

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



171

NICE du 16 au 20 MAI 1983

---

Correction de la mesure du niveau de bruit  
d'une source en mouvement à proximité d'un dioptré

B. RAFINE - J.L LAMBLA

DCAN TOULON/GERDSM LE BRUSC 83 140 SIX-FOURS LES PLAGES

---

## RESUME

On propose dans cet article une méthode de mesure simple du niveau de bruit rayonné par une source en mouvement rectiligne uniforme. La méthode prend en compte la cinématique de la source, un modèle de propagation sphérique et la présence éventuelle d'un dioptré plan. Des comparaisons numériques de différentes variantes permettent de choisir la plus adaptée aux ordres de grandeurs considérés. Ce genre de méthode peut s'étendre à d'autres cas de propagation ou de cinématique.

## SUMMARY

The object is the measurement of a radiated noise level of a sound source. The source is moving with a uniform rectilinear motion near a plane reflecting surface. The measurement is performed with a fixed sensor located at a given distance from the surface.

The method takes into account omnidirectional source and receiver models, source motion and reflexion from the dioptré. Numerical comparisons are used to make a choice between several approximations of the method.



Correction de la mesure du niveau de bruit  
d'une source en mouvement à proximité d'un dioptré

### 1 - Introduction

Le but de cette présentation est de donner une méthode simple de mesure de bruit rayonné par une source en mouvement. La méthode est adaptée à un mouvement rectiligne uniforme et à un modèle de propagation sphérique, avec ou sans réflexion sur un dioptré plan, mais elle peut être étendue facilement à d'autres hypothèses.

### 2 - Données du problème

La géométrie de la mesure est représentée figure 1. La source A est animée d'un mouvement rectiligne uniforme horizontal à une distance  $h_A$  d'un dioptré plan horizontal de coefficient de réflexion complexe  $\alpha$ . La mesure est faite par un capteur B, fixe, à une distance  $h_B$  du dioptré et du même côté de celui-ci que A. La vitesse de A, noté  $v$ , est supposée petite devant la célérité  $c$  du son ( $M = \frac{v}{c} \ll 1$ ). La distance minimum entre la trajectoire de A et B est notée  $D$ .

Le milieu est supposé homogène isotrope avec une propagation sphérique et sans absorption.

La source A et le capteur B sont supposés omnidirectionnels dans l'espace.

A émet un signal  $E(t)$ , de densité spectrale de puissance  $N_E(f)$  ;

B fournit le signal  $X(t) = S(t) + B(t)$ , ou  $S(t)$  est dû à  $E(t)$  et  $B(t)$  est un bruit stationnaire de densité spectrale  $N_B(f)$  et indépendant de  $E(t)$ .

### 3 - Problème posé et principe de méthode

#### 3.1 - Appareillage et problème posé

On dispose d'un analyseur de spectre-intégrateur branché sur la sortie  $X(t)$  du capteur B.

Avant le passage de A, cet appareil fournit une estimée  $\hat{N}_B(f)$  de  $N_B(f)$ .

Pendant le passage de A, et sur l'intervalle de temps  $[T_1, T_2]$ , l'analyseur-intégrateur donne une mesure  $\hat{N}_X(f)$  (mesure moyennée sur la durée  $T_1, T_2$ .)

Le problème posé est d'estimer de façon simple la densité spectrale  $N_E(f)$  à partir de  $\hat{N}_X(f)$  et de  $\hat{N}_B(f)$ .

#### 3.2 - Cas de la source fixe

Si la source A est fixe, à une distance  $R_0$  de B, la quantité :

$$\hat{N}_S(f) = \hat{N}_X(f) - \hat{N}_B(f)$$

pourra être utilisée comme estimateur de la densité spectrale  $N_S(f)$  de  $S(t)$ .

On aura alors l'estimateur de  $N_E(f)$  suivant :

$$\hat{N}_E^o(f) = \frac{\hat{N}_S(f)}{Q_0(R_0, f)}$$

où  $Q_0(R_0, f)$  est la perte énergétique entre A et B à la fréquence  $f$  ;  $Q_0$  ne dépend que du modèle de propagation utilisé.

#### 3.3 - Cas de la source mobile

a) Si l'on considère que sur la durée d'analyse  $[T_1, T_2]$ , la distance AB n'a pas beaucoup variée, on peut utiliser l'estimateur  $\hat{N}_E^o$  avec une valeur  $R_0$  moyenne. Cette méthode est, bien entendu, la plus simple ; mais il est évident qu'elle donne de mauvais résultats lorsque la distance AB varie beaucoup pendant  $[T_1, T_2]$ .

b) Dans ce dernier cas, on va chercher des estimateurs simples sous la forme :

$$\hat{N}_E(f) = \frac{\hat{N}_S(f)}{Q(f, T_1, T_2)}$$

où  $Q(f, T_1, T_2)$  tient compte de la propagation acoustique et de la cinématique de A pendant l'intervalle  $[T_1, T_2]$ . Cette cinématique sera supposée parfaitement connue.

c) L'analyseur de spectre calcule une estimée de la densité spectrale de  $X(t)$  tous les  $\Delta t = \frac{T}{m}$ , avec  $T = T_2 - T_1$ .

soit  $\hat{N}_X(f, i)$  l'estimée sur la durée  $[t_i, t_{i+1}]$ , avec  $t_i = T_1 + i \Delta t$ ,  $i = 0, m$

Après intégration on a :

$$\hat{N}_X(f) = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} \hat{N}_X(f, i)$$

d) Remarques :

-On suppose que sur chacun des intervalles élémentaires d'analyse  $[t_i, t_{i+1}]$ , le signal  $S(t)$  est stationnaire.

-La forme générale de l'estimateur  $\hat{N}_E(f)$  implique que l'on néglige l'effet doppler ; plus exactement on suppose que l'excursion doppler maximum  $\delta f$  d'une raie spectrale ne dépasse pas la largeur  $\Delta f$  des canaux d'analyse spectrale, c'est-à-dire  $\delta f \leq \Delta f$

$$\text{avec } f = F_{\max} \times \frac{2v}{c} \left| \cos \theta(T_2) - \cos \theta(T_1) \right|$$

où  $F_{\max}$  est la fréquence maximum d'analyse, et

$\theta(t)$  l'angle entre la vitesse  $\vec{v}$  de A et le vecteur  $\vec{AB}$  à l'instant  $t$ ,  
et  $\Delta f = \frac{1}{\Delta t} = \frac{m}{T}$

d'où la contrainte :

$$2 F_{\max} v T \left| \cos \theta(T_2) - \cos \theta(T_1) \right| \leq m c.$$

#### 4 - Cas du milieu infini sans dioptre ( $\alpha = 0$ )

##### 4.1 - Signal reçu $S(t)$

Soient  $R(t)$  la distance AB à l'instant  $t$ , et  $\tilde{R}(t)$  la distance AB lorsque A a émis le signal reçu par B à l'instant  $t$ ; on notera  $\tilde{t}$  l'instant où A a émis ce signal.

$$\text{On a : } R(\tilde{t}) = \tilde{R}(t)$$

$$\text{et } R^2(t) = D^2 + (x_0 + vt)^2$$

La propagation étant sphérique, on peut écrire :

$$S(t) = \frac{E \left[ \frac{t - \tilde{R}(t)}{c} \right]}{\tilde{R}(t)}$$

Si  $E(t)$  est une raie spectrale et si on néglige le doppler comme indiqué au paragraphe 3.3.d, on pourra utiliser l'estimateur :

$$\hat{N}_E^1(f) = \frac{\hat{N}_S(f)}{Q}$$

$$\text{avec } Q = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{\tilde{R}^2(t)} dt$$

##### 4.2 - Calcul de $\tilde{R}(t)$

Par définition,  $\tilde{t}$  est solution de l'équation :

$$\tilde{t} + \frac{R(\tilde{t})}{c} = t$$

$$\text{d'où : } \tilde{t} = \frac{t + \frac{x_0}{c} M - (M^2 t^2 + 2 \frac{x_0 M t}{c} + (1-M^2) \frac{D^2}{c^2} + \frac{x_0^2}{c^2})^{1/2}}{1 - M^2}$$

$$\text{et : } \tilde{R}(t) = D^2 + (x_0 + v\tilde{t})^2 \quad 1/2$$

Ces expressions se simplifient si on choisit l'origine des temps telle que  $x_0 = 0$ , c'est-à-dire  $R(0) = D$ .

On a alors :

$$\tilde{R}(t) = \left[ D^2 + \frac{c^2 M^2}{(1-M^2)^2} \left( t - \sqrt{M^2 t^2 + (1-M^2) \frac{D^2}{c^2}} \right)^2 \right]^{1/2}$$

#### 4.3 - Calcul de correcteur Q

Compte tenu de l'expression de  $R(t)$ , le correcteur Q n'a pas d'expression analytique simple. Notons  $Q_1$ , la valeur numérique obtenue pour Q par un programme d'intégration numérique sur calculateur.

Nous allons chercher d'autres estimateurs de Q, plus simples et nécessitant moins de calculs numériques.

Notons  $R^*(t)$  le développement limité de  $\tilde{R}(t)$ , à l'ordre 2 en M.

$$\text{On a : } R^*(t) = D + \frac{M^2}{D} (ct-D)^2$$

Notons  $Q_2$  l'estimateur de Q déduit de  $R^*(t)$  :

$$Q_2 = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{R^{*2}(t)} dt$$

Une autre approximation de Q peut être obtenue en négligeant la différence  $R(t) - R^*(t)$  :

$$Q_3 = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} \frac{1}{R^2(t)} dt$$

d'où :

$$Q_3 = \frac{1}{vTD} \left[ \text{Arctg} \frac{vT_2}{D} - \text{Arctg} \frac{vT_1}{D} \right]$$

Dans le cas où la mesure est faite sur une portion de trajectoire symétrique autour du point de passage à distance minimum, et, si  $\theta$  désigne le demi angle de mesure (cf. figure 2), on a :

$$Q_3 = \frac{\theta}{D^2 \text{tg} \theta}$$

dans ce cas, l'estimateur pour source fixe  $Q_0$  peut s'écrire :

$$Q_0 = \frac{1}{D^2}$$

On a donc :

$$Q_3 = Q_0 \frac{\theta}{\text{tg} \theta}$$

ou, en décibels :

$$Q_3 \text{ (dB)} = Q_0 \text{ (dB)} + 10 \log \frac{\theta}{\text{tg} \theta}$$



Correction de la mesure du niveau de bruit  
d'une source en mouvement à proximité d'un dioptré

4.4 - Comparaison numérique  
des différentes approximations de Q

a) Ordres de grandeurs

Les valeurs des paramètres pour lesquels des comparaisons numériques ont été faites sont les suivantes :

$$\begin{aligned} v &= 1 \text{ à } 10 \text{ m/s} \\ D &= 20 \text{ à } 1000 \text{ m} \\ T &= 10 \text{ à } 200 \text{ s} \\ T_1 &= 0 \text{ à } 100 \text{ s} \\ c &= 1500 \text{ m/s} \end{aligned}$$

b) Comparaison Q1 - Q3

Pour les valeurs ci-dessus, les correcteurs Q1 et Q3 diffèrent de moins de 0,5 dB. Avec ces ordres de grandeur des paramètres, Q3 est donc un bon estimateur de Q1.

c) Comparaison Q3 - Q0

Pour une mesure symétrique par rapport au point de distance minimale, on a, en décibels :

$$Q_3 - Q_0 = 10 \log \frac{\theta}{\text{tg } \theta}$$

Numériquement, on trouve que l'erreur entre Q3 et Q0 est inférieure à 1 dB lorsque  $\theta < 45^\circ$ . Dans ce dernier cas, la correction la plus simple, Q0, est donc suffisante.

D'autre part, l'erreur Q3-Q0 est également inférieure à 1 dB lorsque :  $T_1 \neq 0$  et  $T < \frac{D}{v}$ . Dans ce cas également, Q0 est une correction suffisante.

d) Comparaison Q2 - Q3

La comparaison numérique de Q2 et Q3 montre que leur différence est faible : lorsque  $T_1 = 0$  et  $T < \frac{D}{v}$  elle est inférieure à 0,5 dB. Mais dès que  $T_1$  devient grand, les deux estimateurs divergent vite.

e) Exemples numériques

Les figures 3 et 4 représentent l'évolution des estimateurs Q0, Q1, Q2, et Q3 en dB dans l'intervalle :

$[-T, T]$  pour la figure 3 et

$[T_1, T_1+T]$  pour la figure 4 avec

$D = 100 \text{ m}$ ,  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $T_1 = 40 \text{ s}$  et  $T$  variant de 1 à 20 s. Sur la figure 3, si les estimateurs Q1, Q2 et Q3 s'écartent de moins de 1 dB l'un de l'autre, ils diffèrent à  $T = 20 \text{ s}$  de 1 dB par rapport à Q0 (lorsque  $T = 20 \text{ s}$ ,  $vT = D$ ).

Sur la figure 4, Q0, Q1 et Q3 restent très proches, alors que Q2 s'en écarte de plus de 2,5 dB.

5 - Présente d'un dioptré ( $\alpha \neq 0$ )

5.1 - Cas général

Pour une fréquence pure, on a :

$$S(t) = E_0 \left[ \frac{e}{\tilde{R}} j \left( t - \frac{\tilde{R}}{c} \right) + \alpha \frac{e}{\tilde{R}_1} j \left( t - \frac{\tilde{R}_1}{c} \right) \right]$$

où  $\tilde{R}_1$  est la distance entre la source image  $A_1$  et le capteur B (fig.2).

En utilisant  $k = \omega/c$ , le coefficient de correction est :

$$Q_4 = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_1+T} \left[ \frac{1}{\tilde{R}^2} + \frac{|\alpha|^2}{\tilde{R}_1^2} - \frac{2I(\alpha)}{\tilde{R}\tilde{R}_1} \sin k(\tilde{R}-\tilde{R}_1) + \frac{2\text{Re}(\alpha)}{\tilde{R}\tilde{R}_1} \cos k(\tilde{R}-\tilde{R}_1) \right] dt$$

où  $I(\alpha)$  et  $\text{Re}(\alpha)$  sont les parties imaginaires et réelles de  $\alpha$ .

5.2 - Cas  $\alpha = -1$

Pour l'application numérique, on peut utiliser à l'instar de Q3 la correction :

$$Q_5 = \frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_1+T} \left[ \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R_1^2} - \frac{2}{R R_1} \cos k(R_1 - R) \right] dt,$$

avec  $R^2 = D^2 + v^2 t^2$ ,  $R_1^2 = R^2 + 4 h_A h_B$ .

Lorsque  $T_1$  est tel que  $R(T_1) > 2 k h_A h_B$ , la quantité

$$Q_6 = \frac{1}{T_1} \int_{T_1}^{T_1+T} \left( \frac{2 k h_A h_B}{R^2} \right)^2 dt$$

diffère peu de Q5 (moins de 0,5 dB) pour les données précédentes et  $h_A = 100 \text{ m}$ ,  $h_B = 200 \text{ m}$ .

La figure 5 présente l'évolution des quantités :

$$-20 \log(R), 10 \log \left( \frac{1}{R^2} + \frac{1}{R_1^2} - \frac{2}{R R_1} \cos k(R_1 - R) \right),$$

$$20 \log \left( \frac{2 k h_A h_B}{R^2} \right)^2, \text{ intéggrandes de } Q_0, Q_5 \text{ et } Q_6,$$

en fonction de  $R$   $f = \frac{2\pi}{\omega} = 50 \text{ Hz}$

La source et la source image se comportent au-delà de  $2 k h_A h_B$  comme un dipôle étendu.



Correction de la mesure du niveau de bruit.  
d'une source en mouvement à proximité d'un dioptre

6 - Conclusion

En se plaçant dans des conditions physiques ou les hypothèses simplificatrices énoncée plus haut sont une approche convenable de la réalité, la méthode a été appliquée et offre de très bons résultats.

Des travaux sont en cours pour étendre la méthode à des modèles plus complets de propagation et en utilisant les mêmes principes. On peut par exemple tenir compte d'une impédance de surface et de fond et augmenter le nombre de rayons.

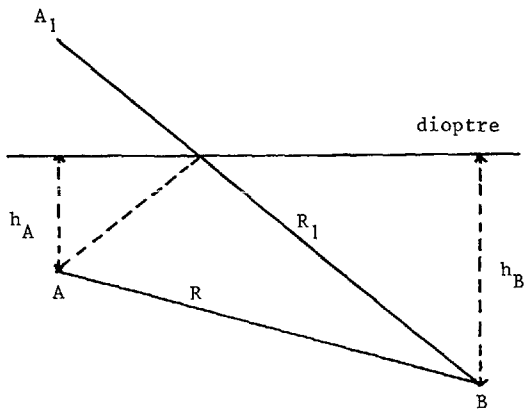


Figure 1 : Géométrie de la mesure dans le plan perpendiculaire au dioptre contenant A et B.

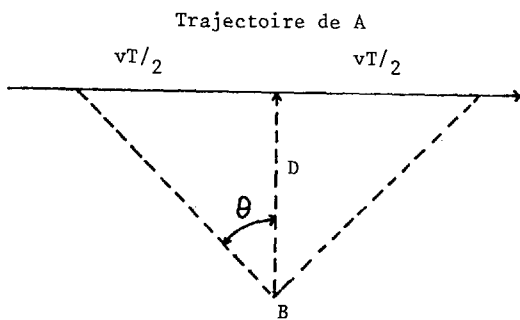


Figure 2 : Cas de la mesure symétrique par rapport au point de distance minimum.

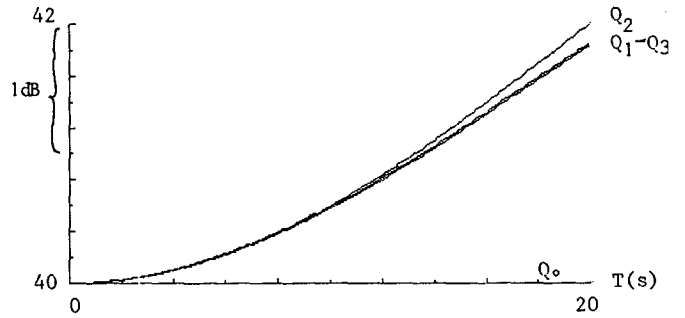


Figure 3

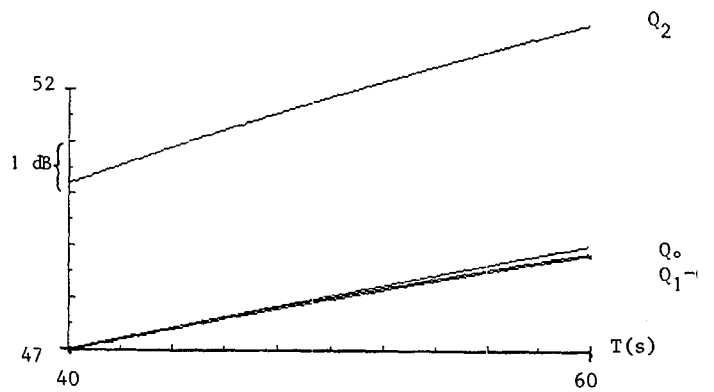


Figure 4

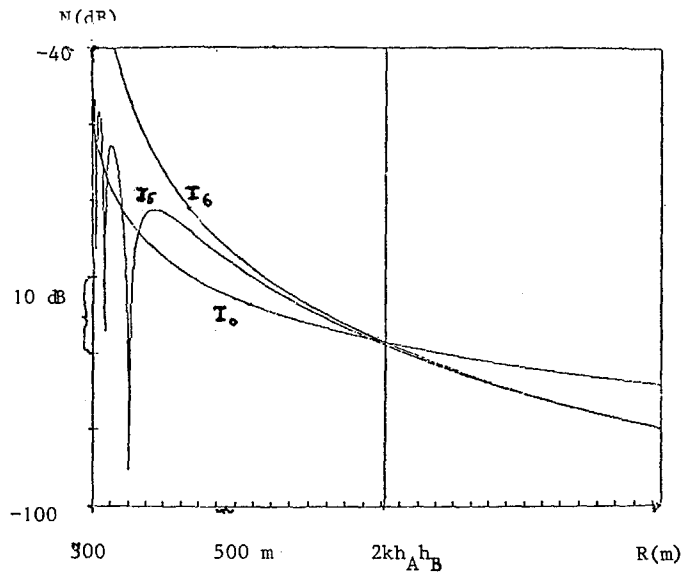


Figure 5

