

# Quelques propos sur l'utilisation du modèle réduit acoustique

J. Stryjenski

Ecole d'Architecture de l'Université de Genève

Depuis plusieurs années déjà, des essais sporadiques ont été faits pour résoudre les problèmes acoustiques avec le modèle spacial des objets à l'échelle réduite dans lequel on a recherché à reproduire les sons dont la dimension, c'est-à-dire la longueur d'onde, était réduite à l'échelle du modèle. L'avantage d'un modèle est évident là où les formes compliquées sont testées et comparées afin de trouver les meilleures solutions aux problèmes posés. Par exemple, les modèles acoustiques des salles ou les modèles d'écrans. Dans certains cas il a été possible de vérifier les lois de similitude sur les ouvrages construits et constater une bonne concordance des résultats obtenus sur le modèle. Récemment quelques travaux d'application du modèle réduit aux problèmes de l'acoustique urbaine ont vu le jour et particulièrement ceux consacrés aux nuisances résultant du trafic routier:

Auteur <sup>1</sup>	Application	Echelle du modèle	Observations
<i>D. Brebeck</i>	salles absorption	1/10	vérifié sur l'ouvrage existant
<i>J. Sadowski</i>	bruit extérieur effet d'écran	1/30	vérifié sur ouvrage après sa construction
<i>J.-M. Rapin</i>	trafic routier effet d'écran propagation	1/20	étude très complète des divers profils en travers, non vérifié sur ouvrage vrai
<i>J. Stryjenski et M. Lançon</i>	trafic routier galeries	1/50	vérifié sur ouvrage existant

<sup>1</sup> v. bibliographie

Avec l'appui du Fonds National Suisse de Recherches Scientifiques, depuis deux ans nous sommes attachés à étudier sur modèle réduit la possibilité de diminuer les nuisances et surtout le bruit des routes à grand trafic passant à proximité des agglomérations ou pénétrant dans le tissu urbain. Dans ce but nous sommes en train d'étudier les couvertures «semi-transparentes», donc pourvues d'ouvertures, des voies de circulation.

Le modèle réduit semble constituer un outil adéquat à ce type d'étude. Bien que le travail ne soit pas terminé, nous nous proposons de partager ici quelques expériences acquises.

## Les similitudes

Les règles suivantes seront suivies afin d'assurer la similitude entre l'objet réel et son modèle en ce qui concerne:

- la longueur d'onde
- la masse de parements
- la forme
- l'absorption des surfaces
- l'absorption dans l'air
- l'émetteur et le récepteur.

**Lorsque des autoroutes traversent des zones résidentielles il est indispensable de prendre des mesures techniques de protection contre les nuisances. Des constructions couvrant la route se sont révélées indiquées.**

## L'onde

La longueur d'onde est à l'acoustique ce qu'est la grandeur de notre corps à l'architecture: l'unité de tout dimensionnement, le module de base, l'échelle de l'action.

Les objets grands par rapport à l'onde se comportent comme écrans réflecteurs et obstacles plus ou moins infranchissables. Les petits objets et les bords de tous les corps provoquent les perturbations du champ acoustique (diffraction due aux interférences) sans faire obstacle à la propagation. On peut rappeler que les longueurs d'onde des sons déterminants dans le bruit du trafic routier se situent entre 0,15 à 1,50 mètres. Les éléments constitutifs des ouvrages routiers (viaducs, ponts barrières, parapets, murs, etc.) ainsi que des ouvrages éventuels de protection se situent très souvent dans les mêmes dimensions que l'onde sonore produite par le véhicule. En conséquence, il n'est pas possible d'étudier de tels ouvrages en négligeant les phénomènes de diffraction.

Il est connu qu'on peut obtenir avec des objets de diverses grandeurs les phénomènes identiques quand on garde le même rapport entre la longueur d'onde et l'objet expérimenté. La dimension D et la longueur d'onde  $\lambda$  sont donc liées par une proportionnalité directe dont l'échelle n est:

$$n = \frac{D_2}{D_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

De plus, en partant de la relation  $c = \lambda \cdot f$  (ou  $c =$  célérité et  $f =$  fréquence) on obtient:

$$\frac{C_1}{D_1 f_1} = \frac{C_2}{D_2 f_2}$$

Si les phénomènes examinés se passent dans le même milieu  $c$  reste constant et on peut écrire

$$D_1 \cdot f_1 = D_2 \cdot f_2$$

## La masse

L'isolement des matériaux utilisés pour la construction du modèle doit être le même (ou supérieur) à l'isolement de l'objet original. La transmission à travers des parements (rigides) est définie par la loi de Berger appelée aussi la loi de masse.

L'isolement est en conséquence défini

$$D = 20 \log \frac{\pi f m}{Z_{air}} \quad \text{ou } z = \rho \cdot c \simeq 420$$

$\rho = \text{densité de l'air}$   
 $m = \text{masse surfacique}$

Il en résulte que pour le même isolement le produit  $m \cdot f$  doit être constant. Vu que la fréquence ( $f$ ) est modifiée dans le rapport  $f/n$  la masse doit être de  $n \cdot m$ .

Par exemple, un mur en béton armé de 20 cm d'épaisseur possède un poids de 500 kg/m<sup>2</sup> et offre une réduction d'ordre de 55 dB. A l'échelle de 0,04 (1:25) ceci correspond à un matériau de 20 kg/m<sup>2</sup>.

A ces considérations, il faut ajouter que l'isolement est diminué par le phénomène de coïncidence entre l'onde aérienne qui frappe une paroi et l'onde élastique propre déterminée par les matériaux et l'épaisseur de la paroi. Il est donc nécessaire de vérifier si la fréquence limite de coïncidence ( $f_{lim}$ ) ne se trouve pas dans la plage des fréquences utilisées pour le modèle. Les relations sont les suivantes:

$$f_{lim} = \frac{c^2}{2 \pi d} \sqrt{\frac{12 \rho (1-\mu^2)}{E}}$$

- ou
- $d = \text{épaisseur}$
- $\mu = \text{chiffre de Poisson } (\sim 0,3)$
- $E = \text{module de l'élasticité}$
- $\rho = \text{densité}$

En outre, il est nécessaire de s'assurer de l'étanchéité complète du modèle.

**La forme**

Les détails dans l'exécution du modèle doivent être reproduits avec une fidélité suffisante afin que les rapports entre la fréquence du son et les grandeurs soient les mêmes dans la nature et sur le modèle. Ceci étant nécessaire dans les trois dimensions de l'espace. Nous devons donc reproduire la forme fidèle de l'objet. L'expérience nous a appris que dans un modèle à l'échelle 0,02 (1/50) nous avons dû reproduire les poutrelles en béton de l'ouvrage existant de section environ 20/30 cm ainsi que les coulées de glace qui obstruaient les ouvertures latérales pour obtenir des résultats satisfaisants [7].

**L'absorption des surfaces**

L'absorption des surfaces est un phénomène complexe qui ne peut pas être résolu autrement que par le choix des surfaces dont le coefficient d'absorption ( $\alpha$ ), pour les fréquences utilisées, correspond à celui des matériaux originaux:

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

Là, nous nous sommes appuyés sur les mesures faites dans la chambre réverbérante pour diverses

matières. Pour les gammes des fréquences audibles les coefficients d'absorption sont amplement connus. Pour les fréquences élevées et pour les ultrasons nous nous sommes basés sur le travail de Brebeck [1], en procédant souvent par analogie.

Dans ce contexte, il ne faut pas oublier l'existence de l'absorption inévitable ( $\alpha_{in}$ ) due au frottement et à l'échange thermique entre l'air et les parois. D'après Cremer [2] elle est à la température de 20°C et à la pression atmosphérique

$$\alpha_{in} = 1,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{f}$$

Compte tenu de la relation  $f_1/f_2 = n$

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\sqrt{f_1}}{\sqrt{f_2}} = \sqrt{n}$$

Il en résulte que l'absorption inévitable généralement négligeable sur l'ouvrage de grandes dimensions peut jouer un rôle sur le modèle. Il devient donc difficile de représenter en miniature les surfaces très réfléchissantes.

**Absorption dans l'air**

Lors de la propagation du son dans l'air il y a un affaiblissement de l'intensité dû non seulement à la dispersion de l'énergie, mais aussi à l'absorption par le milieu. Cette absorption est proportionnelle à la dis-

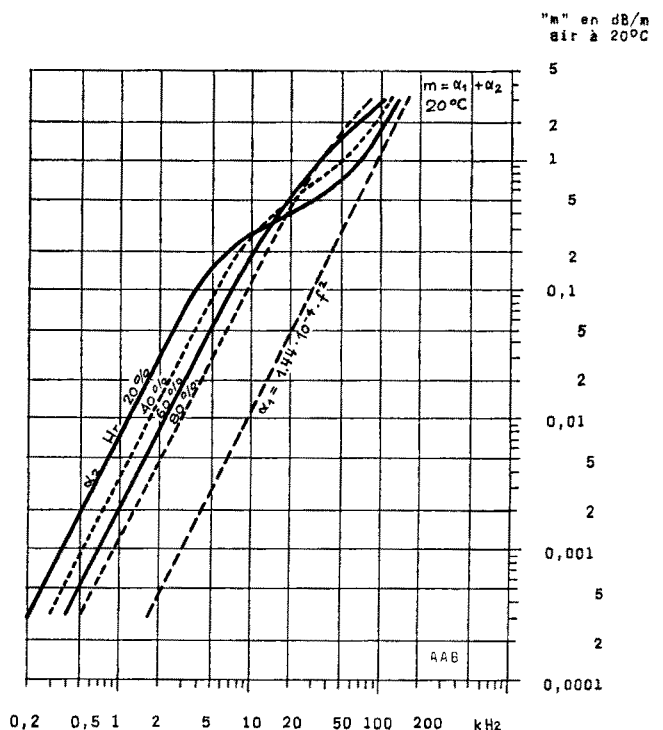


Figure 1  
Absorption du son dans l'air [3]

tance mais elle augmente fortement avec la fréquence du son. Dans les températures du laboratoire 19–25°C et pour les humidités relatives de 34–50% l'absorption peut être plusieurs fois plus élevée que celle rencontrée dans la nature pour les distances correspondantes. Par exemple pour 50 kHz elle est d'environ 1 dB/m alors que (compte tenu de l'échelle  $1/25$ ) pour 2 kHz elle n'est que de 0,2 dB/25 m.

Toutefois, il faut remarquer que nos mesures ont essentiellement un caractère comparatif et une différence de 1 dB dans un tiers d'octave situé à l'extrémité du spectre ne joue pratiquement pas de rôle. La fig. 1 montre les coefficients d'absorption pour diverses fréquences [3].

**L'émetteur et le récepteur**

L'émetteur doit remplir les conditions suivantes:

- avoir les dimensions correspondantes à l'échelle du modèle
- émettre toute la gamme des fréquences nécessaires à reproduire le spectre à l'échelle
- avoir les caractéristiques directionnelles semblables à la source originale
- avoir suffisamment de puissance

Le récepteur sera petit par rapport à la longueur de l'onde à capter et possédera la directivité aussi semblable que possible aux appareils de mesure utilisés normalement sur l'original. Il doit aussi être suffisamment petit par rapport au modèle pour ne pas perturber le champ acoustique.

Les problèmes de l'émetteur et du récepteur ainsi que de la production des sons et de leurs mesures constituent à l'heure actuelle une limitation contraignante de la réduction de l'échelle du modèle. Nous

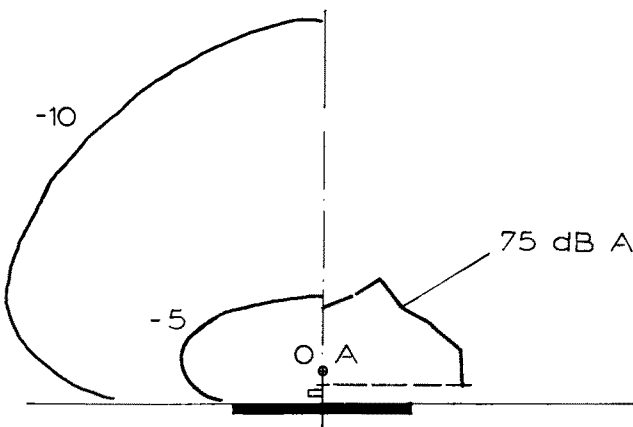


Figure 2  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 ( $1/25$ ). Comparaison entre le modèle et l'objet réel.

1. Courbe isophonique 75 dB (A) calculée d'après les mesures de E. J. Rathé sur les voitures de tourisme [5].
2. Courbes isophoniques des sources utilisées sur modèle. Source quasi-continue à spectre large. Mesure du niveau global.

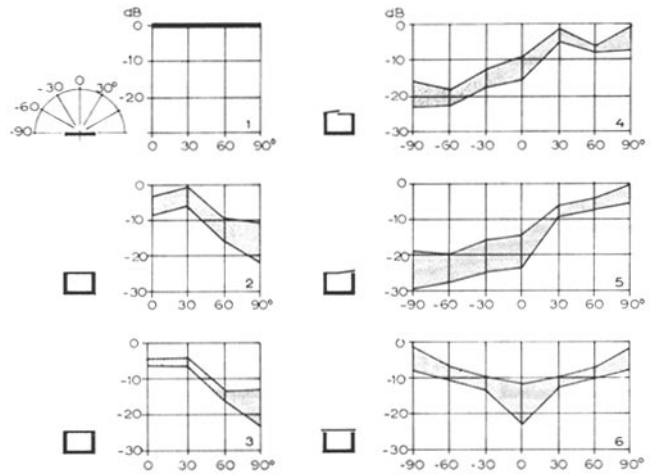


Figure 3  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,015 ( $1/66$ ). Comparaison de diverses transparences par rapport à la route libre à 25 cm de distance (17 m).

Transparences de 10% de la surface de la route. Source quasi-linéaire. Mesures dans les octaves 8, 16 et 31,5 kHz.

- 1) Route libre
- 2) Trous 3,5  $\phi$  mm
- 3) Trous 13  $\phi$  mm
- 4) Transparence continue médiane
- 5) Transparence continue d'un côté
- 6) Transparence continue des deux côtés

nous bornons à signaler que dans nos mesures à l'échelle 0,04 ( $1/25$ ) nous tentons de reproduire le spectre du trafic automobile en pondération A (dB A) afin de pouvoir obtenir par une seule mesure les comparaisons avec des mesures faites en réalité, sans être obligés de procéder chaque fois à une analyse spectrale.

Dans la phase actuelle de nos travaux, le modèle acoustique – tel que nous essayons de le développer – est appliqué à la solution des problèmes du bruit

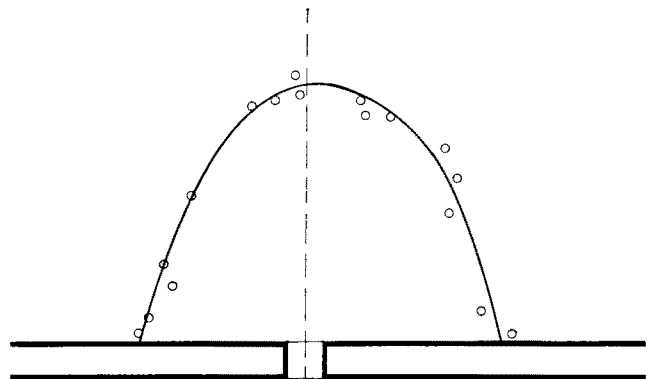


Figure 4  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 ( $1/25$ ). Exemple d'une courbe isophonique mesurée sur modèle.

Fente simple, longitudinale. On remarque une relativement faible dispersion des résultats. Source quasi-continue à large spectre. Mesure du niveau global.

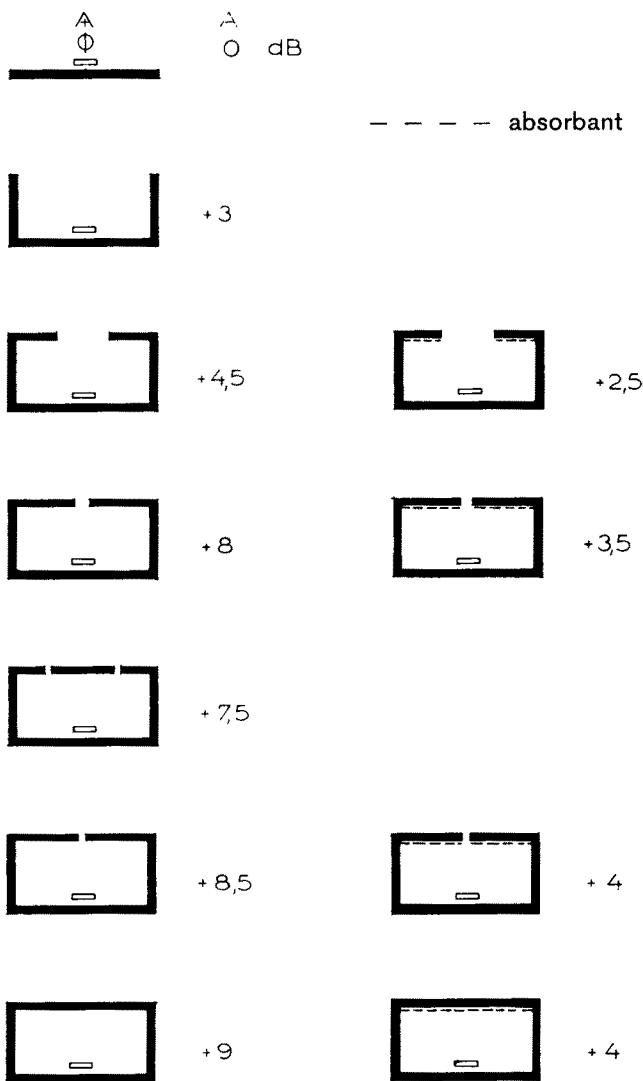


Figure 5  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 (1/25). Influence de l'ouverture sur le niveau du bruit.  
Source quasi-continue à spectre large. Mesure globale en point A.

extérieur qui, par sa libre propagation, affecte un nombre élevé de personnes. En dehors du trafic automobile et du bruit des moyens de transport en général, nombreuses sont les sources de bruit dignes de surveillance: les stations de transformateurs, les prises d'air, les évacuations des centrales de climatisation (dans le centre des villes, il y en a plusieurs par hectare), les bruits en provenance des industries, etc.

La possibilité de l'étude sur modèle réduit dépend dans ces cas de l'adaptation de chaque élément de l'appareillage à une échelle raisonnable de réduction. Ainsi, par exemple, on peut envisager de grandes réductions (1/100) pour l'étude du bruit des transformateurs, dont le bourdonnement est de basse fréquence, alors que le bruit du trafic routier, riche en compo-

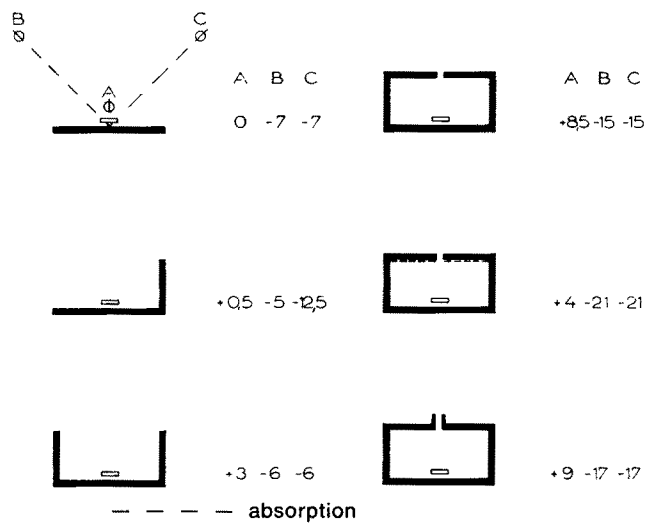


Figure 6  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 (1/25). Comparaison des niveaux du bruit à l'intérieur et à l'extérieur de l'ouvrage suivant le type de l'ouverture.

Source quasi-continue à spectre large. Mesure globale en points A, B et C.

sants importants allant au-delà de 1 kHz, ne permet pas des réductions importantes. Cette limitation nous est imposée essentiellement par le fait que nous n'avons pas encore trouvé des émetteurs de dimensions réduites et capables d'émettre le spectre composé de larges bandes de fréquences, avec une grande puissance. Les niveaux atteints sur le modèle du tunnel (1/25), en reproduisant le spectre pondéré (dB A) du

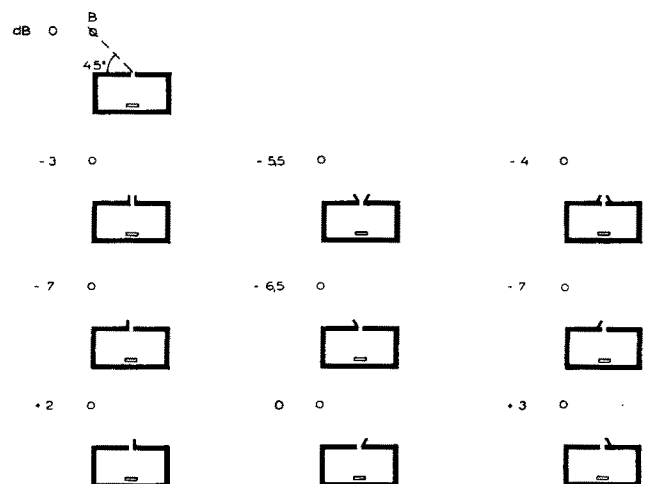


Figure 7  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 (1/25). Comparaison de diverses embouchures.

Fente longitudinale de largeur de 2 cm (5% de la surface de la chaussée).  
Source quasi-continue à spectre large. Mesure du niveau global en point B.

trafic, sont de l'ordre de 95 dB. La forme de l'émission est montrée sur la fig. 2. Les niveaux supérieurs dans la plage ultrasonique sont difficiles à obtenir. Les émetteurs spécialisés (sirènes, sifflets ou céramiques) sont évidemment plus puissants mais très limités dans la gamme des fréquences.

Les microphones étant de dimensions réduites sont eux aussi moins sensibles que les microphones utilisés normalement. D'autre part, vu le nombre souvent élevé des sources, la distance de mesure peut être limitée par les dimensions du local et par sa réverbération, même s'il est revêtu de matériaux absorbants. Si nous voulons nous en tenir aux limites acceptables d'erreurs (1-2 dB), à l'état actuel de notre équipement, nous devons nous contenter de fréquences inférieures à 50 kHz et de distances de mesures inférieures à 2 m.

**Présentation des résultats et conclusions**

Quelques résultats portant sur les couvertures des voies de circulation montrent ici les possibilités du modèle réduit. Une série préliminaire de mesures faites avec un modèle à l'échelle 0,015 (1/66) dans l'octave 25 kHz a permis d'éliminer plusieurs types de transparence sans intérêt particulier. La fig. 3 montre quelques exemples.

D'autres recherches sur les modèles à l'échelle 0,04 (1/25) sont montrées sur les graphiques fig. 4 à 9.

L'importance de l'absorption est démontrée sur les exemples fig. 5, 6 et 9. Dans un ouvrage réverbérant le bruit croît progressivement mais sa durée et son intensité se trouvent augmentées. Les mesures faites dans un tunnel moderne, réverbérant confirment ce

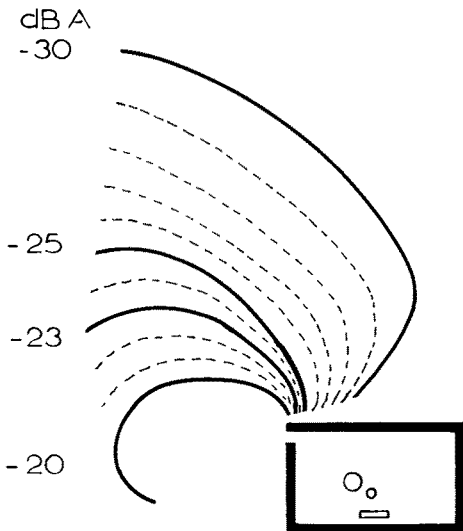


Figure 8  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 (1/25). Courbes isophoniques. Fente longitudinale de 5% de la surface de la route. Source quasi-continue à large spectre. Mesure du niveau global.

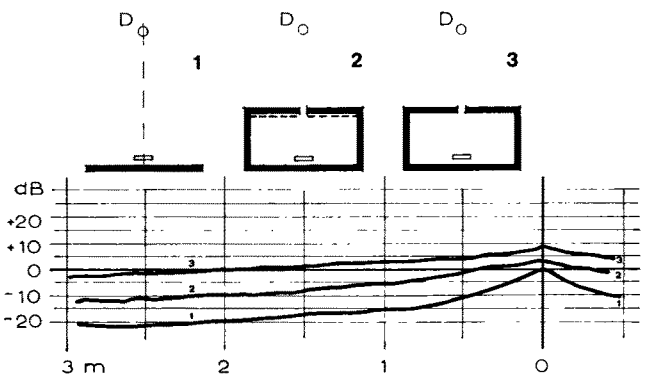


Figure 9  
Modèle du trafic routier à l'échelle 0,04 (1/25). Variation du niveau sonore lors du déplacement de la source.

Décroissement du niveau du bruit lors du passage simulé d'une voiture. Source quasi-punctuelle à large spectre. Mesure globale en point D. Compte non tenu de l'affaiblissement dû à la couverture.

fait; les pointes du bruit (L 1%) augmentent de 10 dB env. alors que le bruit moyen (L 50%) croît de 20 dB env. Quand l'ouvrage est pourvu d'ouvertures ce phénomène se répercute aussi à l'extérieur de l'ouvrage comme le montre si bien le modèle (fig. 9).

Actuellement beaucoup de problèmes se laissent résoudre grâce aux calculatrices et leurs divers terminaux (p. ex. les traceurs des courbes). Le travail avec cet outil nécessite une digestion successive des données par les divers spécialistes interdisant aux promoteurs du projet étudié une vue d'ensemble et une intervention dans le déroulement du processus. Le modèle réduit permet, au contraire, de garder le lien moins symbolique et plus humanisé entre le chercheur et ses commettants et laisse à ces derniers la possibilité d'intervenir en cours de route et même d'introduire les paramètres non scientifiques. Or, les grands ouvrages sont nés de l'intégration des valeurs techniques, économiques, scientifiques, culturelles et parfois spirituelles et sociales. Le modèle étant plus parlant, une étincelle intégraliste peut jaillir à sa vue. Par ailleurs, il garde la valeur de démonstration apte à renseigner les gens les plus divers engagés dans la future réalisation, depuis l'ouvrier jusqu'au décisionnaire politique. Pour ces raisons, le modèle réduit reste un outil par excellence de science appliquée et de technique permettant un passage rapide des divers stades de conception jusqu'au projet d'exécution.

**Résumé**

Dans cet article l'auteur décrit les conditions de l'utilisation des modèles acoustiques à l'échelle réduite et montre quelques résultats obtenus sur un modèle expérimental du trafic routier. Le modèle réduit est aussi applicable aux cas isolés, ou non typiques, ainsi qu'aux ouvrages aux formes complexes. A ce propos est signalée la valeur de démonstration d'un tel modèle permettant une collaboration avec tous les participants au projet et à l'exécution d'un ouvrage.

### Zusammenfassung

#### *Über den Gebrauch des verkleinerten akustischen Modells*

In dieser Arbeit werden die Bedingungen beschrieben, welche beim Gebrauch von akustischen Modellen zu erfüllen sind. Es wird erwähnt, wie weit die Modelle verkleinert werden können, und anschliessend werden einige Resultate gezeigt, erreicht an einem Versuchsmodell des Strassenverkehrs. Das Modell kann vorteilhaft angewendet werden überall dort, wo man mit komplexen Formen zu tun hat oder auch bei vereinzelten und nicht typischen Problemen. In diesem Zusammenhang wird auf die Veranschaulichung des Bauvorhabens hingewiesen, die ein Modell ermöglicht und welche die Zusammenarbeit mit allen am untersuchten Bauwerk Interessierten fördert.

### Summary

#### *On the use of reduced size acoustic models*

The paper describes the conditions by using reduced size acoustic models. It considers the degree of their reduction and provides results obtained with an experimental model of traffic noise. Such a model is of particular interest in special cases or whenever the conditions are not typical. In this context the value of this approach is stressed for demonstration purposes which allows for easy understanding and cooperation of all members of the team involved in the execution of the construction project.

### Literatur

- [1] *Brebeck, D.*: Die Schall- und Ultraschallabsorption von Materialien in Theorie und Praxis. Technische Hochschule München 1967 (thèse de doctorat).
- [2] *Cremer, L.*: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band III Wellentheoretische Raumakustik. Hirzelverlag Zürich [1950].
- [3] *Harris, C. M., Rudnik I.*: Propagation of Sound in the Open Air Handbook of Noise Control. Mc Graw-Hill Book Company New York [1957].
- [4] *Rapin, J. M.*: Mesure de l'influence du profil en travers et de la présence d'écrans absorbants sur la pression acoustique aux abords des voies rapides urbaines. 3 Volumes CSTB Paris [1969].
- [5] *Rathé, E. J.*: Über den Lärm des Strassenverkehrs. Acustica Heft 5, 268—277, Hirzel-Verlag Stuttgart [1966].
- [6] *Sadowski, J.*: Versuche zwecks Bestimmung abschirmender Lärmdämmwirkung von Gebäuden auf Grund von Untersuchungen an Modellen in Totraum. Congrès AICB Baden-Baden [1966].
- [7] *Stryjenski, J., Lançon M.*: Ouvrages de protection contre le bruit. Vérification de la similitude: original — modèle réduit. Bulletin Technique de la Suisse Romande, no 26, 515—519 Lausanne [1973].

### Adresse de l'auteur

Prof. *Jean Stryjenski*, Architecte, Atelier d'Acoustique du Bâtiment, 32, rue des Noirettes, CH-1227 Carouge-Genève.