

par J.J. EMBRECHTS,  
Aspirant F.N.R.S.  
Université de Liège

- J. LECLERC  
1er Assistant - Acoustique Appliquée  
Université de Liège

## 1. Introduction

L'acousticien s'intéressant aux problèmes d'acoustique industrielle est essentiellement confronté au souci de prédéterminer l'ambiance sonore à l'intérieur des bâtiments ou sur le site où ils sont implantés. Les sources de bruit sont donc extrêmement variées, puisqu'elles vont de la machine outil au hall de fabrication dans son ensemble en passant par la multitude des sources de bruit industrielles et même les chantiers de construction.

Les prévisions doivent permettre d'identifier les zones critiques, intérieures ou extérieures, où les impositions légales en matière de lutte contre le bruit sont dépassées et d'examiner l'effet d'un ou plusieurs moyens de protection. Avec ces objectifs, les simulations d'un champ sonore constituent, en fait, un outil d'aide à la décision dans le cadre des mesures de prévention à l'égard du bruit.

La disponibilité de matériels informatiques puissants à faible coût a progressivement autorisé l'acousticien à prendre en compte la diversité des situations à modéliser et à concevoir des logiciels répondant aux critères de fiabilité, de rapidité et de souplesse indispensables en la matière.

Dans ce contexte, certaines méthodes se sont révélées particulièrement bien adaptées et efficaces ou, plus simplement, ont pu être exploitées pour exprimer un énorme potentiel intrinsèque. C'est le cas des techniques d'acoustique géométrique que nous rappellerons brièvement dans cet article.

## 2. Hypothèses générales

L'acoustique géométrique est basée sur la propagation rectiligne du son, tout comme l'optique géométrique à l'égard de la lumière.

Lorsqu'un rayon sonore  $r_i$  rencontre une paroi, il donne naissance à un rayon réfléchi  $r_r$  satisfaisant aux lois de la réflexion spéculaire (figure 2.1.), c'est-à-dire tel que

$$\theta_i = \theta_r$$

$r_r$  fait partie du plan défini par  $r_i$  et la normale à la paroi au point d'impact.

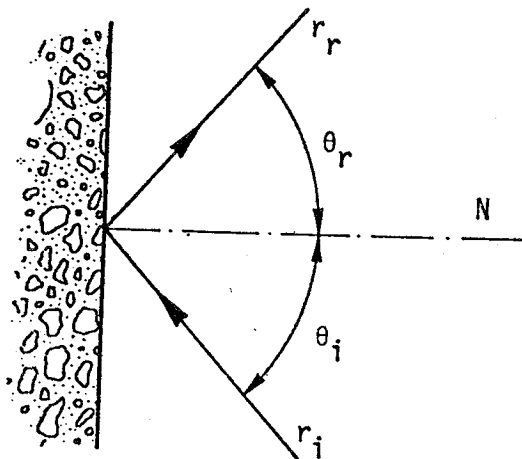


Figure 2.1.

La paroi est ainsi supposée parfaitement lisse, ce qui permet de négliger la diffusion. C'est dans le domaine fréquentiel où les longueurs d'onde deviennent comparables aux dimensions des particules constitutives des matériaux que ce phénomène de diffusion acquiert une importance croissante, ce qui introduit une fréquence limite supérieure à l'application de l'acoustique géométrique.

D'autre part, les longueurs d'onde sont supposées suffisamment petites par rapport aux dimensions de l'espace dans lequel a lieu la propagation sonore. Les corrections dues à la nature ondulatoire du son (diffraction et interférences principalement) sont ainsi évitées.

La simple combinaison énergétique des niveaux, qui néglige la phase des signaux, est donc permise. Cette hypothèse impose une fréquence limite du côté bas du spectre.

Pratiquement, la plus petite dimension de l'espace étudié devra être supérieure au double de la longueur d'onde.

Enfin, l'acoustique géométrique suppose que le milieu ambiant (l'air) est immobile et homogène, ce qui correspond à l'hypothèse classique d'acoustique linéaire.

L'acoustique géométrique peut être mise en oeuvre par deux procédés conceptuels distincts, à savoir les sources images et le tir de rayons. Nous analyserons ces deux méthodes pour en comparer les avantages et les inconvénients.

### 3. La méthode des sources images

#### 3.1. Généralités

La transmission d'énergie entre une source sonore  $S$ , supposée ponctuelle et omnidirectionnelle, et un récepteur  $R$  ponctuel peut emprunter le chemin direct  $D$  ou des chemins de réflexion dont certains sont représentés à la figure 3.1.

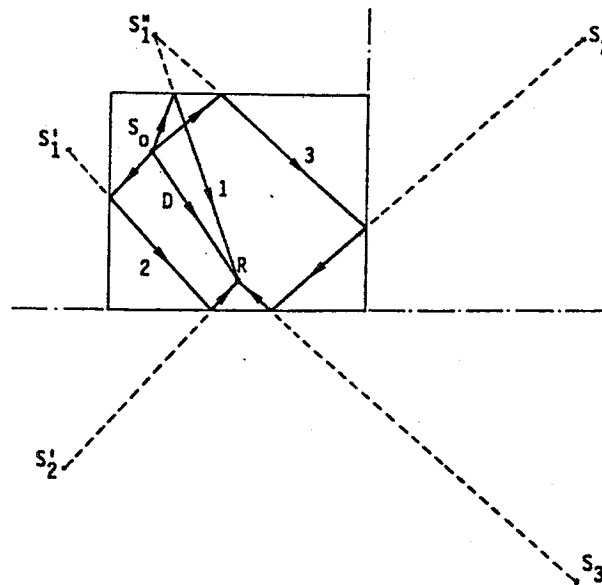


Figure 3.1.

Cette figure illustre, en deux dimensions, le principe de la méthode des sources images. Tout se passe comme si le rayon 3, par exemple, provenait de la source  $S_3$ . Chaque source-image est donc l'image de la source ou d'une autre source-image par rapport aux parois du local. L'échaffaudage progressif des sources d'ordre  $n$  ( $n = 1, 2, \dots, \infty$ ) permet de construire le trajet des rayons sonores parvenant en  $R$  après avoir subi  $n$  réflexions.

Pujolle a établi que dans le cas d'un local parallélépipédique, le nombre de sources images d'ordre  $n$  est égal à  $(4n^2 + 2)$ .



### 3.2. Evaluation des niveaux sonores intérieurs

En supposant une propagation sphérique des rayons sonores (et en négligeant la phase en accord avec l'une des hypothèses générales), la pression résultante en R est obtenue en sommant énergétiquement les contributions des différentes sources images par l'expression :

$$p_{\text{eff}}^2(R) = \frac{W}{4\pi D^2} \exp(-mD) \rho c + \sum_{\substack{\text{sources} \\ \text{images}}} \frac{W_i}{4\pi r_i^2} \rho c \quad (3.1.)$$

où :

- W est la puissance de S;
- D est la distance séparant la source du récepteur;
- $\rho c$  est l'impédance caractéristique du milieu ambiant;
- $r_i$  est la distance séparant la source image i du récepteur;
- $W_i$  est la puissance apparente de la source image i;
- m est le coefficient d'atténuation par l'air.

La puissance  $W_i$  est calculée à partir de la puissance de S, des coefficients d'absorption des parois frappées par le rayon et du facteur d'atténuation par l'air résultant du trajet parcouru.

Ainsi, à la figure 3.3., la puissance de la source  $S_5$  est donnée par :

$$W_5 = W(1 - \alpha_1) (1 - \alpha_2)^2 (1 - \alpha_3) (1 - \alpha_4) \exp(-mr_5)$$

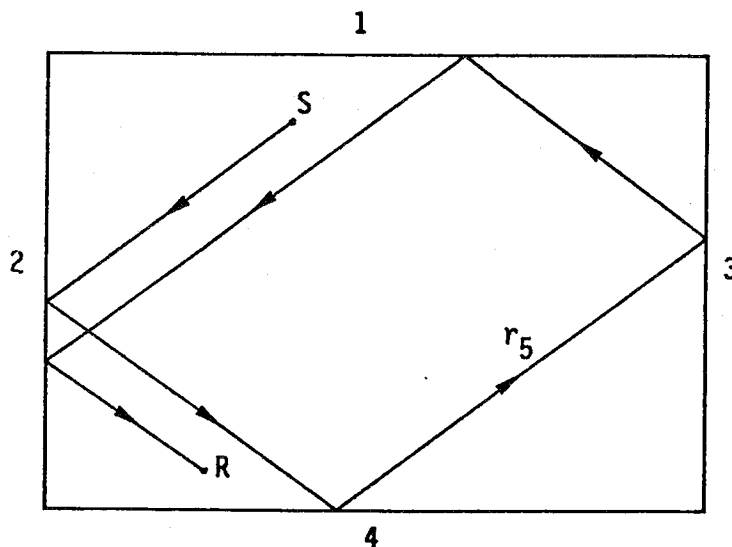


Figure 3.3.

Appliquée à des locaux habituels, c'est-à-dire peu absorbants, la méthode des sources images conduit à envisager un nombre impressionnant de rayons et d'impacts sur les parois. Le tableau 3.I. illustre cette remarque par quelques exemples numériques en supposant que l'évaluation du champ sonore prend en compte les sources images jusqu'à l'ordre N.

N	Nombre de sources images	Nombre d'impacts
10	1560	3025
20	11520	44100
50	171800	1625625

Tableau 3.I.

Dans le but d'alléger la charge de calcul et d'effectuer un parallèle avec les théories classiques, plusieurs auteurs ont imaginé de considérer un libre parcours moyen propre à l'acoustique géométrique. A l'origine défini comme la distance moyenne parcourue par les rayons sonores entre deux réflexions, autrement dit comme une grandeur uniquement géométrique, le libre parcours moyen s'est tantôt vu particularisé à chaque ordre de réflexion et tantôt vu généralisé à une interprétation énergétique. Cette dernière démarche semble intéressante lorsqu'il s'agit d'évaluer le champ sonore dans les espaces clos ou semi-clos (tunnels) parallélépipédiques. L'individualisation des sources images accompagnée d'une recherche du plus proche voisin reste, quant à elle, un outil efficace pour la description de certains phénomènes stationnaires (modes propres, par exemple) et de la plupart des phénomènes transitoires.

### 3.3. Calcul de l'échogramme et du temps de réverbération

De tous les phénomènes transitoires, l'échogramme est certes le plus fondamental puisqu'il constitue la base de la connaissance de tout système linéaire.

Supposons qu'une source émette une impulsion à l'instant  $t = 0$ . La méthode décrite ici offre la possibilité de représenter, sur un graphique donnant l'intensité en fonction du temps, l'apport de l'onde directe et des ondes réfléchies provenant de chaque source image (figure 3.4.).

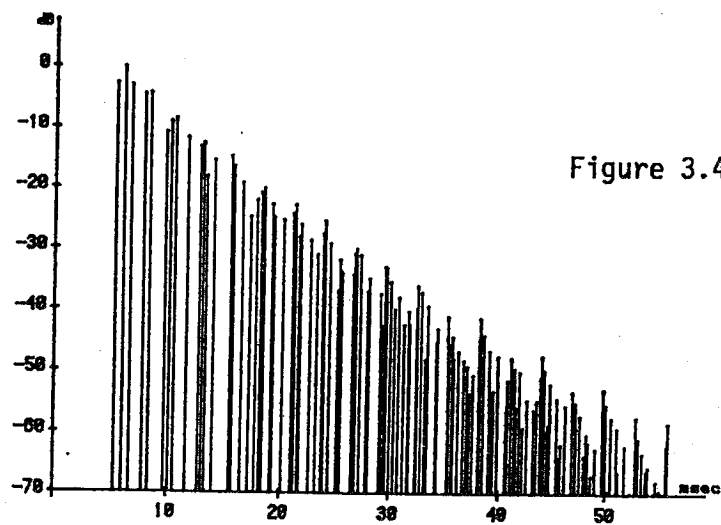


Figure 3.4.

Ce type de graphique permet d'estimer le temps de réverbération impulsionnel et de tracer un échogramme, en remplaçant chaque trait d'intensité par une impulsion théorique modélisant le bruit bref réellement utilisé (Figure 3.5.).

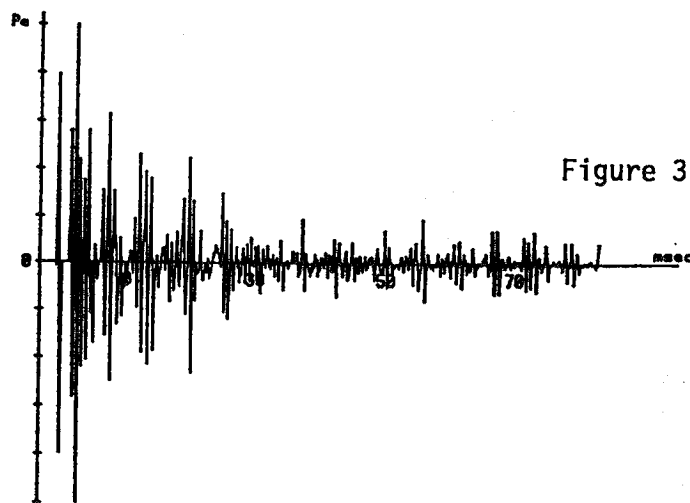


Figure 3.5.

D'autre part, le temps de réverbération en bruit interrompu peut également être déterminé par linéarisation d'un diagramme en escalier où chaque chute de niveau discrète identifie l'extinction d'une ou plusieurs sources images équidistantes du récepteur (figure 3.6.).

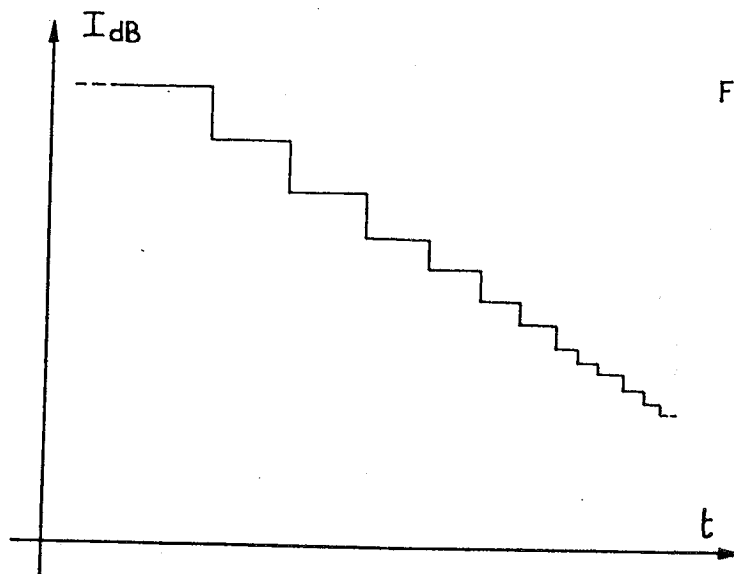


Figure 3.6.

### 3.4. Evaluation des niveaux sonores extérieurs.

La technique des sources images n'est évidemment pas limitée aux espaces clos. Son application à la propagation en site extérieur intervient notamment dans l'étude de la directivité de sources ponctuelles localisées au voisinage d'un plan (partiellement) réfléchissant ou dans la modélisation de certains effets d'interférences.

Son intérêt en acoustique industrielle réside dans la possibilité qu'elle offre de prendre en compte la diffraction par les écrans, même si ceux-ci sont situés sur des zones réfléchissantes. Dans ce cas, on peut en effet faire intervenir une source image et un récepteur image, ce qui conduit au calcul de trois atténuations distinctes (figure 3.7.).

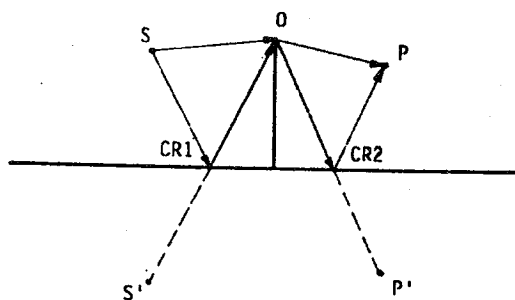


Figure 3.7.

En poussant plus loin la généralisation, on va même jusqu'à construire un espace image lorsque des écrans réfléchissants sont présents sur le site.



## 4. La technique des rayons sonores

### 4.1. Présentation de la technique des rayons

Comme la méthode des sources images, la méthode dite "des rayons sonores" est une discipline dérivée de l'acoustique géométrique. On y suppose la propagation rectiligne de l'énergie sonore, sous la forme de rayons émis à partir de la source. Un rayon sonore peut donc être défini comme étant un pinceau infiniment fin d'énergie émise par la source sonore dans une direction déterminée (figure 4.1.).

Lorsqu'un rayon sonore rencontre un obstacle, il y est réfléchi de manière spéculaire en perdant un pourcentage d'énergie correspondant au coefficient d'absorption de cet obstacle. Il en perd également par son passage dans le milieu aérien, au prorata de la longueur parcourue : l'absorption de l'air s'exprime en dB/100m.

Il s'agit donc, à partir d'une source sonore, de tirer plusieurs rayons et de simuler mathématiquement leur parcours dans l'espace (extérieur ou intérieur) sur base des coordonnées de ce dernier (figure 4.2) 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. Le rayon est ensuite prolongé, réfléchi ou arrêté suivant la nature du récepteur.

Dans la méthode des rayons sonores, le récepteur ne peut être ponctuel. En effet, que le tir soit déterministe<sup>1</sup> ou aléatoire<sup>2,3</sup>, la probabilité d'atteindre un point donné de l'espace est nulle. Il faudrait théoriquement tirer un nombre infini de rayons sonores pour obtenir une information au récepteur ponctuel. On choisit alors de définir des récepteurs à deux dimensions (surfaciques<sup>2,3,4</sup>) ou à trois dimensions (volumiques<sup>5,6</sup>). L'importance en surface (m<sup>2</sup>) ou en volume (m<sup>3</sup>) déterminera bien entendu le caractère local des pressions sonores enregistrées.

### 4.2. Grandeurs acoustiques évaluées par un tir de rayons

L'évaluation des paramètres du champ sonore au récepteur passe par le moyennage statistique des contributions de chaque rayon atteignant ce dernier. Ainsi, on montre<sup>2,3</sup> dans le cas d'un récepteur surfacique que la valeur efficace de la pression sonore moyenne au récepteur centré au point R est :

$$\overline{p_{\text{eff}}^2(R)} = \frac{\rho_0 c}{S} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi} \left[ \sum_{r=1}^{\infty} \delta_r(\theta, \phi) \frac{a_r(\theta, \phi)}{c_r(\theta, \phi)} \right] I(\theta, \phi) \sin \theta \, d\theta \quad (4.1.)$$

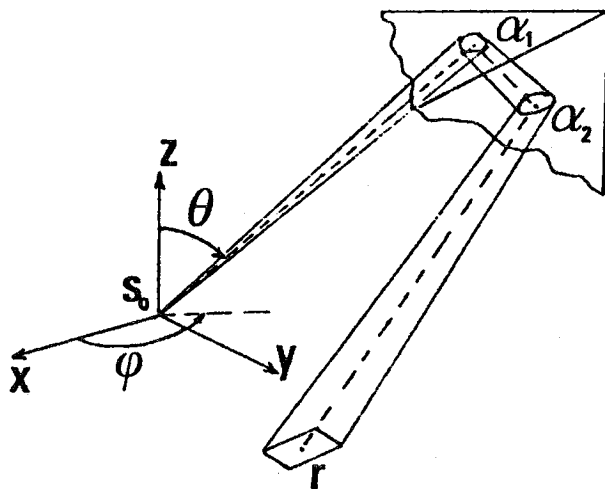


Figure 4.1 : Définition du rayon sonore et des angles  $\theta$  et  $\varphi$  d'émission à partir de la source sonore  $S_0$ .

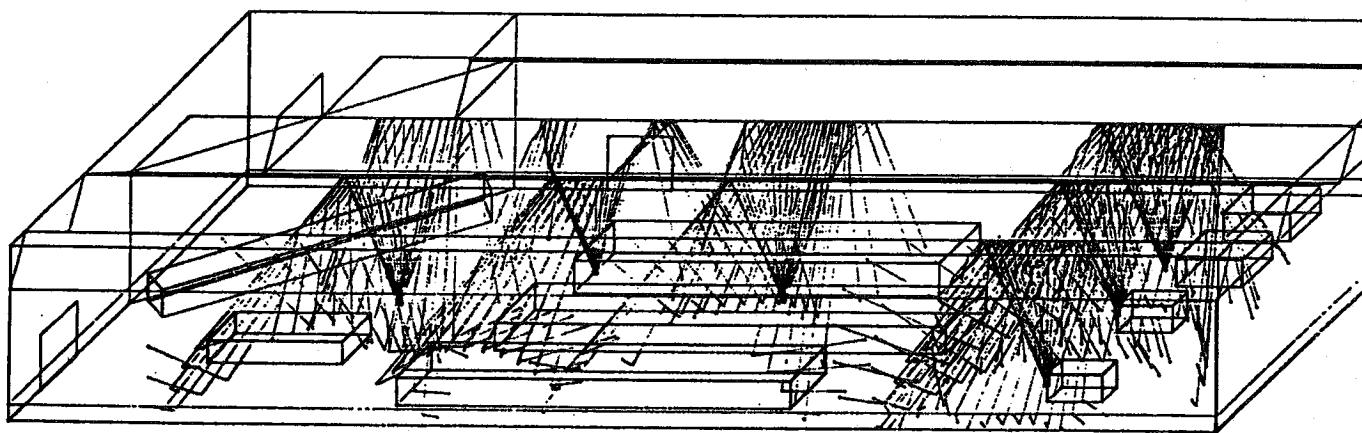


Figure 4.2 : Tir de rayons sonores à partir de six sources dans un hall industriel . Les rayons subissent trois réflexions.

Dans cette expression, nous reconnaissons les symboles suivants :

$\rho_0$  : la densité de l'air ( $\text{Kg/m}^3$ )

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

$S$  : l'aire du récepteur ( $\text{m}^2$ )

$\theta, \phi$  : les angles d'émission à partir de la source (figure 4.1.)

$\Sigma_r$  : la contribution de tous les ordres de réflexion du rayon émis dans la direction  $(\theta, \phi)$

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

$a_r(\theta, \phi)$  : le "facteur d'affaiblissement"<sup>9</sup> de l'intensité à l'ordre de réflexion n<sup>o</sup>r

$c_r(\theta, \phi)$  : la valeur absolue du cosinus de l'angle d'incidence du rayon sur la surface réceptrice à l'ordre de réflexion n<sup>o</sup>r

$\delta_r(\theta, \phi)$  : 0 sauf si le rayon  $(\theta, \phi)$  atteint le récepteur à la r<sup>i</sup>ème réflexion ( $\delta_r = 1$ ).

L'équation (4.1) peut être considérée comme la moyenne statistique d'une fonction de la variable aléatoire  $(\theta, \phi)$ . Elle est pratiquement estimée par la moyenne d'un échantillon de  $N$  rayons  $(\theta_k, \phi_k)$  émis à partir de la source :

$$\overline{p_{\text{eff}}^2(R)} \simeq \frac{4\pi\rho_0 c}{NS} \sum_{k=1}^N \sum_{r=1}^{\infty} \frac{a_{rk}}{c_{rk}} \delta_{rk} I_k \quad (4.2.)$$

La fonction densité de probabilité gérant le tirage étant :

$$g(\theta, \phi) = \frac{\sin \theta}{4\pi} \quad (4.3.)$$

L'expression (4.2) illustre donc la manière de traiter les résultats enregistrés lors du passage des rayons au récepteur afin d'en déduire un estimateur sans biais du carré de la pression efficace. L'équation (4.2) 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. De même, la contribution de plusieurs sources sonores s'évalue par la répétition de cette procédure et le cumul des résultats.

La pression sonore est le paramètre utilisé le plus fréquemment en ambiance industrielle mais d'autres grandeurs se prêtent également à une estimation par le tir aléatoire de rayons. Ainsi, le temps de réverbération résulte de l'analyse de la décroissance temporelle des niveaux sonores après arrêt de la source en  $t=0$ .

Le niveau résiduel à l'instant  $t$  se calcule par l'équation (4.2) en limitant la somme aux rayons de longueur supérieure à  $(ct)$ . L'échogramme au récepteur s'obtient par le même principe<sup>2,3</sup>.

L'évaluation de ces grandeurs temporelles pose cependant des problèmes spécifiques liés à la discrétisation de la variable temporelle. Si l'intervalle de base (secondes) est trop long, la décroissance initiale du niveau sonore (early decay time) est mal représentée. S'il est trop court, trop peu de rayons parviennent au récepteur dans cet intervalle et des erreurs statistiques sont introduites. Un compromis doit donc être trouvé : il s'agit en général de l'évaluation du "early decay time" en lieu et place du temps de réverbération ou de la définition d'intervalles de temps variables.

En ce qui concerne l'échogramme qui demande une discrétisation particulièrement fine du temps, on se tournera alors plutôt vers des méthodes de tir déterministes où chaque rayon est représentatif d'un angle solide de forme pyramidale ou conique.

#### 4.3. Précision des méthodes de tir aléatoire

On distinguera dans ce paragraphe trois sources d'erreur. La première d'entre elles a trait aux hypothèses de l'acoustique géométrique et à la modélisation du site traité. On sait que si elle ne fait pas recours à des techniques spéciales, la méthode des rayons sonores ne peut tenir compte aux basses fréquences, des phénomènes ondulatoires (diffraction, modes propres) et, à haute fréquence, de la réflexion diffuse. Dans la gamme moyenne des fréquences audibles, ces phénomènes sont cependant très localisés ou interviennent d'autant moins, en ambiance industrielle, que l'on travaille en décibels A.

Les erreurs de cette première catégorie sont difficilement exprimables en décibels et essentiellement locales : aux endroits où la modélisation est la moins soignée, près des écrans (diffraction), le long des parois (diffusion)... La comparaison de résultats de mesures et de calculs effectués dans un même site montrent<sup>2,3</sup> des erreurs globales ne dépassant pas 1 à 2 dB et des erreurs plus localisées parfois supérieures à 3 dB, selon le soin porté à la modélisation de l'espace (figure 4.3.).

Les deux catégories d'erreur suivantes sont beaucoup mieux maîtrisées par l'opérateur. Elles peuvent être ramenées dans des proportions négligeables... à condition d'y mettre le prix.

La seconde catégorie conduit à une erreur systématique (par défaut) sur le niveau sonore en dB. Il s'agit (figure 4.4) d'une conséquence de l'arrêt des rayons lorsque leur intensité est réduite à  $M\%$  ou lorsque la longueur parcourue dépasse  $L$  mètres.

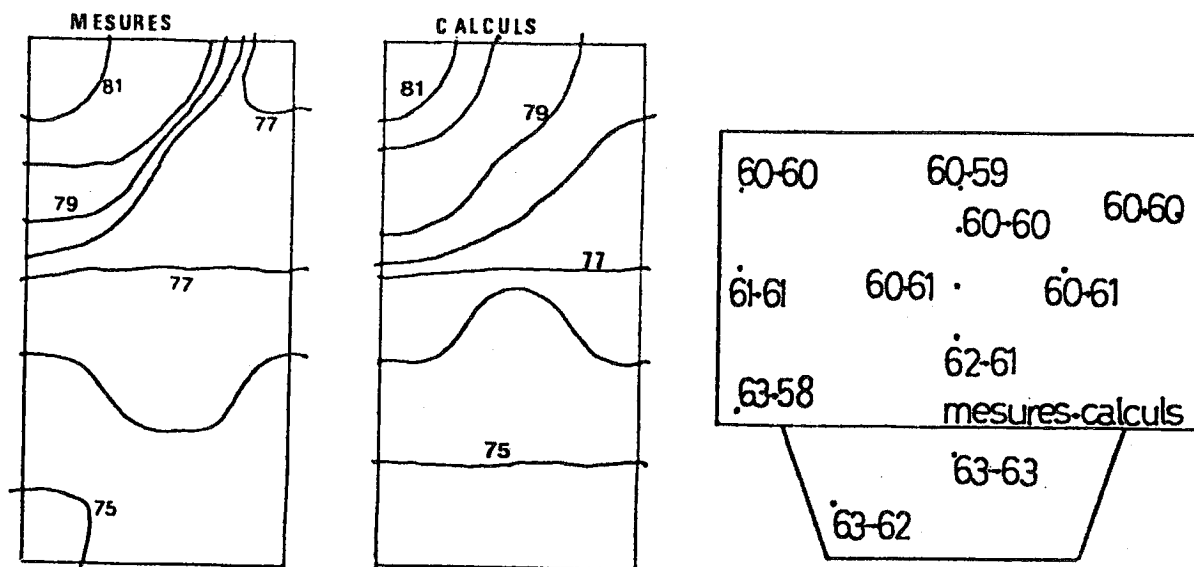


Figure 4.3 : Comparaison de niveaux de pression (dB) mesurés et calculés par une méthode de tir aléatoire dans une situation équivalente ( cfr réf.2 ) .

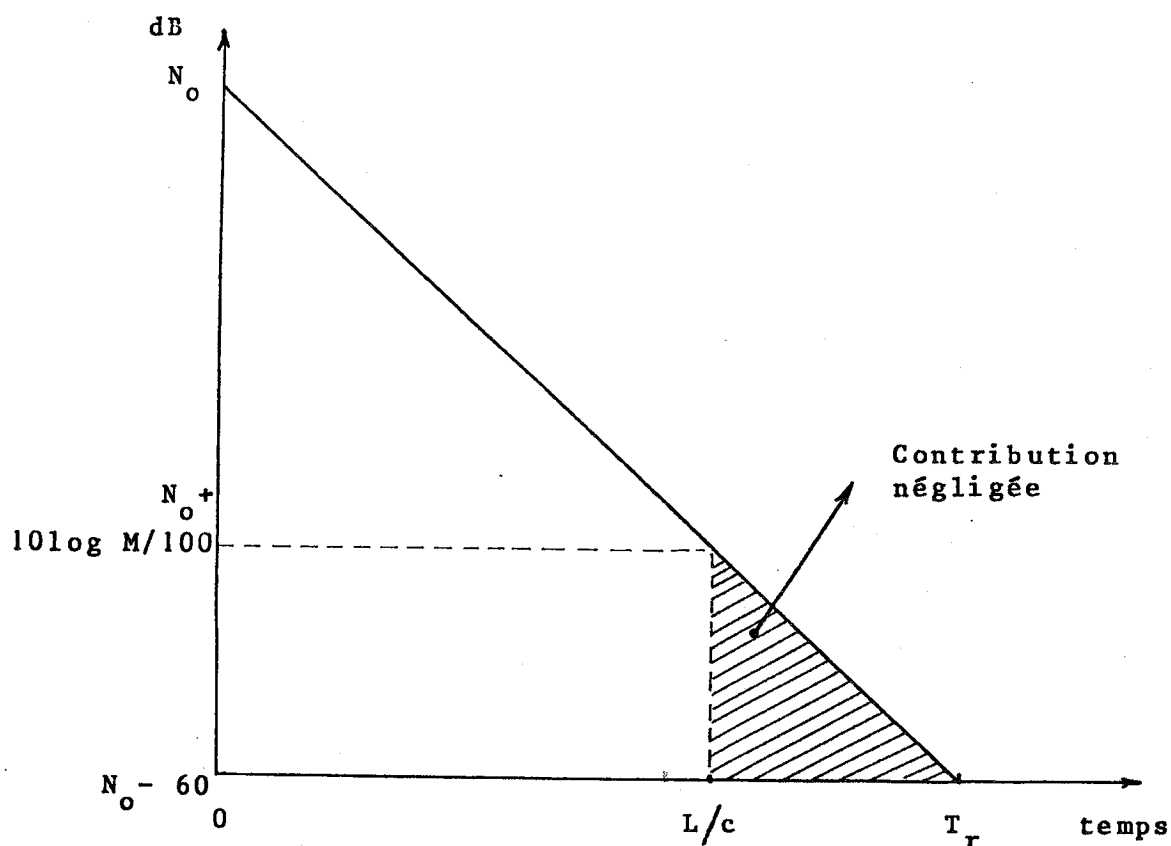


Figure 4.4 : Illustration de l'erreur systématique lors d'un calcul de pression sonore à partir du diagramme de décroissance temporelle du niveau (dB) après arrêt de la source .

En supposant un diagramme de décroissance linéaire du niveau après arrêt de la source en  $t = 0$ , cette erreur systématique (dB) est bien estimée par :

$$- 10 \log \left( 1 - 10^{\frac{-6L}{cT_r}} \right) \quad (4.4a)$$

où  $T_r$  (sec) est le temps de réverbération. Si, de plus, on raisonne sur une décroissance moyenne du facteur d'affaiblissement en fonction de la longueur parcourue, on obtient l'ordre de grandeur suivant :

$$10 \log \left( \frac{100}{100 - M} \right) \quad (4.4b)$$

Pour  $M = 10 \%$  (ou  $L = C * T_r/6$ ), l'erreur systématique est de 0.46 dB.

Pour  $M = 1 \%$  (ou  $L = C * T_r/3$ ), elle n'est plus que de 0.04 dB.

La troisième catégorie d'erreur, enfin, est de type statistique. L'expression (4.2) résultant d'un échantillonnage statistique, un estimateur de la variance de  $\overline{p_{eff}^2(R)}$  peut être calculé<sup>2,3</sup> et présenté à l'opérateur comme diagnostic du tir aléatoire.

L'erreur statistique est inversement proportionnelle à  $\sqrt{NS}$ . Pour la diminuer de moitié, on a donc le choix entre quadrupler le nombre  $N$  de rayons (et donc le temps de calcul) ou quadrupler la surface des récepteurs et sacrifier un peu du caractère local des résultats.

L'expérience montre<sup>2,3</sup> que l'erreur statistique sur le niveau sonore peut être ramenée en-dessous du décibel pour un temps de calcul raisonnable. Les techniques numériques de Monte Carlo peuvent être ici appliquées pour essayer d'obtenir le meilleur rapport précision obtenue / temps de calcul.

#### 4.4. Applications de la méthode

Initialement appliquée à l'acoustique des salles et au calcul des échogrammes<sup>8,9,10</sup> la technique des rayons sonores tirés de manière aléatoire s'applique actuellement de manière efficace au traitement des problèmes de bruit en milieu industriel.

Ainsi qu'il a été mentionné précédemment, elle se prête particulièrement bien au calcul de la pression sonore en un ou même plusieurs récepteurs. Par son essence même, la technique ne demande pas tellement moins de travail pour un récepteur que pour plusieurs. La présentation des résultats sous la forme de cartes de bruit (fig. 4.5) offre une vue d'ensemble très descriptive du champ sonore et un moyen de dialogue très apprécié entre le demandeur d'un projet et ses exécutants".

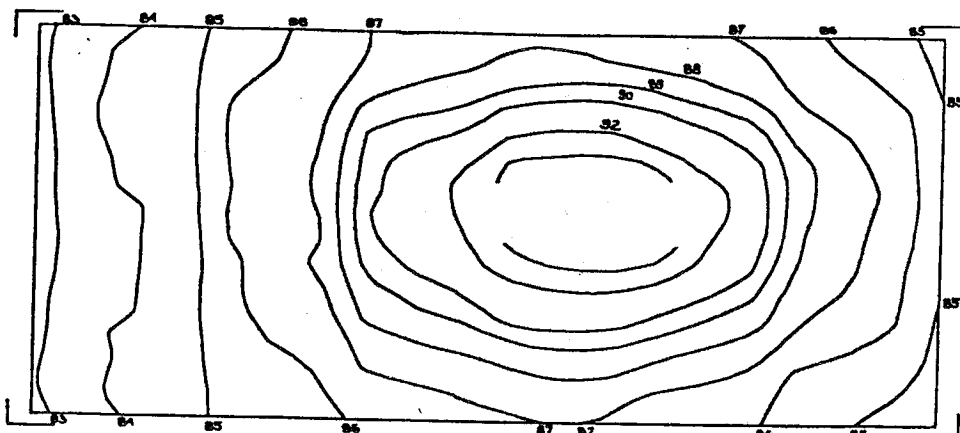


Figure 4.5 : Exemple de carte de bruit calculée dans un hall de recuit continu : les isobares sont concentriques autour du four .

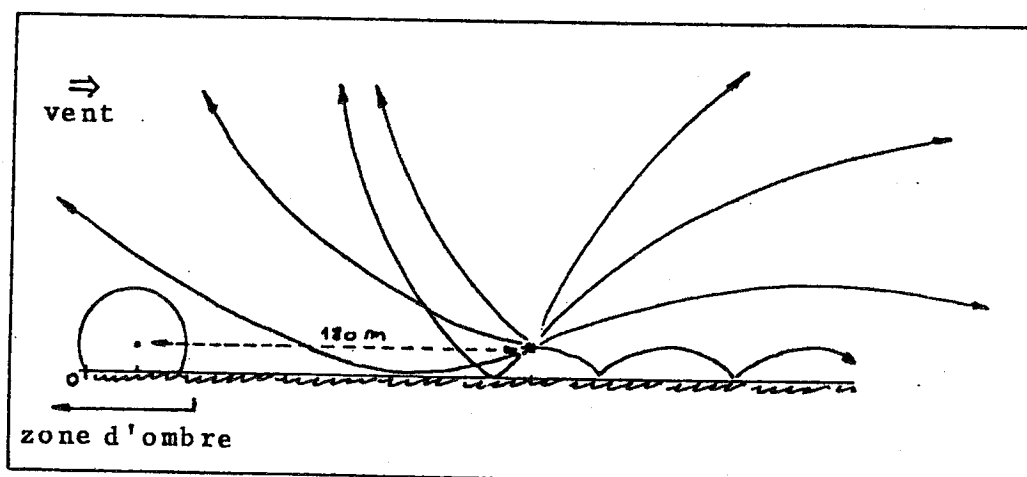


Figure 4.6 : Influence du vent sur la propagation des rayons sonores ( cfr réf. 6 ) .

Il en est de même pour les problèmes d'acoustique de l'environnement, en particulier pour les études d'impact d'un complexe industriel sur le champ sonore aux alentours. Ici se pose tout d'abord le problème de la simulation de la source<sup>5</sup> qui, en général, n'est pas ponctuelle. La propagation est également plus difficile à maîtriser en milieu extérieur : on devra tenir compte des gradients de vent et de température<sup>6</sup> (fig. 4.6.).

Un phénomène intervient enfin de manière plus systématique : il s'agit de la diffraction et, plus particulièrement, de l'effet d'écrans. Certaines techniques spéciales<sup>5</sup> permettent, dans certains cas, d'en tenir compte.

Quel que soit le site étudié, milieu extérieur ou intérieur, la technique des rayons permet de respecter au mieux sa géométrie réelle, non seulement par des éléments plans mais aussi, parfois, par des surfaces non planes<sup>5 1.0</sup>. A ce point de vue, elle présente un net avantage sur la méthode des sources images et elle constitue, actuellement, un des outils de simulation les plus performants permettant d'étudier la répartition du champ sonore dans un espace donné.

#### 5. Comparaison des techniques de rayons et de sources images

La différence fondamentale entre les deux méthodes est que l'une se place du côté du récepteur (sources images) et l'autre du côté de la source (rayons). D'une part, il s'agit de chercher les chemins exacts le long desquels l'énergie sonore peut se propager pour atteindre le récepteur. D'autre part, il s'agit d'étudier comment l'énergie sonore émise par la source se répartit entre les différents récepteurs.

La technique des sources images se prête donc plus naturellement à des problèmes ponctuels : niveau de pression en un point, échogramme en un point. . . Le temps de calcul augmente avec le nombre de récepteurs choisis. Par contre, avec la technique des rayons sonores, les grandeurs acoustiques évaluées sont moyennées dans l'espace (sur une surface ou un volume récepteurs). La répartition du champ sonore en plusieurs endroits de l'espace est obtenue pratiquement dans le même temps qu'une valeur ponctuelle.

La technique des sources images est bien adaptée aux espaces de géométrie simple, là où la construction même des sources images est accélérée par la symétrie du problème. La technique des rayons trouve son intérêt dans les espaces à géométrie complexe. En effet, lorsque le nombre de parois et d'obstacles augmente, la recherche des sources images devient fastidieuse, d'autant plus qu'une phase de vérification doit confirmer si chaque source image est bien "vue" du récepteur. La technique des rayons sonores s'applique également dans les espaces où existent des surfaces non planes, cas où le concept de source image n'existe pas.



En ce qui concerne la précision des deux méthodes de calcul, il existe, dans les deux cas, une erreur systématique due à l'arrêt du processus lorsque l'énergie de la source image ou du rayon est négligeable ou lorsque la distance au récepteur est supérieure à une valeur seuil. Le choix de ce seuil est particulièrement important dans la méthode des sources images car le temps de calcul augmente de manière exponentielle avec l'ordre maximal des sources images. Dans la méthode des rayons sonores, ce temps est quasi proportionnel à la longueur des rayons. Le tribut à payer pour cet avantage est l'existence d'une erreur statistique.

Signalons enfin que le concept des sources images permet de modéliser l'effet d'écran par application de l'abaque de Maekawa. Par contre, la technique des rayons sonores se prête mieux à la modélisation de la diffusion, des gradients de vent et de température, de la dépendance de l'absorption en fonction de l'angle d'incidence et de la directionnalité des sources.

## REFERENCES

---

### I. Sources images

1. ALLEN, J.B. et BERKLEY, D.A., Image method for efficiently simulating small-room acoustics., *Jrnl. of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, N°4, 1979, pp 943-950.
2. BARRON, M., Growth and decay of sound intensity in rooms according to some formulae of geometric acoustics theory., *Jrnl. of Sound and Vibration*, Vol. 27, N°2, 1973, pp 183-196.
3. BULLEN, R. et FRICKE, F., Time distribution of impulse noise in an enclosure., *Jrnl. of Sound and Vibration*, Vol. 80, N°1, 1982, pp 25-30.
4. GIBBS, B.M. et JONES, D.K., A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure., *Acustica*, Vol. 26, 1972, pp 24-32.
5. GOMPERTS, M.C., Do the classical reverberation formulae still have a right for existence ?, *Acustica*, Vol. 16, 1965-66, p 255.
6. HIRATA, Y., Geometrical acoustics for rectangular rooms., *Acustica*, Vol. 43, 1979, pp 247-252.
7. JOYCE, W.B., Power series for the reverberation time., *Jrnl. of the Acoustical Society of America*, Vol. 67, N°2, 1980, pp 564-571.
8. JURICIC, H. et SANTON, F., Images et rayons sonores dans le calcul numérique des échogrammes, *Acustica*, Vol. 28, N°2, 1973, pp 77-89.
9. KUTTRUFF, H., *Room Acoustics.*, London, Applied Science Publishers, 1973.
10. LECLERC, J., *Prévision du temps de réverbération dans les grands espaces.*, Université de Liège, Travail de fin d'études, 1978.
11. PUJOLLE, J., Nouveau point de vue sur l'acoustique des salles., *Revue d'Acoustique*, N°18, 1972, pp 21-25.
12. PUJOLLE, J., Nouvelle théorie de la réverbération des salles., *Revue d'Acoustique*, N°27, 1973, pp 263-267.
13. PUJOLLE, J., Les différentes définitions du libre parcours moyen du son dans une salle., *Revue d'Acoustique*, N°36, 1976, pp 44-50.

14. SANTON, F., Traitement acoustique de trois salles à partir d'une méthode de rayons., *Acustica*, N°44, 1980, pp 46-50.
15. SANTON, F., Numerical prediction of echograms and of the intelligibility of speech in rooms., *Jrnl. of the Acoustical Society of America*, Vol. 59, N°6, 1976, pp 1399-1405.
16. WAYMAN, J.L., et VANYO, J.P., Three-dimensional computer simulation of reverberation in an enclosure., *Jrnl. of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, N°1, 1977, pp 213-215.

## II. Tir des rayons

1. SCHROEDER, M.R., Digital simulation of sound transmission in reverberant spaces, *Jrnl. of the Acoustical Society of America*, Vol. 47, N°2 (Part I), 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., Préviation 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., 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. et VAN MAERCKE, D., Numerieke methoden voor het voorspellen van reflektogrammen, Nederlands Akoestisch Genootschap, 1983.
8. KROKSTAD, A., STRØM, S., et 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.