lorsque la porte est dotée d'une fermeture à un point et qu'elle subit des déformations. L'emploi d'une *fermeture à trois points* peut apporter une certaine amélioration.

L'amélioration du couvre-joint s'impose dans tous les cas lorsque les joints n'ont pas de bonnes performances acoustiques. Il serait vain d'envisager d'autres mesures si l'étanchéité des joints n'est pas correctement assurée.

La solution est relativement aisée, mais elle ne procure généralement que des améliorations de 2 ou 3 dB. De plus, la porte y perd en maniabilité car elle exige une certaine vigueur à la fermeture.

□ Le renforcement de la porte par l'*ajout d'une masse* de mêmes dimensions que le vantail permet d'obtenir des améliorations de 6 dB (en fonction de la masse supplémentaire), mais cette intervention est délicate sur le plan constructif. L'aspect de l'ensemble est modifié et la porte est moins maniable (selon la masse).

□ La *création d'un sas* entre la porte d'origine et une porte nouvellement posée (à 15 cm de distance au moins) procure d'excellents résultats : 6 dB et davantage selon les qualités de la porte neuve et l'espace intermédiaire. La confidentialité est garantie. Toutefois, cette solution a comme inconvénient d'être difficile à réaliser, coûteuse et de piètre maniabilité.

□ Le *camouflage du bruit* par l'émission d'un signal "antibruit" (bruit blanc ou musique) ne nécessite pas d'intervention au niveau de la

construction; sa réalisation est donc aisée. Cette technique peut toutefois représenter une gêne pour les occupants et n'est pas applicable dans les locaux où de faibles niveaux sonores sont exigés.

D'autres solutions sont bien sûr envisageables selon la destination des locaux et le niveau de pression acoustique requis.

3.4 MESURE DE L'ISOLEMENT ACOUSTIQUE D'UNE PORTE

Lorsqu'on détermine l'isolement acoustique d'une porte (aux bruits aériens), il faut s'assurer que l'isolement du mur soit supérieur d'au moins 10 dB (voir formule) à celui de la porte *in situ* (ce qui est généralement le cas). Cela ne pose aucun problème en laboratoire : il suffit de construire un mur répondant à cette exigence.

La formule utilisée pour la réalisation des mesures est :

◆ en laboratoire :

$$R = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log S/A \quad (1)$$

avec :

R indice d'affaiblissement acoustique (dB)

L niveau de pression acoustique à l'émission ou à la réception (dB)

S surface de la structure de séparation (m²)

A aire d'absorption du local de réception (m²)

◆ *in situ* :

$$D_n = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log 10/A \quad (2)$$

$$D_{nT} = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log 2T \quad (3)$$

avec

D_n isolement acoustique normalisé entre locaux *in situ* (dB)

D_{nT} isolement acoustique standardisé entre locaux *in situ* (dB)

T temps de réverbération dans le local de réception (s)

A aire d'absorption du local de réception (m²).

On peut réaliser quatre sortes de mesures :

- mesure de la porte, corrigée en fonction de la surface de l'ensemble, joints obturés ou non (en laboratoire : S = surface de la cloison)
- mesure de la porte, corrigée en fonction de sa surface, joint obturés ou non (en laboratoire : S = surface de la porte)

(1) Cf. normes NBN S 01-005 et NBN EN ISO 140-3.

(2) Cf. norme NBN S 01-006.

(3) Cf. norme NBN EN ISO 140-4.

- c. mesure du vantail (joints obturés), corrigée en fonction de la surface de l'ensemble (en laboratoire et *in situ*)
- d. mesure du vantail (joints obturés), corrigée en fonction de la surface de la porte (en laboratoire et *in situ*).

Si la procédure est identique pour les quatre mesures, il y a une différence dans le traitement des données. Le terme d'adaptation S/A aura une valeur différente dans chacun des cas envisagés. Lorsque l'adaptation s'opère sur la surface de la cloison, on obtient un meilleur isolement acoustique (S est plus grand).

3.5 AMBIGUÏTÉ DES MESURES EN LABORATOIRE

Les mesures effectuées sur les portes renferment généralement une ambiguïté quant au terme d'adaptation "10 log S/A" utilisé.

Dans cette formule, le facteur S représente une surface. Si l'on veut caractériser la porte seule, S est égal à la surface du vantail. Si l'on vise l'ensemble du mur, S représente l'ensemble mur + porte. Il est évident que ce dernier calcul produira une plus grande valeur d'isolement acoustique. Quand un cahier des charges exige une valeur R_w déterminée pour une porte (et non pour une porte et un mur), il est conseillé de bien vérifier si la valeur R_w citée dans le rapport d'essai se rapporte effectivement à la surface de la seule porte.

Différence entre les deux résultats de mesure :

- a. pour l'ensemble mur + porte :

$$R = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log S/A$$

$$= L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log (S_{\text{porte}} + S_{\text{mur}})/A$$
- b. pour la porte seulement :

$$R_{\text{porte}} = L_{\text{émission}} - L_{\text{réception}} + 10 \log S_{\text{porte}}/A$$
 (le mur offre un isolement acoustique d'au moins 10 dB de plus que la porte)

$$\rightarrow R - R_{\text{porte}} = 10 \log (S_{\text{porte}} + S_{\text{mur}}) - 10 \log S_{\text{porte}}$$

4 CLASSEMENT ACOUSTIQUE DES PORTES

On distingue quatre types de portes aux performances acoustiques bien distinctes : la porte monobloc, la porte lamellaire, la porte MRM et la porte double.

- La **porte monobloc** se compose d'une âme revêtue de part et d'autre d'un panneau (collé). L'âme peut être de deux types :
 - ◆ soit pleine

- ◆ soit alvéolée (en nid d'abeilles) ou tubulaire; dans ce cas, la raideur en flexion est plus grande et donc l'isolement moindre.

L'isolement acoustique de la porte monobloc suit la courbe des parois simples (loi de masse) et produit, aux épaisseurs courantes de 40 à 50 mm, les valeurs maximales suivantes :

- âme alvéolée : maximum $R_w \sim 25$ dB
- âme pleine : maximum $R_w \sim 32$ dB.

□ La **porte lamellaire** se compose, quant à elle, d'une âme constituée par des panneaux multicouche. On peut améliorer fortement son isolement acoustique (10 dB de plus que la valeur issue de la loi de masse) en évitant un collage trop intime des couches entre elles (celles-ci doivent pouvoir bouger indépendamment les unes des autres). La raideur flexionnelle du système (somme des raideurs flexionnelles des couches constitutives) est plus faible que celle d'un panneau homogène de même épaisseur (elle est proportionnelle à une constante à la troisième puissance).

Sur le plan constructif, ce type de porte pose quelques difficultés. Confectionnée en laboratoire, elle constitue généralement une pièce unique. La production en série vise le plus souvent un compromis entre la réalisation (détails, mises au point proches de celles effectuées en laboratoire) et le coût, au détriment de la qualité acoustique. L'isolement acoustique suit le principe de la loi de masse, mais, par rapport à la porte monobloc, la masse des portes lamellaires est plus élevée et leur raideur flexionnelle moindre.

Aux épaisseurs courantes de 50 à 80 mm, l'isolement acoustique R_w est de ~ 40 dB au maximum (selon le nombre de couches et la masse).

□ La **porte MRM** comprend une âme (ressort) enserrée entre deux masses multicouche ou non n'ayant (quasiment) aucune liaison directe entre elles. La difficulté réside ici dans la réalisation d'une structure à double paroi efficace (cf. § 1.1.4). Aux épaisseurs courantes de 60 à 120 mm, l'isolement acoustique R_w s'élève à ~ 51 dB au maximum (en fonction de la masse et de l'épaisseur de l'âme).

□ Les **portes séparées par un sas** constituent une application du principe MRM. La première porte représente la première masse, le ressort est constitué par le sas et la seconde masse est la seconde porte. La première et/ou la seconde porte peut aussi être conçue selon le principe MRM (mais, en général, l'isolation est déjà suffisante).

A l'intérieur du sas (autour des baies), on insère un matériau absorbant afin d'empêcher la formation d'ondes "stationnaires". Pour une distance courante de 15 à 80 cm entre les deux portes, l'isolement acoustique R_w s'élève à ~ 60 dB au maximum.

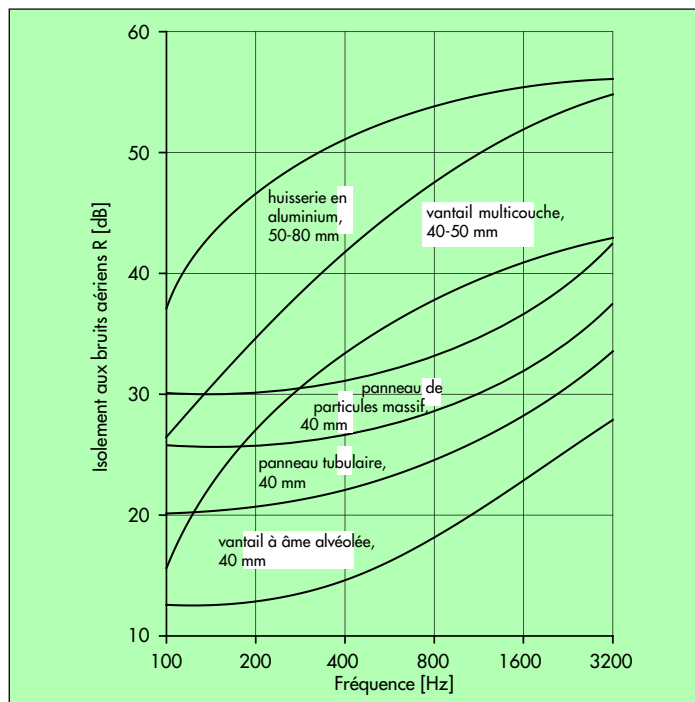


Fig. 17 Aperçu général des résultats des mesures en laboratoire en fonction du principe de construction et du matériau constitutif.

5 EXEMPLE PRATIQUE

Considérons une porte en acier pour laquelle le cahier des charges requiert un isolement aux bruits aériens de 49 dB (catégorie IIIa selon la norme NBN S 01-400).

Le type de porte choisi repose sur le principe MRM. Dans le cas de l'acier ($d = 2$ mm), la fréquence critique à laquelle intervient la coïncidence est très élevée : $f_{crit} = 6400$ Hz > 2500 Hz. L'utilisation de tôles d'épaisseurs différentes n'apportera donc pas de véritable amélioration. Cela permettrait de répartir le phénomène de coïncidence sur un domaine de fréquences élargi, atténuant ainsi la baisse de l'isolement acoustique; l'effet serait néanmoins tangible si $f_{crit} < 2500$ Hz.

Nous opterons donc pour une épaisseur de 2 mm pour les deux tôles d'acier.

S'agissant d'un système masse-ressort-masse, il est préférable de maintenir une fréquence de résonance f_r aussi basse que possible et en tout

cas inférieure à 80-100 Hz – ce n'est qu'à partir d'une fréquence supérieure à environ $1,5 \times f_r$ que l'on obtient une amélioration efficace de l'isolement acoustique. Dans le cas d'un vantail d'une épaisseur donnée, on peut y parvenir en augmentant la masse de ce dernier. On dispose à cet effet une couche de matériau supplémentaire (par exemple : 14 kg/m²) derrière chaque tôle d'acier.

En supposant que la porte donne accès à un local où se joue, par exemple, de la musique "house" (prédominance de la bande de 63 Hz dans la batterie), la masse supplémentaire devra être encore plus importante (par exemple : 24 kg/m²) pour ramener la valeur f_r au-dessous de 63 Hz. Le facteur économique peut jouer un rôle à cet égard.

Dans le cas d'une porte de 10 cm d'épaisseur composée de tôles d'acier de 2 mm, la formule donnée en § 1.3 fournit les valeurs suivantes :

- avec 14 kg/m² : $f_r = 72$ Hz
- avec 24 kg/m² : $f_r = 64$ Hz.

Il est possible d'abaisser encore davantage la fréquence de résonance en doublant la couche supplémentaire apposée derrière chaque tôle, d'où : $f_r = 58$ Hz (cette mesure est plus fiable parce qu'en pratique, la porte MRM ne sera jamais parfaite en raison d'imprécisions de fabrication).

Dans la mesure du possible, l'assemblage des deux tôles d'acier sera désolidarisé à l'aide d'un joint de caoutchouc, afin d'empêcher toute transmission latérale du bruit du panneau avant vers le panneau arrière et de laisser agir le système MRM de manière optimale.

On posera l'huisserie jointivement contre le mur en veillant à ne laisser aucun interstice entre les deux éléments. Les vides éventuels seront obturés à l'aide d'un mortier (non rétractile).

Si l'on souhaite réaliser une porte double, on peut résoudre le problème de la fermeture des deux vantaux soit en utilisant, par exemple, une mousse polyuréthane à cellules ouvertes (ce qui améliorera l'absorption des sons de haute fréquence qui passeraient éventuellement entre les deux portes), soit en confectionnant une chambre de résonance.

A la fermeture de la porte, les joints doivent être comprimés au maximum afin d'empêcher les fuites d'air. Le bas de la porte peut être garni d'une latte rétractable. ■

Fig. 18 Porte double en acier présentant une isolation aux bruits aériens de 49 dB.

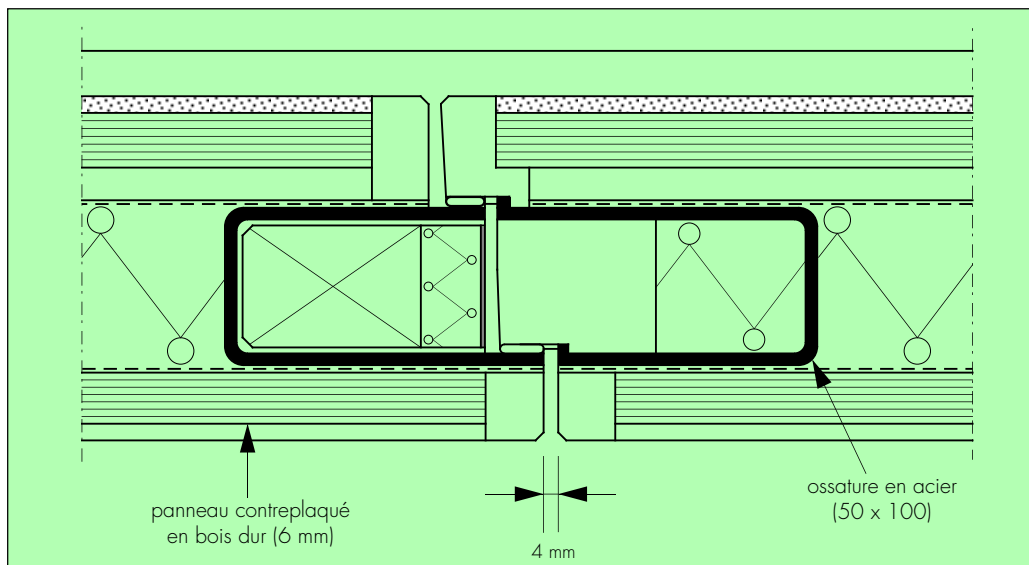


Tableau 4
Mesures de l'isolation acoustique des portes.

TYPE DE PORTE	MASSE m ² (kg/m ²)	SURFACE S (m ²)	EPAIS- SEUR d (mm)	ISOLEMENT AUX BRUITS AÉRIENS SELON		PARTICULARITÉS DU MONTAGE D'ESSAI
				NBN S 01-400 (catégorie)	NBN EN ISO 717-1 (dB)	
Porte monobloc						
- type x	30	1,9	50	IV b	30	joint néoprène
- type y	30	1,9	50	IV b	32	mastic
- type z	28	1,9	40	< IV b	27	joint néoprène
- à âme alvéolée	9,6	2	40	< IV b	24	mastic
- à âme en fibres de bois	18,5	2	40	< IV b	29	deux frappes
- à âme tubulaire	17,7	2	40	< IV b	27	mastic
Porte lamellaire						
- trois couches (11 mm) de panneaux de particules pleins	31,1	2	45	IV b	33	profilé d'étanchéité (**), deux frappes
- idem	31,1	2	45	IV a	37	joints "améliorés"
- idem	31,1	2	45	IV a	38	mastic
- âme en aggloméré	19,3	2	40	< IV b	27	mastic
- âme tubulaire en aggloméré	32,5	2	65	IV a	37	profilé d'étanchéité (**), trois frappes
- idem	32,5	2	65	IV a	38	mastic
- lestage de plomb	33	1,9	50	IV a	36	mastic
- idem	33	1,9	50	IV a	35	feutre
- hardboard / tôles d'acier / monobloc	35	1,9	50	IV b	33	joint néoprène
- idem	35	1,9	50	IV a	36	mastic
- monobloc / hardboard / plomb / hardboard / biseau (*)	45	1,9	85	III a	43	mastic
- monobloc à âme tubulaire / hardboard	20	1,9	40	< IV b	27	feutre
- idem	20	1,9	40	< IV b	27	mastic
- monobloc à âme tubulaire / hardboard / biseau (*)	39	1,9	60	< IV b	28	feutre
- idem	39	1,9	60	IV b	31	mastic
- monobloc / hardboard / plomb / hardboard	45	1,9	85	IV a	37	feutre
- idem	45	1,9	85	III a	43	joint néoprène
- multiplex / carton-plâtre / laine minérale / biseau (*)	30	2	120	III b	37	profilé d'étanchéité (**)
Porte MRM						
- structure en plomb / biseau (*)	42	2	117	III b	40	joint néoprène, profilé d'étanchéité (**), deux frappes
- idem	42	2	117	III a	43	mastic
Porte coupe-feu						
- avec laine minérale	30	1,9	100	IV a	36	mastic
- structure MRM avec laine minérale et hardboard	40	1,9	100	III b	47	mastic

(*) Finition des faces latérales du vantail et de l'hubrisserie.

(**) Profilé mobile monté à la base de la porte, qui, à la fermeture, glisse verticalement vers le plancher (effet "guillotine", cf. schéma de gauche à la figure 15, p. 23).

BIBLIOGRAPHIE

- 1** Beranek L.L., Vér I.L. & Holmer C.I.
Noise and Vibration Control. New York, McGraw-Hill, revised edition, 1998.
- 2** Vermeir G.
Hogere Cursus Akoestiek. Anvers, KVIV, 1998.
- 3** Institut belge de normalisation
NBN S 01-005 Acoustique. Mesure en laboratoire de l'indice d'affaiblissement acoustique aux sons aériens. Bruxelles, IBN, 1975.
- 4** Institut belge de normalisation
NBN S 01-006 Acoustique. Mesure "in situ" de l'isolement aux sons aériens. Bruxelles, IBN, 1975.
- 5** Institut belge de normalisation
NBN EN ISO 140-3 Acoustique. Mesurage de l'isolement acoustique des immeubles et des éléments de construction. Partie 3 : mesurage en laboratoire de l'affaiblissement des bruits aériens par les éléments de construction. Bruxelles, IBN, 1995.
- 6** Institut belge de normalisation
NBN EN ISO 140-4 Acoustique. Mesurage de l'isolation acoustique des immeubles et des éléments de construction. Partie 4 : mesurage sur place de l'isolation aux bruits aériens entre les pièces. Bruxelles, IBN, 1998.
- 7** Lord P. & Templeton D.
Detailing for Acoustics. Londres, E. & F.N. Spon, 3^e édition, 1996.
- 8** Poubeau P.
Isolation acoustique aux bruits aériens. Paris, Centre d'assistance technique et de documentation (CATED), 1996.
- 9** Sälzer, Moll & Wilhem
Schallschutz : elementierter Bauteile. Fenster - Türen - Elementwände - Unterdecken. Wiesbaden, Bauverlag, 1979.
- 10** Soubrier D.
La normalisation européenne en acoustique du bâtiment (2). Bruxelles, CSTC-Magazine, été 1999.
- 11** Soubrier D.
La normalisation européenne en acoustique du bâtiment (1). Evaluation de l'isolement aux bruits aériens et aux bruits d'impact. Bruxelles, CSTC-Magazine, printemps 1999.
- 12** Van Tol A.
Bouwkunde 7 c. Delft, édition Waltman, mars 1985.
- 13** Vermeir G.
Bouwakoestiek. Louvain, édition Acco, 1992.