

REPARTITION DU CHAMP SONORE
PAR UNE METHODE DE TIR ALEATOIRE

Ir. J-J. EMBRECHTS,
Université de Liège.

I. INTRODUCTION

Dans le but d'obtenir un meilleur rapport précision/temps de calcul, les méthodes numériques dites de Monte-Carlo ont été appliquées au tir des rayons sonores (4,5).

La première partie de l'étude a permis d'obtenir une formulation adéquate des différentes grandeurs décrivant le champ sonore: niveaux de pression, temps de réverbération, directivité et échogrammes.

La seconde partie est le calcul de ces paramètres à l'aide d'une méthode particulière de Monte-Carlo : la stratification (Stratified Sampling) (3).

Le travail se termine sur une comparaison entre valeurs calculées et mesurées en situation réelle.

II. FORMULATION DES PARAMETRES DECRIVANT LE CHAMP SONORE

a) En impulsional

Soit une source omnidirectionnelle S_0 émettant dans un local une impulsion d'énergie E au temps $t = 0$ (cfr fig. 1). Si l'on divise la surface occupée par les auditeurs en un ensemble de petits récepteurs, l'énergie arrivant à celui centré en R (cfr fig. 2) entre les instants t_1 et $t_1 + \Delta t$ s'exprime simplement par :

$$E(R, t_1, \Delta t) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi a(\theta, \phi) \frac{E}{4\pi} D(R, t_1, \Delta t, \theta, \phi) \sin \theta d\theta$$

(1)

où $a(\theta, \phi)$ est le produit des coefficients de réflexion de chaque paroi rencontrée;

$D(R, t_1, \Delta t, \theta, \phi) = 0$, sauf si le rayon émis dans la direction (θ, ϕ) atteint le récepteur centré en R dans l'intervalle de temps spécifié. Dans ce cas, $D = 1$.

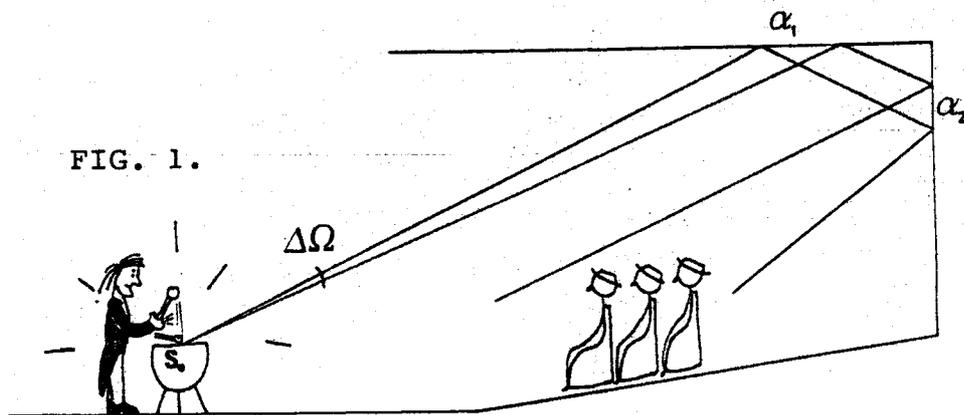


FIG. 1 : Parcours d'un rayon sonore dans une salle.

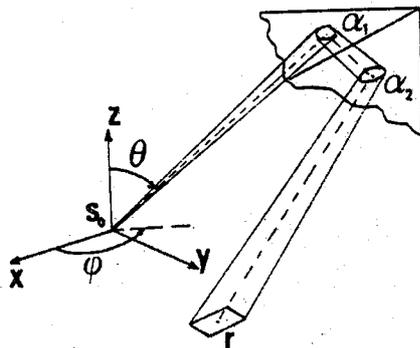


FIG. 2 : Rayon sonore et récepteur (r)

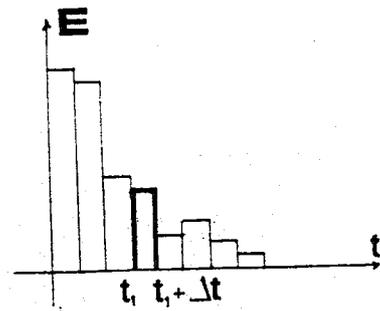


FIG. 3 : Construction d'un échogramme

Le calcul de (1) à plusieurs instants t_1 permet de tracer un échogramme tel que celui représenté à la figure 3.

b) En fréquentiel

La source émet à présent un signal continu dont l'énergie est située dans une bande de fréquences contrée sur f_0 . Ce choix d'un signal "multifréquences" permet d'éviter les problèmes d'interférences entre sources images (4,6).

On définit une moyenne spatiale de la pression efficace en R : $\overline{p^2_{eff}}(R)$. Le calcul de cette grandeur nous permet de dégager l'expression suivante (4,5) :

$$\overline{p^2_{eff}}(R) = \frac{\rho_0 c}{S} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \frac{a(\theta, \phi)}{|\cos i(\theta, \phi)|} \frac{W_S}{4\pi} D(R, \theta, \phi) \sin \theta d\theta \quad (2)$$

où $i(\theta, \phi)$ est l'angle d'incidence du rayon (θ, ϕ) lorsqu'il atteint la surface S ;

W_S est la puissance de la source (watts)

ρ_0 est la densité de l'air (Kg/m^3)

c est la vitesse de l'onde sonore (m/sec)

La discrétisation dans le temps, telle qu'en II.a. permet de tracer des diagrammes de décroissance de la pression sonore après arrêt de la source et, par ajustement linéaire, de trouver le temps de réverbération à -60 dB (4,5).

Enfin, une expression analogue à (1) et (2) a été dégagée pour le calcul du vecteur intensité, composition vectorielle de tous les rayons sonores arrivant au récepteur (4,5).

III. EVALUATION DE CES EXPRESSIONS A L'AIDE DES METHODES DE MONTE CARLO

Nous devons donc calculer des intégrales de la forme suivante :

$$I = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi F(\theta, \phi) \sin \theta d\theta \quad (3)$$

La méthode la plus simple de Monte Carlo consisterait à tirer au hasard, suivant la densité de probabilité constante

$g = (\theta, \phi) = \frac{1}{2\pi^2}$, un échantillon de N rayons à partir de la

source S_0 . L'étude de leur parcours à travers la salle, suivant les lois de l'acoustique géométrique (1,2,5) permettrait de calculer les diverses valeurs $F(\theta_i, \phi_i)$, $i = 1, N$ (fig. 4).

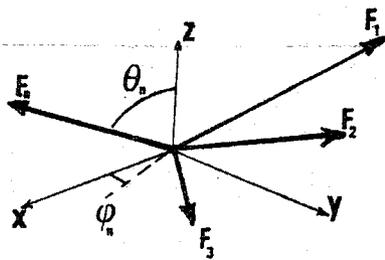


FIG. 4. : Calcul de la fonction F à l'aide d'un tir aléatoire.

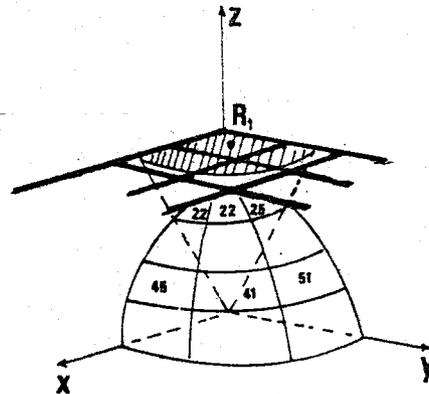


FIG. 5 : Nombre de rayons par pavé pour un tir de 5.000 rayons.

Un estimateur sans biais de I est alors donné par :

$$\hat{I} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N F(\theta_k, \phi_k) \sin \theta_k \quad (4)$$

Cependant, un meilleur rapport précision/temps de calcul peut être obtenu par la méthode de stratification (3). Pour cela, la sphère émettrice centrée en S_0 (fig. 5) est découpée en 100 pavés $\Delta\Omega_{ij}$ égaux (i et $j = 1, 10$).

Une première passe (n_1 rayons $\ll N$) permet d'estimer la dispersion σ_{ij} des résultats $F(\theta, \phi)$ sur chaque $\Delta\Omega_{ij}$.

La deuxième passe accorde à chaque pavé un nombre de rayons proportionnel à σ_{ij} .

Une illustration de cette technique est montrée à la figure 5. En champ libre, les pavés marqués (45,41,51) "arrosent" beaucoup plus de surfaces réceptrices que les pavés (22,22,25)

dont l'influence n'est pratiquement concentrée que sur un seul récepteur (R_1). Il semble donc logique de leur accorder un nombre plus grand de rayons.

IV. RESULTATS

a) Mesures dans un local de travail

La pression efficace est calculée en plusieurs points du local à l'aide d'un programme d'ordinateur basé sur la méthode décrite ci-avant. Celui-ci permet de modéliser la salle en respectant au mieux sa géométrie et d'introduire pour chaque paroi, son coefficient d'absorption α à la fréquence spécifiée. Le tableau ci-dessous révèle l'efficacité de la méthode de stratification dont les paramètres $(T_C \epsilon^2)^{-1}$ ou $(N \epsilon^2)^{-1}$ donnent une idée (3). La première ligne de résultats ($n_1 = 0$) correspond à la méthode simple de Monte Carlo. ϵ (%) est l'erreur relative sur la pression, déterminée également par le programme.

N	n_1	T_C (sec)	ϵ (%)	$T_C \epsilon^2$	$\frac{N}{100 \epsilon^2}$
10.000	0	482	37.25	67	14
10.000	2500	603	25.28	39	6
20.000	2500	1307	20.19	53	8
20.000	5000	1276	18.62	44	7
60.000	10000	3607	8.6	27	4

La figure 6 représente la répartition du champ sonore sur une surface plane horizontale fictive située à 1 m du sol. La corrélation entre les deux types de diagrammes a été prouvée (4,5).

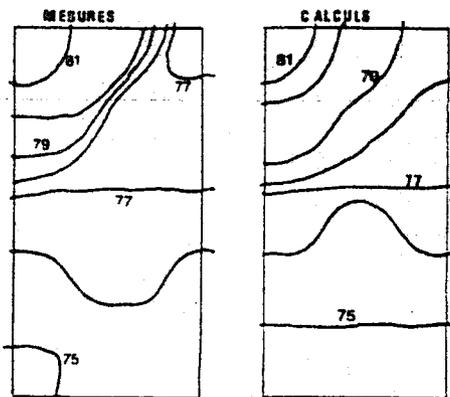


FIG. 6 : Courbes isobares dans un local de travail.

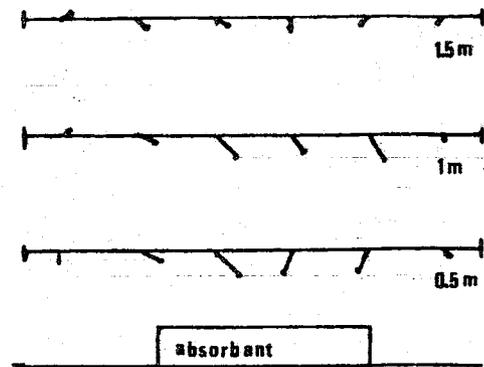


FIG. 7 : Directivité du champ sonore influencée par l'absorbant.

b) Mesures en salle pyramidale réverbérante

Dans la chambre réverbérante de l'Institut Montefiore de l'Université de Liège, un échantillon de laine de verre est placé au sol. La comparaison des temps de réverbération (secondes) mesurés et calculés est montrée dans le tableau ci-dessous.

f	Mesure	Programme
500 Hz	2.08	1.91
1 KHz	1.47	1.36
2 KHz	1.24	1.08

Un exemple de calcul du vecteur intensité est montré à la figure 7. L'intérêt de ce calcul est de donner une bonne représentation de la directivité du champ sonore. On remarque l'influence de l'échantillon de laine de verre, à grande distance de la source.

c) Etude d'une salle de spectacle

Une application importante du programme réside en la modélisation de salles à géométrie complexe telles que les salles de spectacles modernes.

Pour le Centre Culturel de Seraing, les pressions calculées et mesurées sont comparées en quelques points de la surface occupée par les auditeurs (fig. 8). Les temps de réverbération moyens sont respectivement 0.9 secondes pour les mesures et 1,1 secondes pour les calculs.

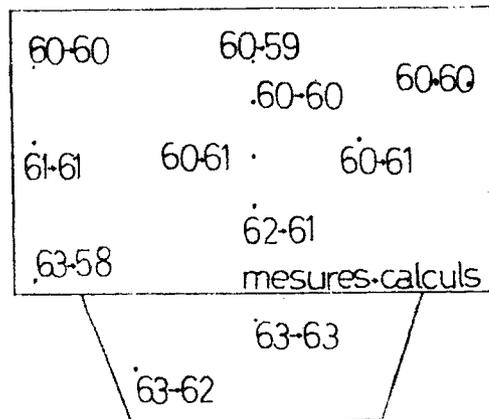


FIG. 8 :

Niveaux de pression (dB) dans le Centre Culturel de Seraing.

V. CONCLUSIONS

L'intérêt de la méthode exposée est donc triple :

- pouvoir modéliser des salles à géométrie particulièrement complexe;
- offrir un meilleur rapport précision/temps de calcul;
- calculer un ensemble de paramètres caractéristiques de l'acoustique d'une salle, avant la construction.

Parmi ceux-ci, le calcul des niveaux de pression donne une très bonne prédiction de la situation réelle. La prédiction du calcul de temps de réverbération est un peu moins bonne, pour un temps de calcul raisonnable (4,5).

Quelques améliorations peuvent être apportées à la méthode :

- obtenir une encore meilleure prédiction du temps de réverbération;
- à l'aide de la stratification de la sphère émettrice, introduire la directionnalité de la source;
- permettre la modélisation de locaux dont les murs ne sont pas plans.

Il a, en effet, été montré (1) que, contrairement à la méthode des sources-images, la méthode des rayons sonores pouvait tenir compte de telles parois.

+
+ +

REFERENCES

- (1) JURICIC H. et SANTON F., Images et rayons sonores dans le calcul numérique des échogrammes; *Acustica* 28 (1973), 77.
- (2) KROKSTAD A., STRØM S. and SØRSDAL S.; Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique; *J. Sound Vib.* 8 (1968), 118.
- (3) HAMMERSLEY J-M. and HANDSCOMB D.C., Monte Carlo methods; London, Methuen & C° Ltd, (1964).
- (4) EMBRECHTS J-J.; Répartition du champ sonore par une méthode de tir aléatoire; *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège* (1981).
- (5) EMBRECHTS J-J., Sound Field Distribution using randomly traced sound ray techniques; à paraître dans *Acustica*.
- (6) GIBBS B.M. and JONES D.K.; A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure, *Acustica* 26 (1972), 24.

+
+ +