DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

MODELISATION ANALYTIQUE DES PROPRIETES DU BRUIT DE TRAFIC

Robert LAVAL et Jean-Marc DREZET

Société d'Etudes et Conseils AERO - 3 avenue de l'Opéra - 75001 PARIS

RESUME

On présente une méthode analytique permettant de calculer la fonction de répartition du niveau de bruit ambiant sous-marin capté par un récepteur directif lorsque ce bruit est dû à l'influence du trafic maritime. Ce principe est utilisé pour le développement d'un modèle informatique qui ne fait appel à aucune méthode de simulation ou de Monte-Carlo.

Les informations nécessaires au calcul de cette fonction de répartition concernent la distribution statistique du trafic maritime en fonction de la position géographique, la densité de probabilité du bruit rayonné par les diverses classes de bateaux, les lois de la propagation acoustique et le diagramme de directivité de l'antenne de réception.

On présente quelques exemples de calculs effectués pour une répartition homogène du trafic et une loi de propagation idéalisée.

SUMMARY

A method is presented to calculate the cumulative distribution function of the underwater ambient noise due to the influence of shipping in a purely analytical way. The principle can be used to build up a computer model which would not make use of any simulation or Monte-Carlo approach.

The necessary input data are related to the ships density in the ocean, the statistical distribution of the noise levels radiated by the different classes of ships, the propagation and the receivers directivity.

Some exemples of cumulative distribution functions, computed for a homogeneous ships distribution and an idealised propagation law, are presented.

MODELISATION ANALYTIQUE DES PROPRIETES DU BRUIT DE TRAFIC

1.- INTRODUCTION

On propose ici une méthode analytique de calcul de la fonction de répartition du niveau de bruit de trafic capté par un récepteur directif, à partir d'informations concernant la distribution statistique du trafic maritime, les lois de la propagation acoustique ainsi que la directivité du récepteur.

Un modèle informatique basé sur ce principe est en cours de développement (modèle ANATRA).

2.- CARACTERISTIQUES DU BRUIT DE TRAFIC SOUS-MARIN

Le bruit de trafic est le facteur dominant du bruit océanique sous-marin dans une bande de fréquences allant de quelques Hertz à plusieurs centaines de Hertz. Les propriétés statistiques de ce type de bruit sont complètement différentes de celles du bruit de surface, qui prévaut à des fréquences plus hautes.

Le bruit de trafic résulte de l'addition linéaire des contributions élémentaires de tous les bateaux émettant une énergie acoustique dans le milieu. Le bruit élémentaire produit à un instant donné par un bateau (par exemple le nième bateau) est caractérisé par :

. son azimut par rapport au récepteur, θ_n
. le niveau de bruit β_n .

β_n est l'intensité moyenne du bruit produit par le nième bateau dans une bande de fréquences spécifiée Δf , pendant un temps T supérieur à $1/\Delta f$, mais pendant lequel le bruit et θ_n varient peu. On peut l'écrire :

$$\beta_n = s_n\, L(r_n, \theta_n)$$

où s_n est le niveau de bruit rayonné par le nième bateau dans la bande de fréquence Δf , à une distance d'un mètre, et $L(r_n, \theta_n)$ la perte de propagation entre le bateau et le récepteur (r_n désignant la distance entre eux).

A la sortie d'un récepteur directif caractérisé par un diagramme de directivité $D(\theta)$, la contribution du nième bateau devient :

$$b_n = s_n\, L(r_n, \theta_n)\, D(\theta_n)$$

Le niveau de bruit à la sortie du récepteur est alors :

$$B = \sum_{n=1}^{\mathcal{N}} b_n = \sum_{n=1}^{\mathcal{N}} s_n L(r_n, \theta_n) D(\theta_n)$$

($\mathcal{N}$ désignant le nombre total de bateaux).

Les bateaux se déplaçant, B est une fonction du temps t . Considérant $B(t)$ comme une variable aléatoire, on définit la fonction de répartition du bruit $P(B)$ comme la probabilité pour que l'intensité du bruit à la sortie du récepteur soit $\leqslant B$.

Si on dispose d'un récepteur à plusieurs canaux (en directions d'observations et/ou en bandes de fréquences), on pourra définir autant de fonctions de répartition qu'il y a de combinaisons possibles de directions d'observation et de canaux de fréquences. Les fonctions $P(B)$ sont des informations a priori nécessaires à la résolution de la plupart des problèmes de traitement du signal relatifs à un récepteur donné dans un environnement donné.

Les fonctions de répartition $P(B)$ peuvent être déterminées par un modèle informatique, qui devra disposer des informations suivantes :

. La densité moyenne des bateaux dans l'océan en fonction de la latitude ℓ et de la longitude t : $\Delta(\ell, t)$. On suppose que la distribution des bateaux suit une loi de POISSON dans chaque élément de surface.

. La densité de probabilité du bruit rayonné par les bateaux, dans la bande de fréquences Δf : $p(s)$.

. La loi de propagation $L(r, \theta)$.

. Le diagramme de directivité du récepteur $D(\theta)$.

En fait, $\Delta(\ell, t)$ et $p(s)$ n'étant pas indépendantes, il convient de diviser l'ensemble des bateaux en plusieurs classes, et de définir pour chacune des fonctions $\Delta(\ell, t)$ et $p(s)$. Dans [4] on distingue cinq telles classes.

Les modèles informatiques développés jusqu'à présent pour calculer $P(B)$ sont basés sur des méthodes de Monte-Carlo [3] et [6].

En fait, le calcul de $P(B)$ à partir des informations définies ci-dessus peut être effectué par une méthode purement analytique, sans faire appel à aucune simulation.

3.- EXPRESSION ANALYTIQUE DE LA FONCTION DE DISTRIBUTION DU BRUIT DE TRAFIC

On peut montrer que $P(B)$ peut se déduire d'une certaine fonction :

$N(b_0)$: nombre moyen de bateaux responsables d'un bruit $b \geqslant b_0$ à la sortie du récepteur.

La transformation donnant $P(B)$ à partir de $N(b)$ (donné en échelle linéaire du niveau de bruit) se décompose de la façon suivante :

$$\text{Soit : } G(\xi) = \int_0^{+\infty} N(b) . e^{ib\xi} . db$$

La Transformée de FOURIER inverse de $N(b)$, qu'on décompose en ses parties réelle et imaginaire :

$$G(\xi) = R(\xi) + i . I(\xi)$$

Alors on a :

$$P(B) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{+\infty} e^{-i\xi I(\xi)} . \frac{\sin(\xi . R(\xi))}{\xi} \cos \xi B d\xi \tag{1}$$

En fait, cette transformation s'applique à beaucoup de problèmes impliquant la sommation d'effets individuels produits par un processus de POISSON, en particulier le bruit de grenaille.

Le calcul de $N(b)$ à partir des informations décrites dans (2) se décompose en une séquence d'opérations relativement simples.

La première opération est la conversion de la densité $\Delta(\ell, t)$ de chaque type de bateaux k , donnée en coordonnées longitude-latitude, en coordonnées polaires d'origine la position du récepteur. On obtiendra ainsi une "densité poissonnienne" $\delta_{r,\theta}(r_o,\theta_o)_k$. $\delta_{r,\theta}(r_o,\theta_o)_k\, dr d\theta$ est la probabilité de trouver un bateau de type k à une distance r , un azimut θ , vérifiant les inégalités :

$$r_o \leqslant r \leqslant r_o + dr \ , \quad \theta_o \leqslant \theta \leqslant \theta_o + d\theta$$

Pour un type de bateaux k et un domaine de propagation q donnés, on définit de même une densité poissonnienne dans les coordonnées bruit-azimut $\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)_{k,q}$, $\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)_{k,q}\, d\beta d\theta$ étant la probabilité de trouver un bateau à l'azimut θ , cause d'un bruit β à la sortie du récepteur, tels que :

$$\beta_o \leqslant \beta \leqslant \beta_o + d\beta \ , \quad \theta_o \leqslant \theta \leqslant \theta_o + d\theta$$

Pour calculer $\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)_{k,q}$ on exprimera β , S et L en décibels. On utilise une fonction intermédiaire :

$$\delta_{L,\theta}(L_o,\theta_o)_{k,q} = \sum \delta_{r_i,\theta}(r_i(L_o,\theta_o),\theta_o) . \frac{\partial}{\partial L} r_i(L_o,\theta_o)$$

La sommation étant étendue aux distances r_i ; telles que $L(r_i,\theta_o) = L_o$. On a alors :

$$\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)_{k,q} = \int_{S_{min}}^{S_{max}} \delta_{L,\theta}(\beta_o - S,\theta_o)_{k,q}\, p(S)\, dS$$

La densité globale est donc :

$$\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o) = \sum_k \sum_q \delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)_{k,q}$$

(la sommation étant étendue à tous les types de bateaux et tous les domaines de propagation). La fonction $\delta_{\beta,\theta}(\beta_o,\theta_o)$ donne une description statistique du champ sonore au voisinage du récepteur.

Tenant compte de la directivité du récepteur exprimée en décibels, on définit :

$$\delta_b(b_o) = \int_0^{2\pi} \delta_{\beta,\theta}(b_o - D(\theta),\theta)\, d\theta$$

On a alors :

$$N(b_o) = \int_{b_o}^{+\infty} \delta_b(b)\, db$$

4.- REALISATION D'UN MODELE INFORMATIQUE

Conformément aux principes exposés ci-dessus, le caldul de $P(b)$ comporte deux étapes.

La première étape, consacrée au calcul de $N(b)$, ne présente pas de difficultés mathématiques particulières.

La seconde étape de calcul est la transformation de $N(b)$ en $P(b)$.

L'application directe de la formule pose des problèmes numériques importants. En effet, le calcul correct de la Transformée de FOURIER inverse de $N(b)$ par FFT demanderait un nombre de points considérable en raison de la dynamique et de la forme particulière de $N(b)$.

En vue de résoudre ces difficultés, on notera les propriétés intéressantes suivantes :

. On peut montrer que si b_1 désigne la contribution élémentaire de B la plus forte à un instant donné, la fonction de distribution de b_1 est donnée par :

$$P(b_1) = e^{-N(b_1)}$$

Au-dessus d'une certaine valeur B_H de B , $P(B)$ et $P(b_1)$ sont pratiquement identiques (ce qui signifie que les valeurs fortes de B correspondant à une valeur de $P(B)$ peu inférieure à un sont presque toujours dues à un seul bateau proche).

. Soit $p(B)$ la densité de probabilité du bruit de trafic, c'est-à-dire $p(B) = dP/dB$. On exprime la transformation donnant $p(B)$ en fonction de $N(B)$ de la façon suivante :

$$p(B) = \mathcal{T}r\,(N(b))$$

Alors, si $N(b)$ est une somme de fonctions :

$$N(b) = N_1(b) + \ . \ . \ . \ . + N_k(b)$$

on a :

$$p(B) = \mathcal{T}r(N_1(b)) * \ . \ . \ . \ . * \mathcal{T}r(N_k(b))$$

($*$ désignant la convolution).

La décomposition de $N(b)$ peut être utilisée dans deux buts : simplifier les problèmes numériques que pose le calcul de $P(B)$, et donner une meilleure compréhension de l'influence des divers facteurs sur les propriétés statistiques de B .

On propose la décomposition suivante : on introduit deux valeurs b_L et b_H de b , l'ensemble des valeurs de b étant alors divisé en trois parties, auxquelles correspondent des fonctions $N_i(b)$:

. La première partie, celle des bruits faibles $(b \leqslant b_L)$, la fonction $N_1(b)$ associée étant :

$$\begin{aligned} N_1(b) &= N(b) - N(b_L) \quad & si \quad & 0 \leqslant b \leqslant b_L \\ &= 0 & si \quad & b > b_L \end{aligned}$$

. La seconde partie, celle des bruit moyens $(b_L \leqslant b \leqslant b_H$, la fonction $N_2(b)$ associée étant :

$$\begin{aligned} N_2(b) &= N(b_L) - N(b_H) \quad & si \quad & b_L < b \leqslant b_L \\ &= N(b) - N(b_H) & si \quad & b_L \leqslant b \leqslant b_H \\ &= 0 & si \quad & b > b \end{aligned}$$

. La troisième partie, celle des bruits forts $(b \geqslant b_H)$, la fonction $N_3(b)$ associée étant :

$$\begin{aligned} N_3(b) &= N(b_H) \quad & si \quad & b \leqslant b_H \\ &= N(b) & si \quad & b \geqslant b_H \end{aligned}$$

Le critère pour définir b_L est que la variabilité du bruit B résultant de la somme des composantes inférieures à b_L soit faible.

Le critère pour définir b_H est que, lorsque le bruit élémentaire le plus fort est $b_1 \geqslant b_H$, la valeur moyenne $\overline{B - b_1}$ du bruit résultant de la somme de toutes les autres composantes soit petite comparée à b_1 .

D'après la décomposition précédente de $N(b)$, le bruit total B à la sortie du récepteur est la somme de trois termes :

. Un bruit de fond stable B_1 , qui est la somme d'un grand nombre de petites contributions élémentaires. En négligeant la variabilité de ce bruit, sa densité de probabilité peut être assimilée à un Dirac :

$$p(B_1) = \delta(B_1 - \overline{B}_1) \qquad \text{avec} \quad B_1 = \int_0^{+\infty} N_1(b)\,db$$

. Un bruit occasionnel, de haut niveau B_3 , qui lorsqu'il se produit, est dû essentiellement à une source unique et puissante (un bateau proche). La fonction de répartition de ce bruit est approximativement :

$$P(B_3) = e^{-N_3(b)}\Big/_{b=B_3}$$

. Un bruit essentiellement variable B_2 , qui est la somme de toutes les composantes "moyennes". La fonction de répartition de ce bruit s'obtient à partir de $N_2(b)$ à l'aide de la transformation décrite dans (2).

La fonction de répartition du bruit total est alors le résultat de la convolution :

$$P(B) = \delta(B_1 - \overline{B}_1) * p(B_2) * P(B_3)$$

5.- EXEMPLES

On a calculé des fonctions de répartition $P(B)$ dans la situation simplifiée suivante : on ne considère qu'un seul type de bateaux, leur densité δ est constante, la loi de propagation est radiale, donnée par (en décibles) :

$$L(r) = -15 \log r - \alpha r$$

Le récepteur a le diagramme de directivité suivant, défini par l'angle θ

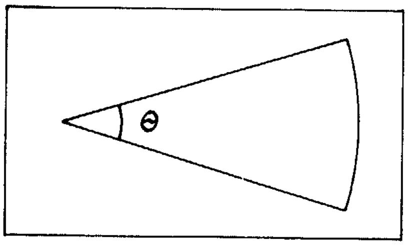

FIG. 1

La courbe $P(B)$ obtenue ne dépend que de la quantité suivante :

$$\delta_0 = 9\ \theta/2\ .\ \delta/\alpha^2$$

qu'on appelle densité normalisée. C'est le nombre moyen de bateaux contenus dans un secteur angulaire d'angle θ et de rayon $R = 3/\alpha$. A l'intérieur de ce secteur, le terme d'atténuation αR est $\leqslant$ 3 dB.

On a tracé dans la figure 2 un réseau de fonctions de répartition $P(B)$ pour diverses valeurs de δ_0 s'échelonnant de 0,025 à 50. L'échelle des bruits est en décibels par rapport au niveau de bruit d'un bateau à un mètre.

On remarquera que lorsque la densité normalisée augmente, la variance du bruit en décibels diminue.

5.- CONCLUSION

La méthode analytique décrite ici doit permettre de réaliser un modèle informatique capable de prédire les principales caractéristiques du bruit ambiant à basse fréquence, pourvu qu'on dispose des informations nécessaires concernant le trafic maritime et la propagation. Un tel modèle devrait être plus rapide et plus souple que les modèles de simulation utilisant une méthode de Monte-Carlo et se prêter plus facilement au développement de certaines études paramétriques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Ira DYER . Statistics of distant shipping noise.
J. Acoust. Soc. Am. 53 564-570, 1973.

[2] FRASER (I.A.). A parametric examination of some properties of low-frequency ambient-noise field.
Proceedings of a conference on Underwater Ambient Noise held at Saclantcen, mai 1982.

[3] HAMSON (R.M.) and WAGSTAFF (R.A.) RANDI II. RANDI II an ambient noise model that includes coherent hydrophone summation for sonar systems in shallow, intermediate and deep water. (classified). Proceedings of a conference on Underwater Ambient Noise held ar Saclantcen, mai 1982.

[4] HEINE (J.C.) and GREY (L.M.). Merchant ship radiated noise mofrl. Report n° 3020 - Bolt Beranek Inc., août 1976.

[5] PLAISANT (A.) et BIENVENU (G.). Modèle de bruit ambiant en très basse fréquence. Neuvième Colloque sur le traitement du signal et ses applications (GRETSI), mai 1983.

[6] WAGSTAFF (R.A.). RANDI : Research Ambient Noise Directionality Model.
Naval Undersea Center, avril 1973.

[7] LAVAL (R.) et DREZET (J.M.). An analytical Method to predict the Statistical Characteristics of Ambient shipping Noise.
Proceeding of a Nato advanced Institute on Adaptive Methods in Underwater Acoustics, Lüneburg, août 1984.

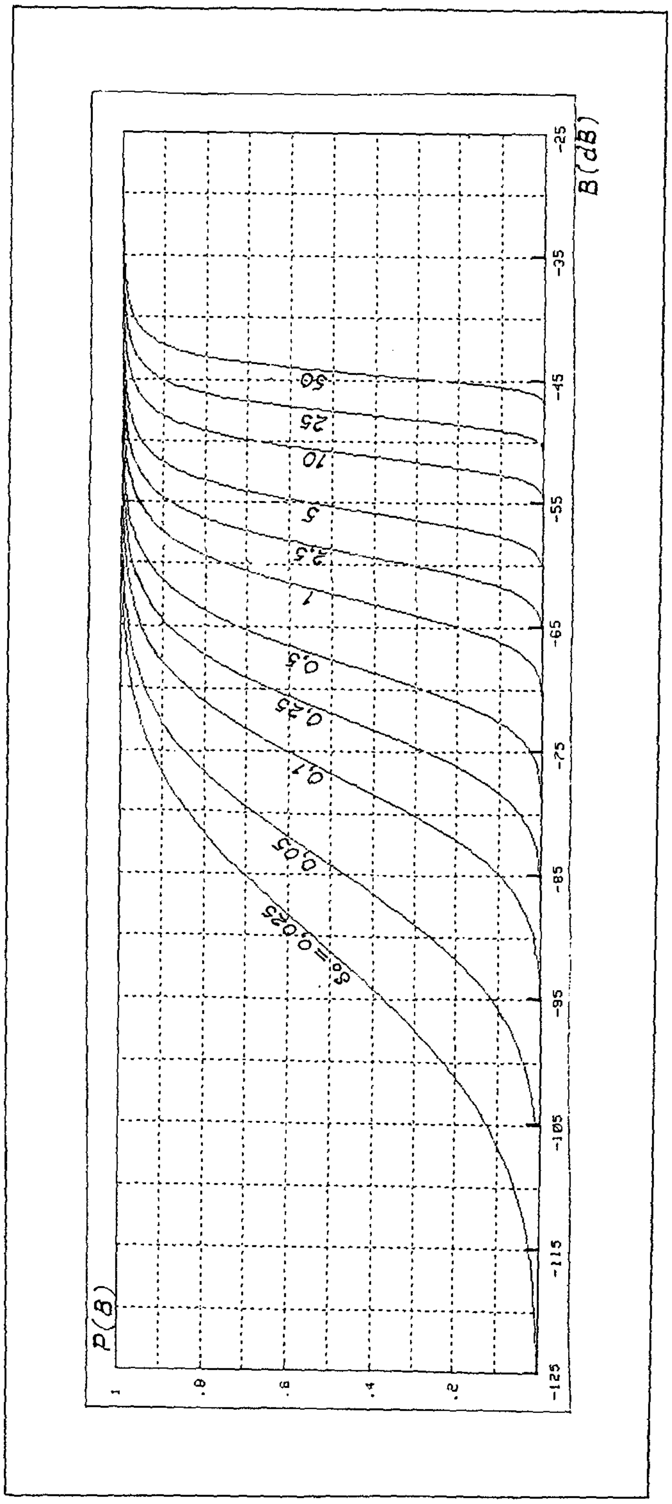

FIG.2 : FONCTION DE REPARTITION DU BRUIT DE FOND POUR DIVERSES VALEURS DU TERME DE DENSITE NORMALISEE

[redacted]