REVUE DES MODÈLES DE PRÉVISION DE L'ISOLEMENT AUX BRUITS AÉRIENS UTILISÉS EN EUROPE**J. ROLAND***Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (C.S.T.B.), 24 rue Joseph Fourier,
F-38400 Saint-Martin-d'Hères, France*

The prediction of room to room transmission was in the past based on the calculation of the direct transmission through the party wall, and some corrections to take account of the flanking transmissions. It is demonstrated that such a model is no more applicable to modern building situations. A revue of the existing methods, taking into account the different walls in the emission and receiving rooms, is given. It is shown that if the measurements of flanking transmission in a laboratory are to be used for prediction in the field, it is mandatory to measure not only the direct and flanking transmission, but also the loss factor of each wall. This presentation is closely linked to the work undertaken at the European Standardization Organization TC 126 to get a unified european prediction method.

1. INTRODUCTION

Les premiers modèles prévisionnels d'acoustique en bâtiment, élaborés par Cremer dans les années 40 se sont appuyés sur l'hypothèse que la paroi séparative entre deux locaux devait être le lieu de passage essentiel de l'énergie acoustique d'un local au local voisin. C'est pourquoi un effort tout particulier a été fait pour modéliser la paroi simple, dans tous ses détails. On peut imaginer la déconvenue des pionniers de cette science lorsqu'ils ont effectué la comparaison entre isolement mesuré et isolement calculé en ne prenant en compte que le séparatif. Force a été de constater que dans un bâtiment construit à l'aide de parois en béton à peu près toutes identiques, il y avait trois fois plus d'énergie acoustique transmise au local voisin que ne le prévoyait la théorie. Quoi qu'il en soit, il était trop tard pour changer les habitudes des acousticiens, et les transmissions latérales ont été considérées comme un correctif à apporter à la théorie de la paroi séparative.

Cet article montre dans un premier paragraphe les limites de la méthode par correction. Il propose ensuite un formalisme largement répandu pour décrire les transmissions latérales.

Un paragraphe est consacré à l'apport de la S.E.A. dans l'écriture des transmissions latérales. Enfin, on présente différentes hypothèses proposées par divers auteurs pour tenter de simplifier le problème.

2. LES LIMITES DE LA METHODE PAR TERMES CORRECTIFS

La formule la plus utilisée en Europe, qui relie l'isolement acoustique D à l'indice d'affaiblissement acoustique R du séparatif est :

$$D = R + 10 \log \frac{A}{S} - a \quad (1)$$

où A est l'aire d'absorption équivalente du local de réception, et S l'aire du séparatif et a un terme correctif qui selon l'expérience vaut environ 5 dB pour une construction homogène en béton. Ceci revient à diviser par 3 le résultat obtenu par transmission au travers du seul séparatif. Cela suppose donc que le comportement global est toujours dicté par le séparatif. Les premiers ennuis commencent lorsque le séparatif comporte un doublage léger : faux plafond sous dalle béton ou doublage en plaque de plâtre d'un refend lourd.

Dans ce cas, les transmissions latérales n'empruntent qu'une partie du séparatif (figure 1) et la référence à l'indice d'affaiblissement acoustique de l'ensemble du séparatif n'a plus de sens. Il convient alors de calculer séparément la transmission par le séparatif doublé, et par les parois latérales, en imaginant le séparatif non doublé, puis de faire le bilan total. On voit d'ores et déjà apparaître la notion de sommation des énergies reçues dans le local de réception.

Le cas extrême est celui d'un bâtiment ayant des planchers filants et des séparatifs constitués de parois multiples légères (figure 2) (plaques de plâtre cartonnées sur ossature par exemple). Dans ce cas les transmissions latérales sont totalement indépendantes du séparatif car les échanges d'énergie paroi lourde - paroi légère sont très faibles. Il en résulte que l'équation (1) n'a plus aucun sens.

Figure 1 - Lorsque le séparatif est doublé, seul l'élément lourd lié aux parois latérales transmet l'énergie acoustique aux parois latérales

Figure 2 - Lorsque le séparatif est léger, il n'intervient pratiquement plus sur les transmissions latérales

3. FORMALISME DU CALCUL DES TRANSMISSIONS LATÉRALES

L'idée directrice est de décrire le "captage" de l'énergie acoustique par chacune des parois ayant une face dans le local émission et la restitution par chacune des parois ayant une face dans le local réception.

Ceci amène tout naturellement à considérer les quantités :

$$\tau_{ij} = \frac{\Pi_{ij}}{\Pi_o}$$

Π_{ij} étant la puissance rayonnée par la paroi j du local réception, et résultant du captage par la paroi i du local émission.

Π_o est une référence commode pour tous les calculs, la puissance incidente sur le séparatif par exemple...

La puissance totale référencée à Π_o dans le local réception s'exprime par :

$$\tau' = \sum_{i,j} \tau_{ij}$$

et l'isolement acoustique résultant entre les deux locaux

$$D = -10 \log \left(\tau' \frac{S}{A} \right)$$

La clé du problème résulte donc dans la connaissance des τ_{ij} , ou de leurs correspondants en niveaux

$$R_{ij} = -10 \log \tau_{ij}$$

On remarquera que ce formalisme ne permet pas de décrire les échanges d'énergie intervenant entre plus de deux parois, ce qui n'est généralement pas un handicap. De même, on ne prend pas en compte l'énergie cédée à d'autres parois par les parois ne captant pas directement l'énergie dans le local émission, ce qui paraît être une première approximation légitime.

Un modèle de prévision de l'isolement doit s'appuyer sur la recherche "d'invariants" caractérisant les échanges d'énergie entre parois, cet invariant pouvant être extrait d'une mesure en laboratoire ou d'une théorie. Dans la théorie simplifiée présentée au § 1, l'indice R est considéré comme invariant, mesuré en laboratoire par exemple, ou calculé selon la théorie de la paroi simple.

Pour ce qui concerne les R_{ij} , il convient de trouver une expression faisant apparaître des quantités mesurées ou calculées ne dépendant ni de la géométrie du cas étudié, ni de l'environnement des jonctions considérées.

4. EXPRESSION DÉTAILLÉE DES R_{ij}

Il convient d'écrire tout d'abord que la paroi i "capte" une certaine puissance acoustique dans le local émission. Sa vitesse vibratoire moyenne v_i^2 s'écrit :

$$v_i^2 = \frac{p_e^2}{4(\rho c)^2} \tau_i \frac{1}{\sigma_i}$$

où p_e est la pression moyenne dans le local émission

τ_i est le facteur de transmission de la paroi i ($R_i = -10 \log \tau_i$)

σ_i le facteur de rayonnement de la paroi i .

La vitesse moyenne prise par la paroi j , v_j du fait de la vibration de la paroi i s'obtient par :

$$v_j^2 = d_{ij} v_i^2$$

où d_{ij} est l'isolement vibratoire.

Enfin, la puissance acoustique rayonnée par j , du fait de la captation de i s'écrit :

$$\tau_{ij} = \frac{\Pi_{ij}}{\Pi_o} = \tau_i d_{ij} \frac{\sigma_j}{\sigma_i} \frac{S_j}{S_o} \quad (2)$$

avec σ_j le facteur de rayonnement de j

S_j l'aire de j

S_o l'aire du séparatif.

L'expression (2) a été longtemps utilisée par l'école allemande [1] pour estimer les transmissions latérales. Le calcul se simplifie lorsque les parois émission et réception sont identiques en nature auquel cas les facteurs de rayonnement disparaissent. L'isolement vibratoire d_{ij} était fréquemment assimilé à celui calculé en considérant une jonction de plaques infinies, selon un modèle proposé par Cremer [2] ne prenant en compte que les ondes de flexion. Compte tenu de ces hypothèses, on trouve d_{ij} indépendant de la fréquence, et pour des parois de matériau identique d_{ij} ne dépend que du rapport des masses surfaciques. Par ailleurs, l'expérience tendait à montrer que pour nombre de configurations, d_{ij} était raisonnablement constant, hypothèse reprise plus tard par Gerretsen [3]. Cette dernière hypothèse étant le résultat d'une constatation, est admissible. Par contre il est en général faux d'utiliser le calcul de Cremer pour estimer d_{ij} , comme nous allons le voir plus loin.

Un des inconvénients de l'expression (2) est son manque de symétrie et curieusement, la surface de la paroi excitée n'apparaît pas.

Gerretsen [3] eut l'idée d'appliquer le principe de réciprocité à τ_{ij} , qui comme le facteur de transmission direct d'une paroi est indépendant du sens où l'on fait la mesure.

$$\tau_{ij} = \tau_{ji}$$

Ceci conduit à l'expression suivante

$$\tau_{ij} = (\tau_i \tau_j d_{ij} d_{ji} S_i S_j)^{1/2} \frac{1}{S_o} \quad (3)$$

qui cette fois est symétrique, et ne comporte plus les facteurs de rayonnement. En toute rigueur, il n'était pas possible de simplifier ces facteurs de rayonnement car dans un sens il s'agit du σ résultant d'une excitation aérienne, et lorsque l'on écrit la réciproque, il s'agit de l'excitation solidienne de la même paroi. Cependant, la simplification est tentante, et l'approximation raisonnable pour des fréquences inférieures proches de la fréquence critique.

Dans l'expression (3), τ_i et τ_j peuvent être des mesures de laboratoire, et les d_{ij} des valeurs observées sur des jonctions identiques sur chantier. La mesure directement dans un laboratoire acceptant une seule jonction donne en général des résultats assez éloignés de ceux de chantier. Quant au calcul, il doit faire appel au modèle de la Statistical Energy Analysis (S.E.A.)

5. CALCUL DES d_{ij} à partir de la S.E.A.

d_{ij} caractérise "l'isolement vibratoire" de deux parois de géométrie donnée incluses dans une jonction et un environnement donnés. Il dépend naturellement de ces paramètres. Il faut remonter aux facteurs de couplage γ_{ij} pour trouver une quantité qui ne dépend cette fois que de la jonction. γ_{ij} est défini comme étant la puissance vibratoire transmise à une jonction par rapport à la puissance vibratoire incidente. Kihlman [4] a donné des expressions de ces quantités, en prenant en compte les trois types d'onde dans les plaques.

Pour passer des γ_{ij} aux d_{ij} , il est nécessaire d'écrire, pour une géométrie donnée que la puissance injectée dans la paroi j à travers la jonction est égale à celle qui est dissipée par cette même paroi (pertes internes + pertes latérales autres que i). Par rapport à une écriture S.E.A. rigoureuse [5], on néglige l'énergie qui revient sur la paroi excitée.

Après application du principe de réciprocité, tous calculs faits, on trouve :

$$(d_{ij} d_{ji})^{1/2} = \frac{1}{\pi} (\gamma_{ij} \gamma_{ji} c_{gi} c_{gj})^{1/2} \frac{1}{(\eta_i S_i \eta_j S_j)^{1/2}} \frac{l_{ij}}{\omega}$$

Le premier terme ne dépend que de la nature des plaques constituant la jonction, c_{gi} étant la vitesse de groupe des ondes de flexion dans la plaque, les deux derniers sont la correction à apporter pour prendre en compte le facteur de perte de chacune des parois (η_i), leur surface (S_i) et la longueur de la jonction l_{ij} .

Replacé dans l'équation 3, on trouve finalement :

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_i}{\eta_i} \frac{\tau_j}{\eta_j} \right)^{1/2} \frac{l_{ij}}{S_o} \Lambda_{ij} \quad (4)$$

avec

$$\Lambda_{ij} = \frac{1}{\omega \pi} (\gamma_{ij} \gamma_{ji} c_{gi} c_{gj})^{1/2} \quad (5)$$

Λ_{ij} est indépendant de la géométrie et de l'environnement des parois. C'est donc un invariant que l'on peut soit calculer dans quelques cas simples, soit obtenir en laboratoire à partir de mesures sur une jonction isolée. Il a la dimension d'une longueur.

L'équation (4) fait apparaître la quantité $\frac{\tau_i}{\eta_i}$ où τ_i est le facteur de transmission de la paroi i et η_i son facteur de perte total. Or, il est connu que la plupart des parois sont telles que τ_i varie comme

η_i , ceci étant bien établi pour une paroi simple, au-delà de la fréquence critique. La quantité $\frac{\tau_i}{\eta_i}$ est donc un bien meilleur invariant que τ_i seul. Rappelons que l'hypothèse généralement faite dans les calculs prévisionnels classiques est que τ_i est invariant (on prend l'indice d'affaiblissement acoustique mesuré en laboratoire).

D'autre part, on remarque que les surfaces des deux parois concernées disparaissent. Ceci semble surprenant, d'autant qu'à la limite, lorsque l'une des deux parois n'existe plus, la transmission latérale est nulle, ce qui n'est pas donné par le calcul. Il ne faut pas oublier que l'hypothèse de base qui est faite ici est que l'énergie transmise à la paroi j est dissipée par cette même paroi ou transmise à d'autres (η_j), et qu'aucune énergie ne revient vers i . Ceci suppose que la paroi j ait une surface minimum, et un minimum d'arêtes communes avec d'autres parois, la réciproque s'appliquant pour la paroi i . Ceci étant admis, on peut expliquer l'indépendance de S_j de la manière suivante : l'énergie transmise à la paroi j ne dépend que de la longueur de la jonction. Cette énergie se répartit dans la paroi j en lui donnant une vitesse quadratique inversement proportionnelle à S_j . Il en résulte que la puissance acoustique rayonnée par la paroi j est indépendante de S_j .

6. APPLICATION PRATIQUE

Toutes les méthodes de prévision des transmissions latérales sont résumées par les formules 3 et 4.

La formule 3 correspond à la méthode utilisée par la Hollande, le Danemark et la Norvège à quelques nuances près. Elle exclut la mesure d'un paramètre transmission latérale en laboratoire. Le produit $d_{ij} d_{ji}$ est soit estimé à partir de la S.E.A., dans les cas simples, soit obtenu à partir des résultats de mesure "in situ". Les facteurs de transmission τ_i sont obtenus par calcul ou proviennent de résultats de laboratoire.

L'expression sous forme de niveaux fait apparaître la demi-somme des indices d'affaiblissement acoustique des parois, et la moyenne géométrique des surfaces de ces mêmes parois.

$$R_{ij} = \frac{R_i + R_j}{2} - 10 \log \frac{\sqrt{S_j S_i}}{S_o} + \frac{D_{ij} + D_{ji}}{2}$$

Cette formule correspond bien à l'intuition que l'on peut avoir du phénomène transmissions latérales.

La formule (4) ne fait à l'heure actuelle pas encore l'objet d'applications. Elle autorise la détermination du paramètre de transmission latérale Λ_{ij} en laboratoire. Il faut pour cela mesurer les facteurs de transmission directe de chacune des parois (méthodes connues), les facteurs de perte de ces mêmes parois (ou les estimer dans les cas courants), et mesurer τ_{ij} en faisant un montage tel que seul le chemin i, j est considéré (doubleage à l'émission, intensimétrie en réception par exemple) (figure 3).

Il existe de nombreux cas où la mesure est plus facile car certains chemins sont absents. Il convient de les examiner au coup par coup : façade légère filante, cloison de distribution sur plancher ou refend lourd etc...

Λ_{ij} peut être estimé dans des cas simples à partir de la S.E.A. (formule 5).

Enfin, la prévision de la transmission latérale s'obtient par application de la formule (4) où les $\frac{\tau_i}{\eta_i}$ et Λ_{ij} sont des invariants.

Figure 3 - Mesure du R_{ij} d'une jonction de trois parois en laboratoire.

Après doublage, comme indiqué sur la figure, on a

$$R_{ij} = D + 10 \log \frac{S}{A}$$

7. CONCLUSION

Le calcul de l'isolement acoustique entre deux locaux a été longtemps effectué en considérant les transmissions latérales comme une correction à apporter à la transmission par le séparatif. Les parois complexes rencontrées à l'heure actuelle dans le bâtiment rendent cette méthode inapplicable. Une autre méthode faisant appel à un modèle énergétique semble plus appropriée.

Les trois variantes décrites dans ce document correspondent à des pratiques usuelles de certains pays européens. Seule la dernière proposition permet d'obtenir par une mesure en laboratoire l'information utile au calcul prévisionnel sur un bâtiment réel. Elle implique, outre les mesures traditionnelles, la mesure ou l'estimation du facteur de perte des parois. Les deux derniers modèles présentés font actuellement l'objet de discussions au sein du groupe de travail 2 du Comité Européen de Normalisation TC 126, chargé d'élaborer la future norme européenne "méthode de prévision de la qualité acoustique des ouvrages".

REFERENCES

- [1] K. Gösele, Untersuchungen zur Schall-Längsleitung in Bauten. Veröffentlichungen aus dem Institut für Technische Physik, Stuttgart (1959)
- [2] L. Cremer, H. Heckl, E.E. Ungar, Structure-Borne Sound. Springer Verlag (1973) pp 330-332
- [3] E. Gerretsen, Calculation of the Sound Transmission between Dwellings by Partitions and Flanking Structures. Applied Acoustics 12 (1979) pp 413-433
- [4] T. Kihlman, Transmission of Structure-Borne Sound in Buildings. Rapport 9/67, Bygghforskningen, Stockholm
- [5] R.H. LYON, Statistical Energy Analysis of Dynamical Systems, MIT Press.