

ANALYSE DE LA PRECISION D'UNE METHODE PREVISIONNELLE UTILISANT LE CONCEPT DE RAYON SONORE.

J.J. EMBRECHTS

Chargé de recherches
du Fonds National de la Recherche Scientifique.

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la prévision mathématique des niveaux sonores en espaces clos ou ouverts, la méthode des rayons sonores est largement adoptée pour ses qualités de souplesse et de bon rapport entre l'exactitude de la prévision et la longueur du temps de calcul. Elle offre de plus à l'opérateur la possibilité de choisir, dans une certaine mesure, la précision des résultats souhaités par la définition de certaines caractéristiques telles l'aspect plus ou moins détaillé de la modélisation géométrique de l'espace, l'ordre de réflexion maximal des rayons, leur puissance minimale transportée ou leur longueur maximale parcourue. Quelques effets propres à la nature ondulatoire du phénomène sonore, a priori inaccessibles à l'acoustique géométrique, peuvent même être pris en compte moyennant certains artifices de calcul (cfr. bibliographie).

Le but de cet article est d'analyser la précision d'une méthode de ce type, c'est-à-dire celle mise au point au Service d'Acoustique de l'Université de Liège en 1981 [2,3]. Nous insisterons notamment sur le rôle de l'opérateur et sur la manière dont il peut influencer l'efficacité du calcul prévisionnel.

2. BREVE DESCRIPTION DE LA METHODE ANALYSEE

Il s'agit, à partir d'une source sonore, de tirer plusieurs rayons et de simuler mathématiquement leur parcours dans l'espace en appliquant les principes de propagation rectiligne de l'énergie sonore, réflexion spéculaire et absorption des parois et du milieu ambiant. Le trajet d'un rayon est ainsi calculé et prolongé jusqu'à ce que son énergie soit devenue négligeable. Chaque fois que le rayon atteint un récepteur, son intensité instantanée est enregistrée et le rayon est ensuite prolongé ou réfléchi suivant la nature du récepteur.

Les rayons sont tirés dans des directions aléatoires à partir de la source. Le récepteur ne peut donc être ponctuel. On a dès lors choisi de définir des récepteurs à deux dimensions. Plus précisément, l'opérateur peut introduire dans l'espace de larges surfaces d'audience rectangulaires. Celles-ci sont ensuite découpées suivant la longueur et la largeur en un nombre de divisions spécifié par l'opérateur. Le tout forme un maillage régulier de petits récepteurs surfaciques dont les dimensions sont bien déterminées (figure 1).

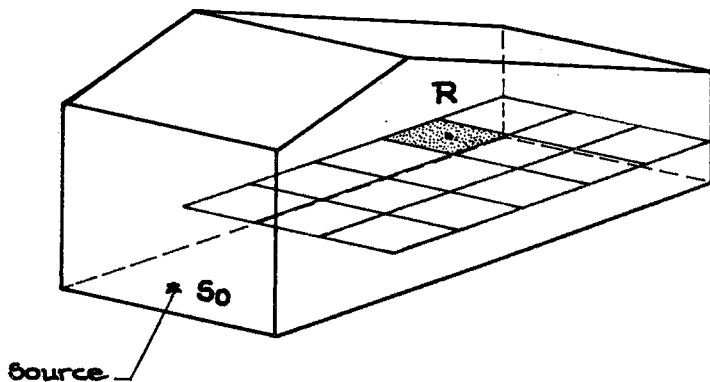


FIGURE 1

Surface d'audience horizontale dans un local et quadrillage régulier de cette dernière en petits récepteurs surfaciques.

L'évaluation des paramètres du champ sonore au récepteur passe par le calcul de la moyenne statistique des contributions de chaque rayon atteignant ce dernier. Dans le cas du récepteur surfacique, la valeur efficace de la pression sonore moyenne au récepteur centré au point R est donnée par [2,3] :

$$\overline{p_{\text{eff}}^2 (R)} = \frac{\rho_0 c}{S} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\pi \left(\sum_{r=1}^{\infty} \delta_r (\theta, \phi) \frac{a_r (\theta, \phi)}{c_r (\theta, \phi)} \right) I (\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \quad (1)$$

Dans cette expression, nous reconnaissons les symboles suivants :

ρ_0 : la densité de l'air (Kg / m³)

c : la vitesse de propagation du son (m/sec)

S : l'aire du récepteur (m²)

θ, ϕ : les angles d'émission à partir de la source (figure 2)

Σ : la contribution de tous les ordres de réflexion du rayon émis dans la direction (θ, ϕ) .

$I (\theta, \phi)$: l'intensité initiale du rayon émis dans cette direction (W / stéradian)

$a_r (\theta, \phi)$: le "facteur d'affaiblissement" [9] de l'intensité à l'ordre de réflexion n^or

$c_r (\theta, \phi)$: la valeur absolue du cosinus de l'angle d'incidence du rayon sur la surface réceptrice à l'ordre de réflexion n^or

$\delta_r (\theta, \phi)$: 0 sauf si le rayon (θ, ϕ) atteint le récepteur à la r^{ième} réflexion ($\delta_r = 1$).

Remarquons que la somme Σ comprend les contributions des ordres de réflexion à partir du premier. Il s'agit donc de la pression du champ sonore réverbéré. Le niveau en champ direct peut, lui, être évalué

beaucoup plus simplement, sans passer par une méthode de rayons.

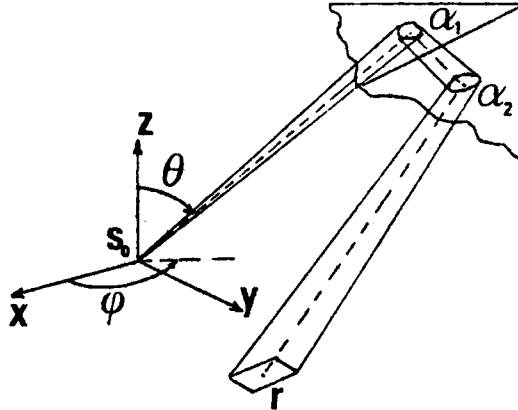


FIGURE 2

*Système de coordonnées sphériques (θ, ϕ)
centré sur la source ponctuelle S_0 ; récepteur r et trajet du rayon (θ, ϕ) .*

L'équation (1) peut être considérée comme la moyenne statistique d'une fonction de la variable aléatoire (θ, ϕ) . Elle est pratiquement estimée par la moyenne d'un échantillon de N rayons (θ_k, ϕ_k) émis à partir de la source :

$$\overline{p_{\text{eff}}^2(R)} \cong \frac{4 \pi \rho_0 c}{N S} \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^{\infty} \frac{a_{rk}}{c_{rk}} \delta_{rk} l_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N H_k \quad (2)$$

La fonction densité de probabilité géométrique est :

$$g(\theta, \phi) = \frac{\sin \theta}{4 \pi} \quad (3)$$

L'expression (2) illustre donc la manière de combiner les résultats enregistrés lors du passage des rayons au récepteur afin d'en déduire un estimateur sans biais du carré de la pression efficace. Il est à noter que

l'équation (2) dépend de la fréquence par le facteur d'affaiblissement a_{rk} et l'intensité I_k . Le calcul dans les huit bandes d'octave normalisées permet d'obtenir la pression sonore au récepteur en dBA par :

$$p_A^2 (R) = \sum_{f=1}^8 10^{\frac{c_f}{10}} \overline{p_{\text{eff}}^2 (R)} \quad (\text{Pascal})^2 \quad (4)$$

où c_f est la correction (en décibels) à appliquer dans la bande d'octave n^of.

D'autres grandeurs acoustiques (temps de réverbération, ...) se prêtent également à une estimation par cette technique de tir aléatoire de rayons. Elles ne sont pas reprises dans cette étude où l'analyse de la précision sera limitée à la prédiction des niveaux sonores en dBA.

3. ANALYSE PRELIMINAIRE

Le modèle prévisionnel décrit au paragraphe précédent permet donc d'analyser des configurations réelles dans lesquelles existe un champ sonore bien déterminé. Les niveaux sonores prédits s'écartent donc plus ou moins des niveaux réels.

Nous distinguerons dans notre étude trois types d'erreur. Le premier d'entre eux est désigné dans la suite par le terme "erreur systématique" sur le niveau sonore. Cette erreur est une conséquence de l'arrêt des rayons en fonction de critères énergétiques ou temporels.

La seconde catégorie d'erreur est de type statistique. L'expression (2) résultant d'un échantillonnage, un estimateur de la variance de $p_A^2 (R)$ peut être calculé et présenté à l'opérateur comme diagnostic du tir aléatoire.

Le troisième type d'erreur, enfin, a trait aux hypothèses de l'acoustique géométrique et à la modélisation du site traité. Il sera désigné dans la suite par le terme "erreur de modélisation".

4. ERREUR SYSTEMATIQUE SUR LE NIVEAU SONORE

Comme signalé au paragraphe précédent, cette erreur provient de l'arrêt du rayon sonore alors qu'il contient encore de l'énergie et qu'il

pourrait donc encore contribuer au niveau sonore à certains récepteurs. Dans l'expression (1), elle résulte de la limitation de la somme infinie sur r à un ordre de réflexion maximum dépendant éventuellement du rayon considéré. C'est donc une erreur par défaut sur le niveau exact.

Il est intéressant d'établir un ordre de grandeur de cet écart systématique en fonction de paramètres maîtrisables par l'opérateur, tels l'énergie sonore minimale transportée par le rayon ou sa longueur développée maximale. Pour ce calcul simplifié, nous pouvons supposer que le niveau sonore (dB) en tout récepteur décroît de manière linéaire après arrêt de la source (figure 3).

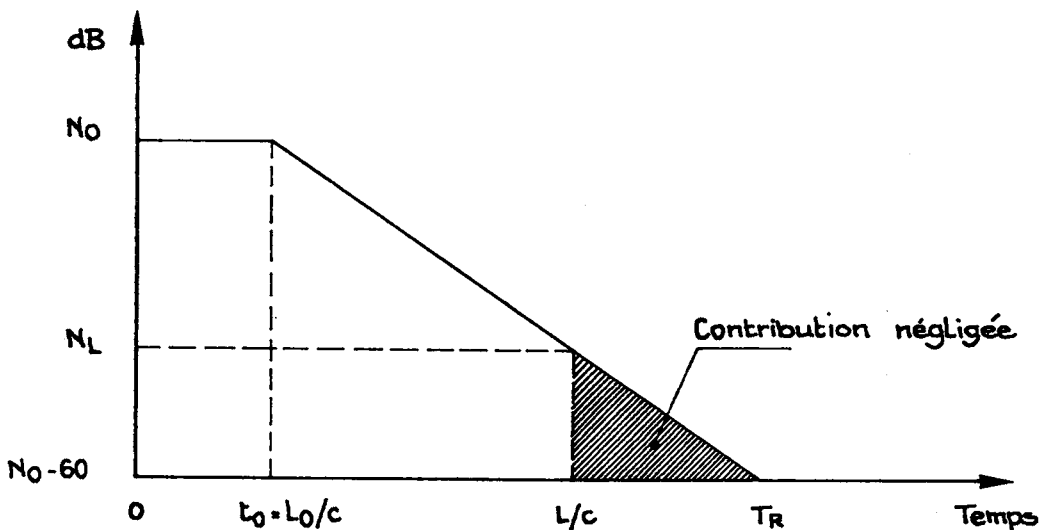


FIGURE 3

Décroissance temporelle linéaire du niveau sonore (dB) après arrêt de la source en $t = 0$. La partie hachurée illustre la contribution au niveau sonore N_0 des rayons de longueur supérieure à L mètres. L_0 est la distance source-récepteur.

Si la longueur maximale du rayon est L , la contribution de tous les rayons de longueur supérieure est négligée, soit (d'après la figure 3) :

$$N_L = N_0 - 60 \frac{L - L_0}{c(T_r - t_0)} \quad \text{dB} \quad (5)$$

où T_r est le temps de réverbération (sec) au récepteur considéré et à la fréquence de travail choisie, L_0 étant la distance source-récepteur.

Le niveau évalué n'est donc pas N_0 , le niveau exact, mais :

$$\begin{aligned}
 & 10 \log \left[10^{\frac{N_0}{10}} - 10^{\frac{N_L}{10}} \right] \\
 & \cong N_0 + 10 \log \left(1 - 10^{\frac{-6L}{cT_r}} \right) \quad \text{si } L \gg ct_0 \\
 & = N_0 - \Delta_s
 \end{aligned} \tag{6}$$

Δ_s est l'erreur systématique recherchée. En voici quelques ordres de grandeur :

pour $L = cT_r / 6$,	$\Delta_s = 0.46$ dB
pour $L = cT_r / 4$,	$\Delta_s = 0.14$ dB
pour $L = cT_r / 3$,	$\Delta_s = 0.04$ dB

Si le temps de réverbération au récepteur est de une seconde, une longueur maximale de 90 m conduit à une erreur systématique de l'ordre de 0.1 dB. Cet écart est négligeable par rapport à ce que l'on peut attendre des deux autres sources d'erreur.

Pour fixer la longueur maximale des rayons, l'opérateur doit connaître le temps de réverbération au récepteur ce qui, dans un avant-projet, n'est pas toujours le cas. S'il ne peut l'estimer, il aura alors recours à la formulation suivante. On suppose une décroissance moyenne du facteur d'affaiblissement en fonction de la longueur L parcourue :

$$a_L(\theta, \phi) = (1 - \bar{\alpha})^{\frac{L}{L_m}} e^{-mL} \quad (7)$$

où $\bar{\alpha}$ est le coefficient d'absorption moyen de l'espace, L_m le libre parcours moyen et m le coefficient d'absorption de l'air (en népers / mètre). Cette expression moyenne est indépendante du rayon considéré et de sa direction d'émission (θ, ϕ).

Arrêter le rayon après une longueur parcourue de L mètres revient dès lors à le stopper dès que l'énergie transportée est tombée à $(100 a_L) \%$ de sa valeur initiale. En tenant compte des expressions suivantes, tirées de la théorie d'Eyring, et qui font intervenir le volume V (m^3) et la surface S (m^2) de l'espace :

$$T_r = \frac{24 V}{c (\log_{10} e) [-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4 m V]} \quad \text{secondes}$$

$$L_m = \frac{4 V}{S} \quad \text{mètres} \quad (8)$$

nous obtenons :

$$\log_{10} a_L = \frac{-6 L}{c T_r} \quad (9)$$

L'erreur systématique Δ_s est enfin tirée de l'équation (6) :

$$\Delta_s = 10 \log \frac{1}{1 - a_L} \quad (10)$$

Cette estimation a le mérite de ne faire intervenir que le pourcentage d'énergie minimale transportée par le rayon, paramètre défini par l'opérateur. De plus, elle est indépendante de la fréquence. En voici quelques ordres de grandeur :

$$\text{pour } a_L = 10 \%, \quad \Delta_S = 0.46 \text{ dB}$$

$$\text{pour } a_L = 3 \%, \quad \Delta_S = 0.13 \text{ dB}$$

$$\text{pour } a_L = 1 \%, \quad \Delta_S = 0.04 \text{ dB}$$

En résumé de ce paragraphe, retenons que l'opérateur peut rendre l'erreur systématique négligeable tout en conservant un temps de calcul raisonnable. Deux possibilités s'offrent à lui : soit limiter la longueur du rayon (à $cT_r / 4$ pour $\Delta_S \cong 0.1$ dB), soit fixer l'énergie minimale transportée (à 3 % pour $\Delta_S \cong 0.1$ dB).

5. ERREUR STATISTIQUE SUR LE NIVEAU SONORE

La moyenne d'un échantillon de N rayons exprimée en (2) et transformée en (4) est un estimateur sans biais de la moyenne de la population, c'est-à-dire du niveau sonore exact correspondant à un échantillonnage théoriquement infini de rayons.

Le théorème de la limite centrale relatif aux moyennes d'échantillons donne un ordre de grandeur de l'écart entre p_A^2 , le niveau exact, et le niveau estimé par échantillonnage statistique: la probabilité que

$$|p_A^2 - \hat{p}_A^2| < \frac{2\sigma}{\sqrt{N}} \quad (11)$$

est de 95 % si N tend vers l'infini (en pratique $N > 30$). Dans cette expression, σ^2 est la variance finie de la population des variables aléatoires

$$G(\theta, \phi) = \sum_{f=1}^8 10^{\frac{q}{10}} H(\theta, \phi, f)$$

la fonction H étant définie par l'équation (2). Cette variance est cependant inconnue et les limites de confiance de p_A^2 s'évaluent dès lors à partir de la variance de l'échantillon :

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N G_k^2 - \frac{N}{N-1} (\hat{p}_A^2)^2 \quad (12)$$

Le programme de calcul prévisionnel présente, à la fin de son exécution, une estimation de l'erreur statistique basée sur ce principe, soit :

$$\Delta_e = \frac{2s}{\sqrt{N}} \quad (\text{Pascal})^2 \quad (13)$$

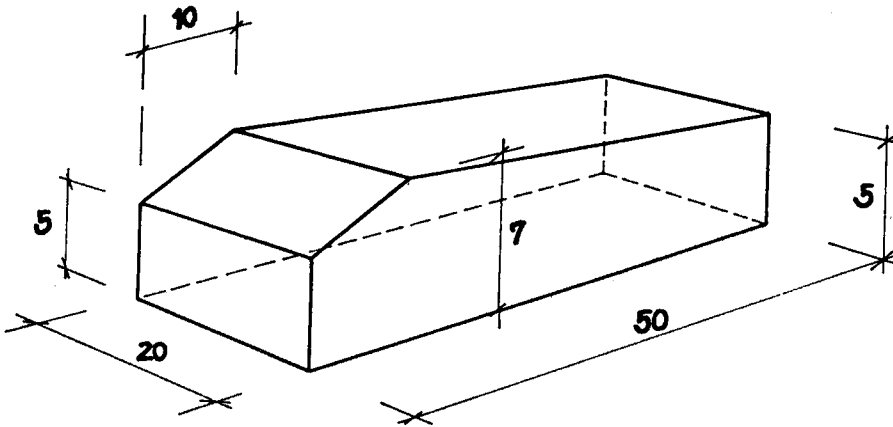


FIGURE 4

Vue et dimensions du local servant de base aux essais.

Afin d'illustrer la signification de l'erreur d'échantillonnage Δ_e , analysons à présent un problème simple. La figure 4 représente la vue en perspective du local étudié, de 50 m de long par 20 m de large et dont le sommet culmine à 7 m de hauteur. La surface d'audience est parallèle au sol, à 1 m de ce dernier, et partagée en dix récepteurs surfaciques de 100 m² chacun (cinq divisions suivant la longueur et deux suivant la largeur).

TABLEAU I

Données du problème traité .

fréquence(Hz)	63	125	250	500	1K	2K	4K	8K
α sol	0.05	0.05	0.1	0.1	0.15	0.15	0.2	0.2
α parois	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.5	0.5
α plafonds	0.4	0.5	0.6	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7
α air (dB/100m)	0.05	0.08	0.1	0.3	0.6	1.	1.5	3.
Puissance source(dB)	60.	70.	80.	90.	90.	70.	80.	100.
Source en X= 1m , Y= 10 m , Z= 0.5 m c=340 m/sec $\rho_0= 1.2 \text{ Kg/m}^3$ Energie minimale transportée : $a_L=0.01 \%$								

Le tableau I reprend les données acoustiques du problème. Remarquons que, selon la théorie du paragraphe 4, Δ_s est ici négligeable (< 0.001 dB).

On décide d'effectuer pour ce problème cinq exécutions du programme prévisionnel avec des échantillons différents de cent rayons chacun. Chaque passage fournit les niveaux (dBA) aux dix récepteurs ainsi que l'estimation (13) des limites de confiance. Etant donné la symétrie du local et la position médiane de la source, les niveaux évalués aux récepteurs de même abscisse X sont des prévisions d'un même niveau réel. On dispose donc, à chacune des cinq abscisses X=5,15,25,35 et 45 m, de dix estimations (deux par passage) du niveau correct. Les tableaux II et III reprennent tous les résultats calculés. Rappelons qu'il s'agit ici des niveaux sonores en champ réverbéré, contributions des rayons ayant subi au moins une réflexion.

TABLEAU II

Niveaux de pression estimés (dBA)
par cinq passages de cent rayons chacun (champ réverbéré).

passage numéro :	1		2		3		4		5	
X= 5m	78.9	76.8	78.0	77.3	78.4	78.2	76.1	78.5	77.5	77.4
X=15m	70.9	74.1	70.8	71.1	66.4	75.4	67.3	71.3	70.0	73.1
X=25m	72.6	70.6	68.4	66.5	68.0	66.6	66.2	66.7	68.1	66.8
X=35m	61.3	63.4	63.7	72.2	64.2	69.3	61.3	63.5	70.9	67.0
X=45m	64.7	63.3	70.8	62.5	62.1	64.0	69.8	70.9	63.1	63.8

TABLEAU III

Erreur statistique Δ_e (13) en (Pascal)² x 10³
pour les mêmes passages qu'au tableau II .

passage numéro :	1		2		3		4		5	
X= 5m	11.8	6.80	11.8	8.03	18.0	10.9	6.75	16.8	9.40	8.02
X=15m	5.40	13.2	5.28	4.06	.976	18.5	1.15	5.40	3.22	7.73
X=25m	12.0	5.16	3.07	.797	1.24	.927	.763	.988	2.36	.858
X=35m	.443	.498	.543	10.8	.719	3.29	.403	.548	6.78	1.44
X=45m	.807	.847	8.50	.437	.428	.843	3.90	7.97	.610	.872

Nous avons représenté à la figure 5 les limites de confiance à 95 % pour les abscisses X= 5 , 25 et 45 m. La figure 5a (X=5m) montre que, dans tous les cas, l'intervalle de confiance contient le niveau exact, évalué par un tir de 50000 rayons et représenté également sur le diagramme.

Il n'en est pas de même aux figures 5b et 5c où l'on remarque que certains intervalles de confiance sont sous-évalués. Cette conclusion n'est pas imputable au niveau de confiance (95 %) puisque, à la figure 5b, le phénomène se produit cinq fois sur dix. En réalité, ce dernier est observable lorsque N est trop petit : l'approximation de σ par s dans (11) est trop imparfaite et introduit des erreurs significatives.

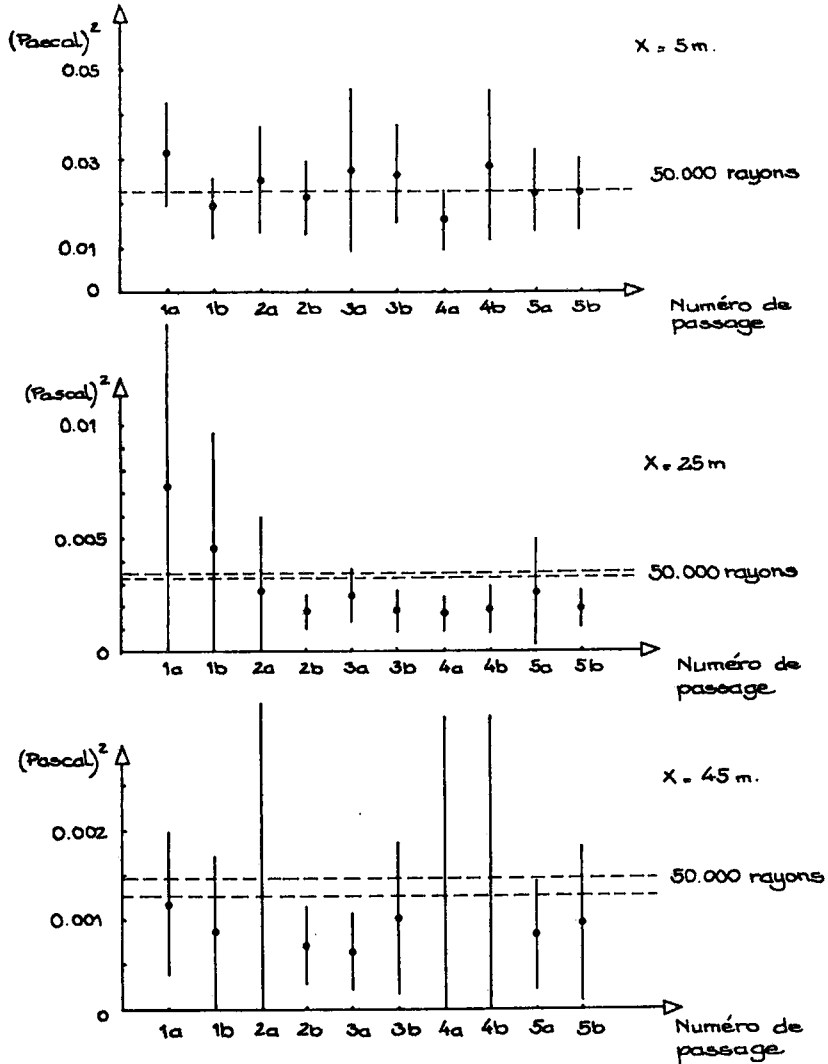


FIGURE 5

Limites de confiance à 95% des niveaux $(\text{Pascal})^2$ évalués par cinq échantillonnages de 100 rayons chacun. Pour chaque échantillonnage, les niveaux calculés aux deux récepteurs de même abscisse X fournissent deux estimations (a et b sur la figure) du niveau exact à cette abscisse. En pointillé, les limites de confiance des mêmes niveaux calculés par un tir de 50000 rayons.

On pourrait éventuellement tenir compte d'un intervalle de confiance sur σ mais cet intervalle ne se prête pas à une évaluation aisée car la distribution des variables aléatoires $G(\theta, \phi)$ n'est pas normale. Retenons donc que le nombre N de rayons tirés doit être suffisant que pour permettre une estimation raisonnable des limites de confiance : l'expérience montre que $N= 1000$ est un minimum.

Les tableaux IV et V reprennent, pour le même exemple (fig.4), les résultats de trois passages à 2000 rayons. Constatons à la figure 6 que les limites de confiance sont dans ce cas significatives. Notons également au tableau IV le niveau moyen à chacune des cinq abscisses, évalué par un tir de 50000 rayons et, au tableau V, l'erreur statistique calculée à partir de l'écart-type σ , lui-même estimé par le tir de 50000 rayons.

TABLEAU IV

Niveaux de pression estimés (dBA)
par trois passages de 2000 rayons chacun (champ réverbéré).

passage numéro:	1		2		3		50000 rayons
X= 5m	77.2	77.4	77.6	77.7	77.8	77.1	77.6
X=15m	70.8	72.2	71.4	72.1	71.4	72.2	71.7
X=25m	70.0	69.5	69.4	69.8	69.0	69.3	69.3
X=35m	65.8	68.4	65.0	67.2	67.7	66.4	67.1
X=45m	66.5	66.9	63.5	66.4	66.3	64.1	65.4

L'exemple illustratif précédent a donc montré qu'il était possible de présenter à l'opérateur un diagnostic de son échantillonnage de N rayons sous la forme d'une précision. En pratique, celle-ci est donnée, non pas en $(\text{Pascal})^2$ comme aux tableaux III et V, mais en pourcentage de la pression p_A^2 (4). Ce pourcentage peut être aisément transformé en décibels A. En effet, 10% d'erreur statistique correspondent à $(-0.5, +0.4)$ dBA, 20% correspondent à $(-1, +0.8)$ dBA et 50% correspondent à $(-3, +1.8)$ dBA.

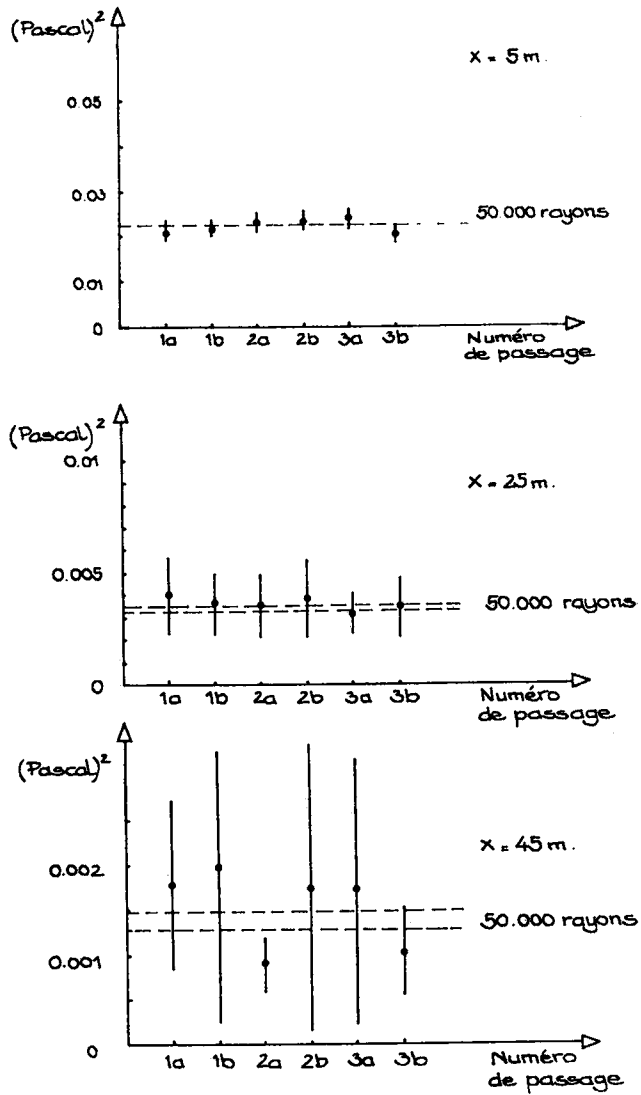


FIGURE 6

Limites de confiance à 95% des niveaux $(\text{Pascal})^2$ évalués par trois échantillonnages de 2000 rayons chacun.

TABLEAU V

Erreur statistique Δ_e (13) en $(\text{Pascal})^2 \times 10^3$
pour les mêmes passages qu'au tableau IV.

passage numéro:	1		2		3		s = σ
X= 5m	2.06	1.98	2.16	2.43	2.31	2.07	2.28
X=15m	1.31	1.70	1.55	1.94	1.60	1.96	1.76
X=25m	1.76	1.37	1.37	1.72	0.93	1.33	1.24
X=35m	0.62	1.31	0.29	1.39	0.94	1.30	1.14
X=45m	0.94	1.70	0.32	1.59	1.47	0.48	1.04

Si, sur base de ce diagnostic, l'opérateur juge l'écart statistique trop élevé, deux moyens s'offrent à lui pour le réduire. Le théorème de la limite centrale indique en effet que cet écart est inversement proportionnel à la racine carrée de N. On montre également [2] qu'il est inversement proportionnel à la racine carrée de S. Pour réduire de moitié l'erreur statistique, l'opérateur a donc le choix entre quadrupler le nombre N de rayons ou la surface S des récepteurs. Dans le premier cas, le temps de calcul est multiplié par quatre tandis que dans le second cas, l'opérateur sacrifie un peu du caractère local des résultats.

Ce choix n'est cependant pas toujours aussi draconien. Il est parfois avantageux de recourir aux techniques numériques dites "de réduction de variance". Par exemple, lorsque l'espace n'est pas trop réverbérant, une stratification de la sphère d'émission et un tir préférentiel dans certaines directions peuvent s'avérer efficace [2].

L'expérience montre qu'une erreur statistique de 20% est souvent un bon compromis entre précision et temps de calcul. Le niveau en champ réverbéré est alors estimé avec une précision de 1 dBA.

Pour terminer ce paragraphe, il n'est pas inutile de signaler que cette erreur statistique est propre aux tirs aléatoires. Les méthodes à tir de rayons déterministes ne sont cependant pas avantageées car elles sont entachées en contrepartie d'une erreur de discrimination.

6. ERREUR DE MODELISATION SUR LE NIVEAU SONORE

Ainsi qu'il a été défini au paragraphe 3, ce terme très général

englobe les erreurs relatives aux hypothèses de l'acoustique géométrique (propagation rectiligne, réflexion spéculaire, combinaison énergétique des sources) et celles relatives à la modélisation du site traité.

En ce qui concerne les hypothèses de l'acoustique géométrique, les sources d'erreur sont principalement la diffraction, les interférences et la diffusion. Les effets de diffraction sont localisés dans un entourage de la singularité, entourage dont l'étendue est de quelques longueurs d'onde. Ils interviennent donc principalement en basse fréquence. Leur importance est fortement atténuée si l'on choisit comme unité de travail le décibel A. Les phénomènes d'interférences sont, eux aussi, prépondérants en basse fréquence. En situation complexe, ils sont fortement atténués par la non cohérence des différentes sources-images. La diffusion est un phénomène de haute fréquence qui peut être considéré local dans certains cas.

Si l'on connaît les sources d'erreur, il est cependant difficile de les chiffrer. Cette opération dépend en effet de la configuration géométrique de l'espace traité et des paramètres acoustiques du problème. On en est alors réduit à comparer les niveaux de pression mesurés dans certains espaces particuliers avec les prédictions de ces niveaux calculées par ordinateur. Si l'on prend soin de rendre les erreurs de types systématique et statistique négligeables, on dispose effectivement d'un ordre de grandeur de l'erreur de modélisation.

Avant de citer quelques exemples et de chiffrer ce troisième type d'erreur, il est sans doute intéressant de se pencher sur le problème de la modélisation du site traité, modélisation géométrique et acoustique. La modélisation géométrique ne pose, en général, pas de problème si ce n'est le choix de la dimension minimale des détails à respecter. Plus cette dimension est faible et plus le travail de l'opérateur est fastidieux mais ce dernier reste bien entendu maître de l'erreur de modélisation géométrique.

Il n'en va pas de même de la spécification des paramètres acoustiques, que ce soient les niveaux de puissance sonore émis par les sources ou les coefficients d'absorption des parois. La puissance des sources sonores peut être relevée in situ, lorsqu'il s'agit d'étudier le champ sonore dans un espace existant. Dans la plupart des cas cependant, l'opérateur devra se baser soit sur les données du constructeur, soit sur des mesures de puissance effectuées sur une source similaire implantée à un autre endroit. Il est bien évident que les conditions de fonctionnement de cette dernière devront être semblables à celles de la situation simulée.

La définition des coefficients d'absorption des parois est, dans la plupart des cas, une cause d'erreur de modélisation importante. Cette donnée ne pouvant être déduite de mesures in situ du matériau, l'opérateur

aura recours soit à la documentation du fabricant, soit à la mesure du coefficient en chambre réverbérante, soit encore à son expérience personnelle. Une approche nouvelle est actuellement tentée au Service d'Acoustique de l'Université de Liège. Il s'agirait d'attribuer aux matériaux un coefficient d'absorption tel que les prédictions du programme de simulation concordent avec des niveaux sonores mesurés dans une situation simple. En l'occurrence, le test en chambre réverbérante a été choisi. D'un point de vue théorique, le coefficient d'absorption déterminé ainsi dépendra donc du logiciel utilisé et, plus précisément, de la technique de rayons employée. Pour une situation quelconque, différente du test en chambre réverbérante, on espère que la considération de ce facteur permettra de réduire l'erreur de modélisation sur le niveau sonore.

Nous avons rassemblé aux figures 7a et 7b plusieurs résultats de comparaisons entre niveaux de pression mesurés et calculés dans la même enceinte. Ces résultats proviennent de plusieurs études soit tirées de l'ouvrage [2], soit menées par le département CEDIA de l'Université de Liège à l'aide du logiciel décrit précédemment. En bref, l'opérateur dispose, pour un espace donné, des niveaux de pression mesurés à certains endroits et décrivant le champ sonore résultant de la présence d'une ou plusieurs sources sonores. Pour comparer ces niveaux avec la prédiction de l'ordinateur, il doit, en premier lieu, modéliser l'espace c'est-à-dire, notamment, choisir la valeur des coefficients d'absorption sur base d'une description des matériaux. Il doit ensuite définir les paramètres du tir de rayons (a_L, N, S, \dots) de telle manière que les erreurs systématique et statistique soient inférieures à 1 dB.

La figure 7a montre l'histogramme des écarts (en dBA) entre 129 niveaux de pression mesurés et leurs correspondants calculés. Il s'agit des niveaux globaux résultant des champs direct et réverbéré. Notons que 85% des écarts sont, en valeur absolue, inférieurs à 2.5 dBA et que 95% sont inférieurs à 3.5 dBA. La figure 7b montre l'histogramme des écarts relatif à 164 autres niveaux évalués dans ce cas en dB à certaines fréquences (500Hz, 1 ou 2 KHz). Remarquons que 90% des écarts sont, en valeur absolue, inférieurs à 1.5 dB et 99% sont inférieurs à 2.5 dB.

Sur base de la figure 7, nous pouvons tirer les conclusions suivantes:

- 1) L'erreur de modélisation dépend fortement du problème traité et du soin apporté par l'opérateur à la description de l'espace.
- 2) Cette erreur est, en valeur absolue, rarement supérieure à 3 dB ou 3 dBA, à condition qu'un minimum de soins soit apporté à la description de l'espace et, notamment, à la définition des coefficients d'absorption des parois.

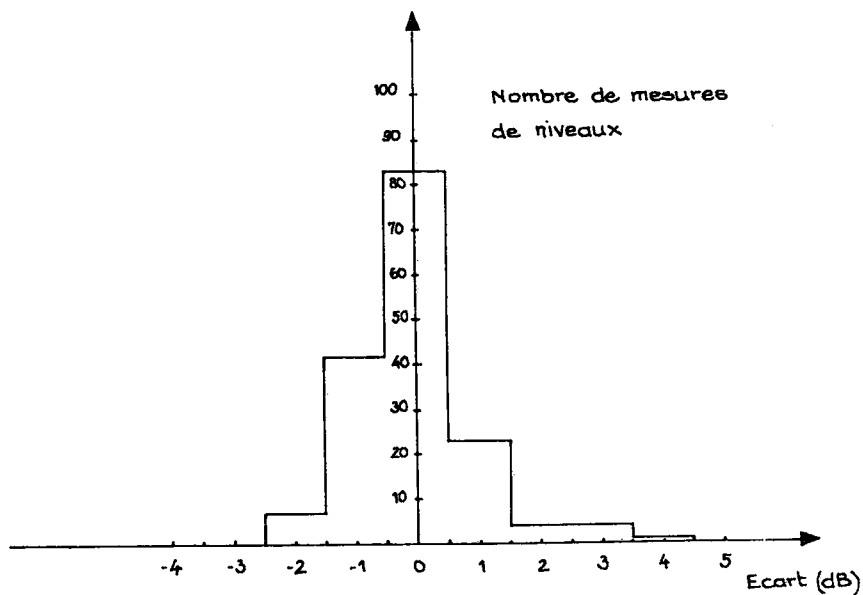
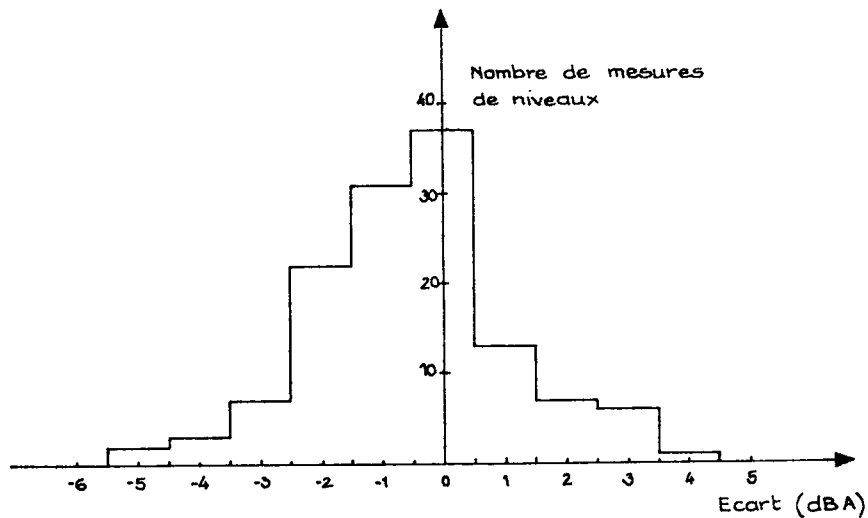


FIGURE 7

Histogramme des écarts entre niveaux de pression mesurés et calculés dans des sites de mêmes caractéristiques géométriques et acoustiques : a) résultats de mesures collectés en dBA ; b) résultats collectés en dB, dans certaines bandes d'octave (500 Hz , 1 ou 2 KHz).

Cette deuxième conclusion est loin d'être une loi générale. Elle a cependant le mérite d'illustrer la bonne performance des techniques de rayons lors de la prédiction du champ sonore dans un espace donné.

7. CONCLUSION

L'analyse de la précision des résultats fournis par la méthode prévisionnelle utilisée au Service d'Acoustique de l'Université de Liège a montré :

- que la technique des rayons sonores permet d'obtenir une prédiction valable des niveaux sonores dans un espace donné et moyennant un temps de calcul raisonnable.
- que l'opérateur est maître des erreurs de types systématique et statistique.
- que la principale source d'erreur entre les niveaux prédits et réellement obtenus réside dans la modélisation du problème traité.

C'est donc dans cette voie que devraient se concentrer les recherches permettant d'obtenir de meilleures performances de la part des méthodes de simulation. En particulier, l'utilisateur de telles méthodes a vraiment besoin d'une technique lui permettant d'estimer valablement les coefficients d'absorption d'un matériau ou d'une paroi quelconques.

REFERENCES

- [1] SCHROEDER, M.R., Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces , *Jrnl of the Acoustical Society of America* , Vol.47, N°2(Part 1), 1970, pp. 424-431.
- [2] EMBRECHTS, J.J., Répartition du champ sonore par une méthode de tir aléatoire , Travail de fin d'études , *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège* , 1981.
- [3] EMBRECHTS, J.J., Sound field distribution using randomly traced sound ray techniques , *Acustica* , Vol. 51 , N°6 , 1982, pp. 288-295.
- [4] ONDET, A.M. et BARBRY, J.L., Prévion des niveaux sonores dans les locaux encombrés , *Les notes scientifiques et techniques de l'I.N.R.S. (acoustique prévisionnelle intérieure)* , N°52 , octobre 1984.
- [5] STEPHENSON, U.M. and MECHEL, F.P., The sound particle simulation technique applied to problems of sound propagation from power plants , *Fraunhofer-Institut für Bauphysik* , Stuttgart , 1986.

- [6] NOEL,P., Prédiction des niveaux sonores en espace ouvert.Application des méthodes de tir, Travail de fin d'études , *Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège* , 1986.
- [7] VERMEIR,G. en VAN MAERCKE,D., Numerieke methoden voor het voorspellen van reflektogrammen, *Nederlandse Akoestisch Genootschap* , 1983.
- [8] KROKSTAD,A.,STRØM,S. and SØRSDAL,S., Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique , *Jrnl of Sound and Vibration* , Vol.8 ,N°1 , 1968 ,pp. 118-125.
- [9] JURICIC,H. et SANTON,F., Images et rayons sonores dans le calcul numérique des échogrammes , *Acustica* , Vol.28 ,N°2, 1973 , pp. 77-89.
- [10] SANTON,F., Traitement acoustique de trois salles à partir d'une méthode de rayons , *Acustica* , Vol.44 , 1980 , pp. 46-50.

BULLETINS "ELECTROACOUSTIQUE" DEJA PARUS

- Bulletin n° 1: R. BORLON, Nouvelle méthode de détermination de la résistance acoustique de rayonnement; R. VRANCKEN, La chambre sourde de l'Institut Montéfiore; L. HAESSEN, Mode de vibration d'une plaque soumise à un champ acoustique.
- Bulletin n° 2: J. DENDAL, Capteur stéréophonique utilisé dans la mesure d'amplitude des fines plaques en vibrations; B. NAROLSKI, Approximate calculation of the noise emitted by power transformers; P. CHAVASSE, Systèmes de contrôle d'efficacité des appareils d'abonnés; P. WANG, Isolation phonique fonctionnelle.
- Bulletin n° 3: J. HENSGENS, Etude générale d'un microphone à sonde; H. JOSKIN, Relation entre puissance d'un signal, niveau de bruit et largeur du spectre; P. KRIDELKA, Régime transitoire des filtres électriques.
- Bulletin n° 4: P. WANG, L'isolation phonique fonctionnelle (2ème partie); J. DENDAL, Enregistrement continu et à distance, par liaison transistorisée U.H.F. de l'électrocardiogramme complet d'un sportif en plein effort; R. PIRLET, La normalisation de l'oreille artificielle; C. TAHIR, Mesure du coefficient d'absorption par ondes interrompues.
- Bulletin n° 5: J. DENDAL, Impulsion de Gauss et stéréophonie; M. PLUMIER, Etude du diagramme polaire de rayonnement d'un ensemble de sources ponctuelles.
- Bulletin n° 6: H.G. DIESTEL, Acoustical impedances of several artificial ears; R. PIRLET, Etude expérimentale de l'impédance acoustique de l'oreille humaine; PHYSICAL LAB. BELL TELEPHONE Mfg Cy, ANTWERP, Method of measuring acoustical impedance of human ears; J. DENDAL, Enregistrement continu et à distance par liaison transistorisée U.H.F. de l'électrocardiogramme complet d'un athlète en plein effort; P. WANG, L'isolation phonique fonctionnelle.
- Bulletin n° 7: R. LEHMANN, Contribution à l'étude du masquage de la parole; R. GAPSKI, Influence de la structure du plafond sur les propriétés acoustiques d'un local de petit volume.
- Bulletin n° 8: R. GAPSKI, Mesure de la relaxation des fils en acier à haute résistance par la méthode des vibrations propres; B. NAROLSKI, Bestimmung des Lautstärkepegels und der Lautheit des gesamten Geräusches von Transformatoren; D.E. COMMINS, L'oreille artificielle; C. PAPATHEODOROU, Etude expérimentale de l'impédance acoustique de l'oreille humaine.
- Bulletin n° 9: J. DENDAL, Analyse scientifique des travaux du 5ème Congrès International d'Acoustique; A. SOKOLU, Absolute measurement of total radiated power of ultrasonic transducers for biomedical use; J.L. GOLDSTEIN, Monaural perception of phase change in tone complexes; N. MORAY, Auditory experiments with multiple channel output; V.E. LJAMOV, I.M. SILVERSTROVA and W.I. UCHASTCIN, Investigations of the acoustoelectric effect in cadmium sulphide; E.L. SMITH, H.S. BOWMAN, P.G. WEISSLER and R.K. COOK, Bone-air cancellation; I.V. LEBEDEVA and V.S. NESTEROV, The behaviour of a mobile perforated screen under normal, oblique and random incidence of sound; H. ELVHAMMAR, Prediction of traffic noise close to a road.
- Bulletin n° 10: H. MICHEL et D. COMMINS, L'organisation du 5ème Congrès International d'Acoustique; H. DUDLEY, Speech analysis by waveform; E. VINOGRADOVA, Near field of linear point arrays; J.K. MANHART, An acoustical study of the kiwi B nuclear reactor; E. SHISHKOVA, Studies on biological noise of the black sea; P. SCHUBERT, Wahrnehmbarkeit von einzelrückwürfen bei musik; J. VAN BLADEL, The network formulation of acoustic problems; S. PRZYGORZEWSKI, Propagation et analyse spectrale du son tourbillonnaire