

Session 3 : Technologies génériques de l'intervention sous-marine

MODELISATION DE LA COHERENCE SPATIALE DU BRUIT GENERE PAR LES VAGUES

A. PLAISANT

Thomson-Sintra ASM - Département de Sophia
525, Route des Dolines - BP 38
06561 Valbonne Cedex

Le bruit ambiant est un des éléments qui limitent les performances des systèmes acoustiques sous marins utilisés pour des applications diverses, par exemple localisation de véhicules autonomes, transmissions de données.

Dans une gamme de fréquences allant d'environ 500 Hz à 100 KHz, il est établi que ce bruit ambiant a pour origine l'agitation de la surface de la mer dû à l'effet du vent : impacts d'embruns, génération de bulles qui éclatent ou oscillent sous l'effet de variations brutales de pression.

Des modèles empiriques existent qui donnent la densité spectrale du bruit de surface en fonction de l'état de la mer ou de la vitesse du vent, mais ces modèles sont insuffisants car ils ne donnent aucune information sur la corrélation spatiale du champ de bruit qui intervient dès qu'on effectue des formations de voies à partir de plusieurs capteurs d'une antenne.

Nous avons développé un modèle qui permet d'estimer le niveau de bruit de surface derrière formation de voie à partir d'une antenne linéaire à capteurs équidistants orientée de façon quelconque, en tenant compte des phénomènes de propagation dus à la présence du fond et à la variation d'indice de réfraction en l'immersion qui provoque la courbure des rayons.

On explique les principes de la modélisation et on montre que les résultats peuvent être notablement différents de ceux obtenus sous l'hypothèse habituelle d'un bruit ambiant omnidirectionnel.

Session 3 : Basic underwater technology

- A MODEL FOR SPATIAL COHERENCE OF SURFACE WAVES GENERATED NOISE
- M. A. PLAISANT
- Thomson-Sintra ASM
BP 53
Chemin des Travails
06801 Cagnes sur Mer

Performances of underwater acoustic systems used for various application such as vehicule localisation, data transmission, could be limited by ambient noise.

In the frequency band 500 Hz - 100 KHz, it is known that ambient noise is due to the action of wind on the sea surface which produces breaking waves. Noise is produced by droplets impacts and entrained bubbles which oscillate under strong pressure variations.

Well known empirical models already exist (KNUDSEN, WENZ, etc.) for noise spectral density function of frequency, sea state or wind speed but they give no information on the spatial structure or coherence of the noise field which is essential as soon as array beamforming is involved.

We have developped a model which computes the spatial coherence matrix of the noise field due to a continuous distribution of sources located at the sea surface, and also the noise power spectral density after classical beamforming on an equidistant hydrophones linear array.

In this model, propagation effects like rays bending due to variations of index of refraction and multiple bottom and surface reflections are taken into account.

Principles of the modeling are presented and results demonstrate that significant differences can be obtained with respect to the classical omnidirectional noise field hypothesis.

MODELISATION DE LA COHERENCE SPATIALE DU BRUIT GENERE PAR LES VAGUES

A. PLAISANT

INTRODUCTION

Les ondes acoustiques peuvent être utilisées avantageusement pour résoudre de nombreux problèmes qui se posent dans l'exploitation, le contrôle et la protection de l'océan. On peut citer comme exemples la localisation de véhicules autonomes, la transmission de données entre véhicules ou stations de mesures, la détection et classification d'objets, la tomographie acoustique.

Les performances des systèmes acoustiques sont finalement limitées par le milieu lui-même dont le comportement n'est pas entièrement prévisible et en particulier par la présence du bruit ambiant sous-marin qui peut dominer les autres types de bruits si les systèmes sont bien conçus. Le bruit ambiant sous-marin est étudié depuis longtemps, surtout pour les applications militaires. Des modèles existent qui donnent le niveau isotrope spectral [1] à [7] des bruits de différentes origines : trafic maritime, agitation de la surface, pluie, agitation thermique en très haute fréquence. Suivant la bande de fréquence, on connaît le type de bruit ambiant dominant ; par exemple, dans la bande 500 Hz - 100 kHz qui couvre de nombreuses applications, c'est le bruit dû à l'agitation de la surface sous l'effet du vent qui est prépondérant.

A titre d'exemple, la figure 1 présente le modèle de WENZ bien connu des sonaristes.

La connaissance du niveau isotrope spectral, qui représente la puissance de bruit observée sur un capteur omnidirectionnel dans une bande de 1 Hz n'est malheureusement pas suffisante pour étudier des systèmes qui comportent des antennes ou réseaux de capteurs à partir desquels on effectue des "formations de voies" pour donner une directivité à ces antennes, car si on veut connaître le niveau de bruit derrière formation de voie, il faut connaître la cohérence spatiale du champ de bruit, c'est-à-dire la corrélation qu'il peut y avoir entre le bruit observé sur un capteur et celui observé sur un capteur voisin.

Nous allons montrer comment on peut de façon relativement simple modéliser la cohérence spatiale du bruit généré à la surface de la mer et calculer le niveau de bruit en sortie de formation de voie sur une antenne linéaire à capteurs équidistants. Notre calcul prend en compte les effets de propagation : courbure des rayons, réflexions multiples entre la surface et le fond qui sont importants car les sources de bruit situées en surface se propagent vers le récepteur dans le même milieu que le signal utile et il peut donc y avoir corrélation entre les niveaux de ce signal utile et du bruit ambiant.

MODELISATION DES SOURCES

1 - LES SOURCES PHYSIQUES DU BRUIT DE SURFACE

Certaines de ces sources sont aujourd'hui clairement identifiées, mais tous les aspects du problème sont loin d'être éclaircis et de nombreux travaux aussi bien théoriques qu'expérimentaux sont en cours sur ce sujet [8]. Parmi les mécanismes de génération de bruit connus, on peut citer les bulles d'air entraînées dans l'eau par les vagues déferlantes, qui éclatent ou oscillent sous l'effet de variations brutales de pression, l'impact des gouttelettes d'eau constituant les embruns, les turbulences hydrodynamiques sous la surface, la turbulence du vent, l'interaction des vagues entre elles.

Nous ne cherchons pas ici à modéliser le bruit à la source, nous suivons une approche plus globale qui consiste à supposer que l'action d'un élément de surface de la mer dS peut se réduire à celle d'un point source placé sur la surface, caractérisé par une densité spectrale et surfacique à l'émission qui sera fonction de la fréquence et la vitesse du vent, et par une directivité de type dipole dans le plan vertical pour tenir compte de l'effet de miroir constitué par l'interface air - eau.

2 - NIVEAU A L'EMISSION DES SOURCES ELEMENTAIRES

Nous utilisons les résultats publiés par WILSON [9] qui donne la densité spectrale et surfacique de puissance à l'émission en fonction de la fréquence et de la vitesse du vent sous forme d'un tableau de valeurs. Ces résultats ont été obtenus à partir de mesures en mer. A partir des valeurs de WILSON, nous utilisons une procédure d'interpolation qui permet de trouver le niveau pour n'importe quelle valeur de la fréquence comprise entre 10 et 10000 Hz et de la vitesse du vent comprise entre 0 et 50 noeuds.

La figure 2 montre les courbes obtenues pour la densité spectrale et surfacique à l'émission appelée SL (Fréq, vvent).

3 - DIRECTIVITE DES SOURCES ELEMENTAIRES

On suppose que les sources élémentaires sont omnidirectionnelles en azimut mais directives en site avec une directivité en puissance de la forme :

$$B(\theta_0) = \sin^2(\theta_0)$$

où θ_0 représente l'angle de site (par rapport à l'horizontale) de la direction d'observation.

Cette fonction de directivité correspond à des sources dipolaires et représente l'effet de miroir de Lloyd dû à l'interface air-eau.

4 - REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES SOURCES ELEMENTAIRES

On a voulu se donner la possibilité de travailler avec une répartition des sources non uniforme en surface pour simuler par exemple l'effet d'une tempête localisée en distance et azimut.

La surface de la mer est donc découpée en secteurs azimutaux centrés sur la position du récepteur et chaque secteur est découpé en zones distance qui sont des portions d'anneaux circulaires dans lesquels on considère que la vitesse du vent est constante c'est à dire que les sources élémentaires qui s'y trouvent ont toutes le même niveau d'émission.

LES EFFETS DE PROPAGATION

Nous nous sommes particulièrement intéressés à mettre en évidence les différences qu'on peut obtenir suivant les conditions de propagation. En effet, l'océan est un milieu inhomogène où la célérité du son varie en immersion suivant les saisons : en été la surface de la mer est plus chaude qu'en hiver et on se trouve en présence d'un fort gradient négatif de température et de célérité. A cause des variations de célérité, l'énergie ne se propage pas en ligne droite dans un plan vertical, les rayons sonores qui sont une bonne représentation des trajets de l'énergie en haute fréquence (en pratique aux fréquences supérieures à 200 Hz) sont courbés et de plus se réfléchissent sur la surface et le fond. Dans certains cas, on assiste à la formation de zones d'ombre ou au contraire de zones à forte concentration d'énergie. La figure 3 donne un exemple de tracés des rayons avec un profil de célérité qui correspond à un mois d'été. A cause du gradient négatif de célérité en surface, les rayons peu inclinés au départ de la source à 200 mètres d'immersion se retournent avant d'avoir atteint la surface.

Pour la simplicité des calculs, on se place dans le cas d'un milieu où la célérité varie seulement avec l'immersion et où le fond est plat et horizontal. Dans ce cas, la trajectoire des rayons se calcule très simplement en utilisant la loi de Snell/Descartes :

$$\frac{\cos\theta}{c} = \frac{\cos\theta_0}{C_0}$$

- θ = angle de site à l'immersion z
- c = célérité du son à l'immersion z
- θ_0 = angle de site à la source
- C_0 = célérité du son à la source

et en sachant que dans une couche à gradient de célérité constant, cette trajectoire est un arc de cercle. Chaque rayon est une courbe périodique qui se répète au second passage à l'immersion source.

Les pertes énergétiques de propagation le long d'un rayon sont la somme des pertes de divergence géométrique, des pertes par réflexion surface et fond et des pertes par dissipation volumique qu'on prendra proportionnelles à la distance de propagation.

Nous allons voir au paragraphe suivant comment traiter les pertes par divergence géométrique. En ce qui concerne les pertes par réflexion surface, nous avons utilisé le modèle de BECHMAN [10], pour les pertes par réflexion fond le modèle du NUC [10] et pour les pertes par absorption volumique, le modèle de MARSH et SCHULKIN [11].

CALCUL DE LA DENSITE ANGULAIRE DE PRESSION QUADRATIQUE

Cette fonction représente la "directivité" du champ de bruit et on peut en déduire l'interspectre entre deux capteurs et ensuite le niveau de sortie de formation de voie comme on le verra au paragraphe 5.

C'est par définition la pression quadratique reçue dans un angle solide unité, orienté dans une direction θ, ϕ . θ est l'angle azimutal et ϕ l'angle de site. On la représente par la fonction $N^2(\theta, \phi)$.

La figure 4 représente un élément de surface dS qui génère le bruit, un récepteur R ainsi que le faisceau de rayons partant de R qui intercepte dS . Ce faisceau forme un angle solide $d\Omega$ centré autour de la direction \vec{u} définie par les angles θ et ϕ .

Par définition de N^2 , on a :

$$(1) \quad p_R^2 = N^2(\theta, \phi) \cdot d\Omega \quad \text{où } p_R \text{ est la pression acoustique au niveau du récepteur.}$$

On sait que l'élément dS est équivalent à une source ponctuelle de niveau d'émission ramené à 1 mètre de :

$$(2) \quad p_s^2 = NL(\text{Freq, vvent}) \cdot B(\theta_0) \cdot dS$$

Cette source équivalente va créer un niveau de pression quadratique au récepteur de :

$$(3) \quad p_R^2 = p_s^2 \cdot TL$$

où TL est la perte de propagation énergétique entre S et R. D'après le principe de réciprocité, cette perte est la même qu'entre R et S. On peut donc calculer la perte de propagation en considérant que la source est en R. Nous appliquons le principe de conservation du flux d'intensité dans le tube de rayon issu de R, d'angle solide $d\Omega$ et interceptant la surface dS , fermé du côté de R par la surface $dS_1 = d\Omega$ intersection du tube avec la sphère centrée en R de rayon unité :

$$(4) \quad I_R d\Omega = I_s dS_{\perp} = I_s dS \sin\theta_0$$

dS_{\perp} représente l'intersection du tube par une surface normale au rayon central et passant par S.

L'intensité acoustique est liée à la pression quadratique par :

$$(5) \quad I = p^2 / \rho c$$

où ρ est la masse volumique de l'eau
 c est la célérité du son dans l'eau

En combinant les relations (3), (4) et (5) on obtient :

$$(6) \quad TL = \frac{c_S}{c_R} \cdot \frac{1}{\sin\theta_0} \cdot \frac{d\Omega}{dS} \quad \text{on considère } \rho \text{ constant}$$

On peut alors calculer $N^2(\theta, \phi)$ d'après (1), (2), (3) et (6) :

$$N^2(\theta, \phi) = NL(\text{freq}, v_{\text{vent}}) \cdot B(\theta_0) \cdot \frac{c_S}{c_R} \cdot \frac{1}{\sin\theta_0}$$

On voit que le calcul de N^2 ne nécessite pas de calcul de perte de propagation mais seulement la connaissance de l'angle de site θ_0 d'arrivée à la surface du rayon d'angle θ au niveau du récepteur.

Cependant, il faut tenir compte aussi des pertes par réflexion surface et fond ainsi que de l'atténuation de volume si bien qu'il faut quand même calculer la trajectoire d'une période de chaque rayon :

$$(7) \quad N^2(\theta, \phi) = SL(\text{freq}, v_{\text{vent}}) \cdot B(\theta_0) \cdot \frac{c_S}{c_R} \cdot \frac{1}{\sin\theta_0} \cdot \alpha_v^L \cdot \alpha_s^{n_s}(\theta_0) \cdot \alpha_f^{n_f}(\theta_f)$$

où α_v est la coefficient d'atténuation de volume en fraction par kilomètre
 L est la longueur du trajet en kilomètre
 α_s est le coefficient de réflexion surface en linéaire
 n_s est le nombre de réflexions surface
 α_f est le coefficient de réflexion fond en linéaire
 n_f est le nombre de réflexions fond
 θ_f est l'angle de rasance à la réflexion fond

La figure 5 montre le résultat obtenu pour N^2 par notre programme de calcul "DIBRUIS" des conditions de propagation de type Méditerranée été et Méditerranée hiver. On voit que dans le premier cas, il existe un trou de directivité à l'horizontale.

Aucun rayon issu de la surface n'atteint le récepteur sous angle nul, à cause du gradient de célérité négatif en surface. Le niveau en direction du fond dépend essentiellement des propriétés de réflexion du fond.

CALCUL DE L'INTERSPECTRE ENTRE DEUX CAPTEURS

On suppose que le champ de bruit observé au niveau des capteurs est une somme infinie d'ondes planes dues à chaque source élémentaire, arrivant avec des vecteurs d'onde $\vec{\kappa}$ d'angles (θ, ϕ) .

Soit \vec{d} le vecteur intercapteurs $\overrightarrow{R_1 R_2}$ d'angles d'azimut et de site α et β et de module d .

L'interspectre entre R_1 et R_2 s'écrit :

$$S_{12}(\alpha, \beta) = \int_{4\pi} N^2(\theta, \phi) e^{j\vec{\kappa}\vec{d}} d\Omega$$

Si on explicite les produits $\vec{\kappa} \vec{d}$ en fonction des angles on obtient :

$$S_{12}(\alpha, \beta) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\theta \cos\theta e^{-j\omega \frac{d}{c} \sin\alpha \sin\theta} \int_0^{2\pi} d\phi N^2(\theta, \phi) e^{-j\omega \frac{d}{c} \cos\alpha \cos\theta \cos(\beta-\phi)}$$

On calcule les intégrales numériquement.

CALCUL DU NIVEAU DE BRUIT EN SORTIE DE FORMATION DE VOIES

La sortie d'une formation de voies classique γ_s s'exprime par le produit matriciel suivant :

$$\gamma_s = \frac{1}{(N_{\text{capt}})^2} \cdot D^+ \cdot \Gamma \cdot D$$

où D est le vecteur de pointage de la voie dont l'élément i est :

$D_i = \exp(j\omega \frac{d}{c} \sin u)$, u étant l'angle formé par la normale à la direction des capteurs et la direction de pointage. D^+ est le vecteur transposé conjugué.

Le facteur de pondération $(N_{\text{capt}})^2$ a été introduit pour que γ_s , comparé au niveau isotrope spectral NIS qui est mesuré par la valeur des termes diagonaux de la matrice Γ , représente le gain d'antenne :

$$\text{NIS}_{\text{dB}} - \gamma_s \text{ dB} = \text{Gain d'antenne}_{\text{dB}}$$

Notre programme "DIBRUIS" calcule également γ_s pour une antenne linéaire orientée de façon quelconque et pour plusieurs gisements de pointage des voies. Un exemple de sortie graphique est présenté sur la figure 6. L'antenne de 16 capteurs est verticale, le gisement 0 degré représente la direction horizontale.

On voit que les voies pointées proches de l'horizontale reçoivent beaucoup moins de bruit que les autres. On peut comparer au résultat qu'on aurait obtenu sous l'hypothèse classique d'un bruit isotrope, également montré sur la figure 6 ; autour de l'horizontale, la différence dépasse 10 dB.

CONCLUSION

Nous avons montré comment on peut de façon relativement simple introduire les effets de propagation pour calculer la cohérence spatiale du champ de bruit généré par les vagues et le niveau de sortie d'une formation de voie classique sur une antenne linéaire à capteurs équivalents. Ces effets peuvent être importants dans le cas d'antennes fortement directives. Des travaux sont en cours pour valider expérimentalement notre modèle, à partir de mesures en mer sur une antenne verticale.

REFERENCES

- [1] WENZ G.M "Acoustic ambient noise in the ocean : spectra and sources", JASA, vol 34, 1936-1961, 1962
- [2] URICK R.J "Some directional properties of deep water ambient noise", US Nav Res Lap Rep 3796, 1951
- [3] KNUDSEN V.O and all "Underwater ambient noise" J. Mar. Res 7 : 410, 1948
- [4] KUO E. "Deep sea noise due to surface motion", JASA 43 : 1017, 1968
- [5] BREKHOVSKICH L.M "Underwater sound waves generated by surface waves in the ocean" Atmosph and Oceanic Physics, Vol 2/9, 582-587, 1966
- [6] CATO O. "Ambient sea noise in waters near Australia", JASA 60 : 320, 1976
- [7] ARASE ME et ARASE T "Correlation of ambient sea noise", JASA, Vol 40/1, 205-210, 1966
- [8] KERMAN B.R "Sea surface sound - Natural mechanisms of surface generated noise in the ocean", NATO ASI series, Kluwer Academic Publishers
- [9] WILSON J.H "Wind generated noise modelling", JASA, Vol 73.1, 211-216, 1983
- [10] WENGERG H. "Navy Interim Surface Ship Model (NISSM) II, NUC Report n 372, 1973
- [11] SCHULKIN M. and MARSH H.W "Absorption of sound in sea water", JASA, 34 : 864, 1962

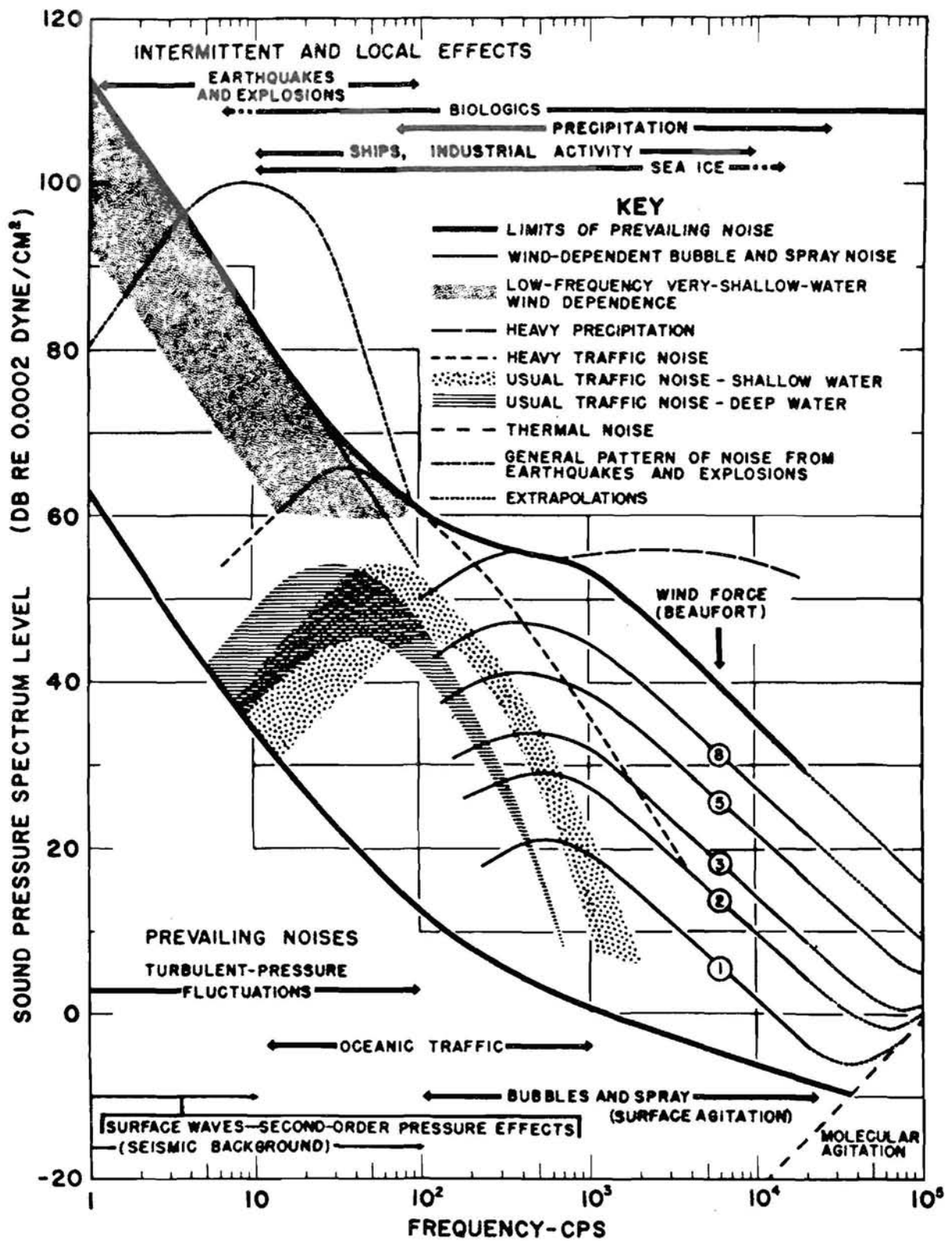
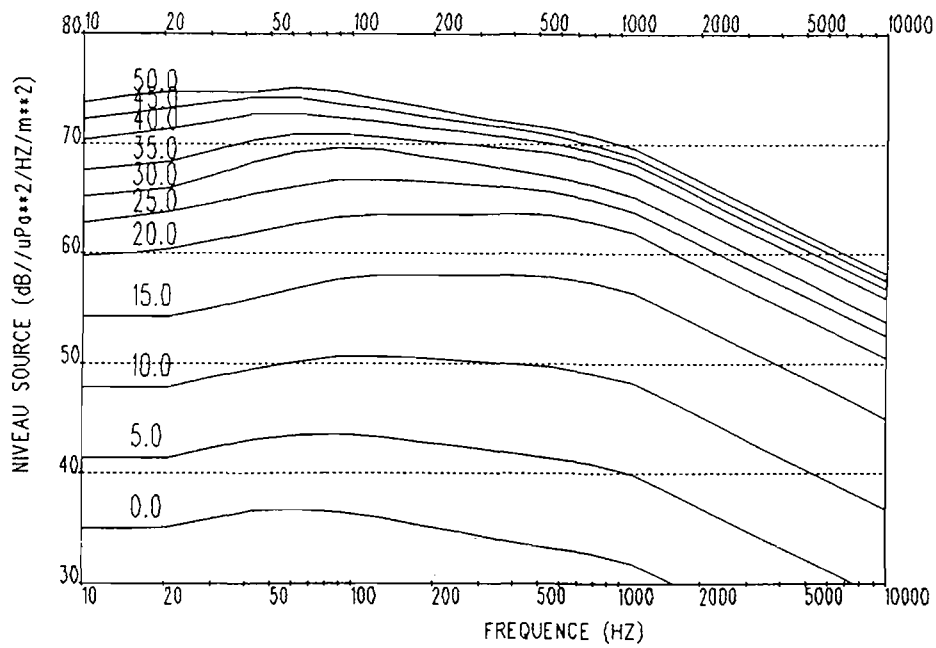


FIGURE 1 - MODELE DE BRUIT AMBIANT DE WENZ - TIRE DE [1]



Densité surfacique de puissance des sources
 pour plusieurs vitesses de vent (noeuds)
 Extrapolation d'après les résultats de J.H WILSON JASA,73,No1,1983

**FIGURE 2 - DENSITE SPECTRALE ET SURFACIQUE DU BRUIT A
 L'EMISSION - D'APRES WILSON [9]**

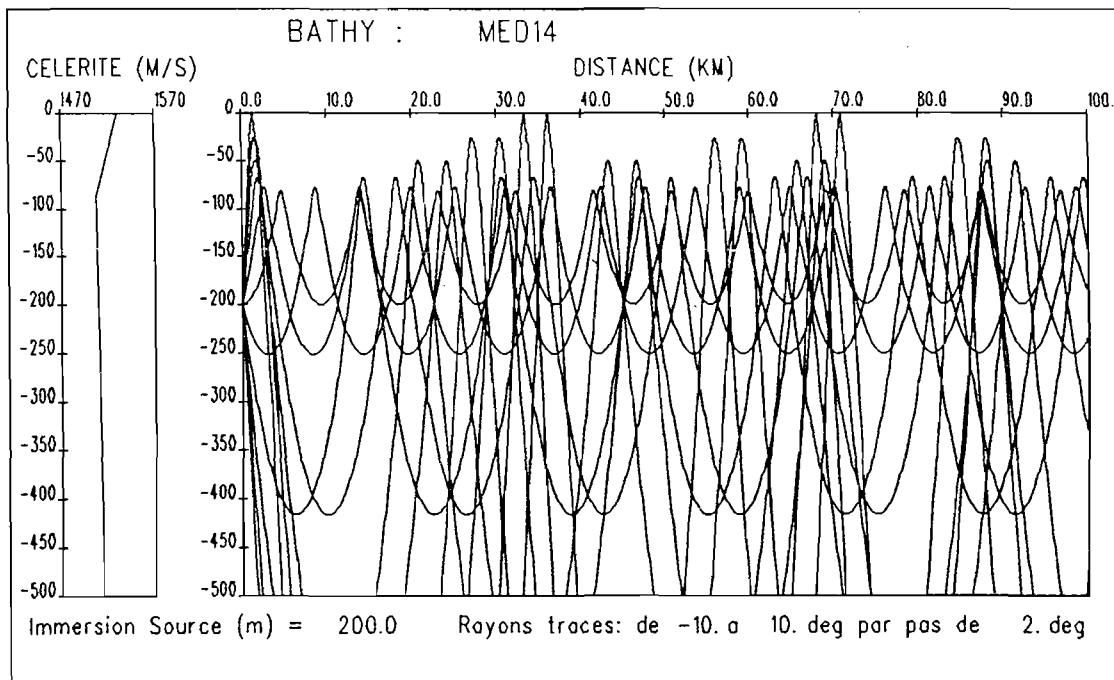


FIGURE 3 - TRACÉ DE RAYONS - MÉDITERRANÉE EN ÉTÉ

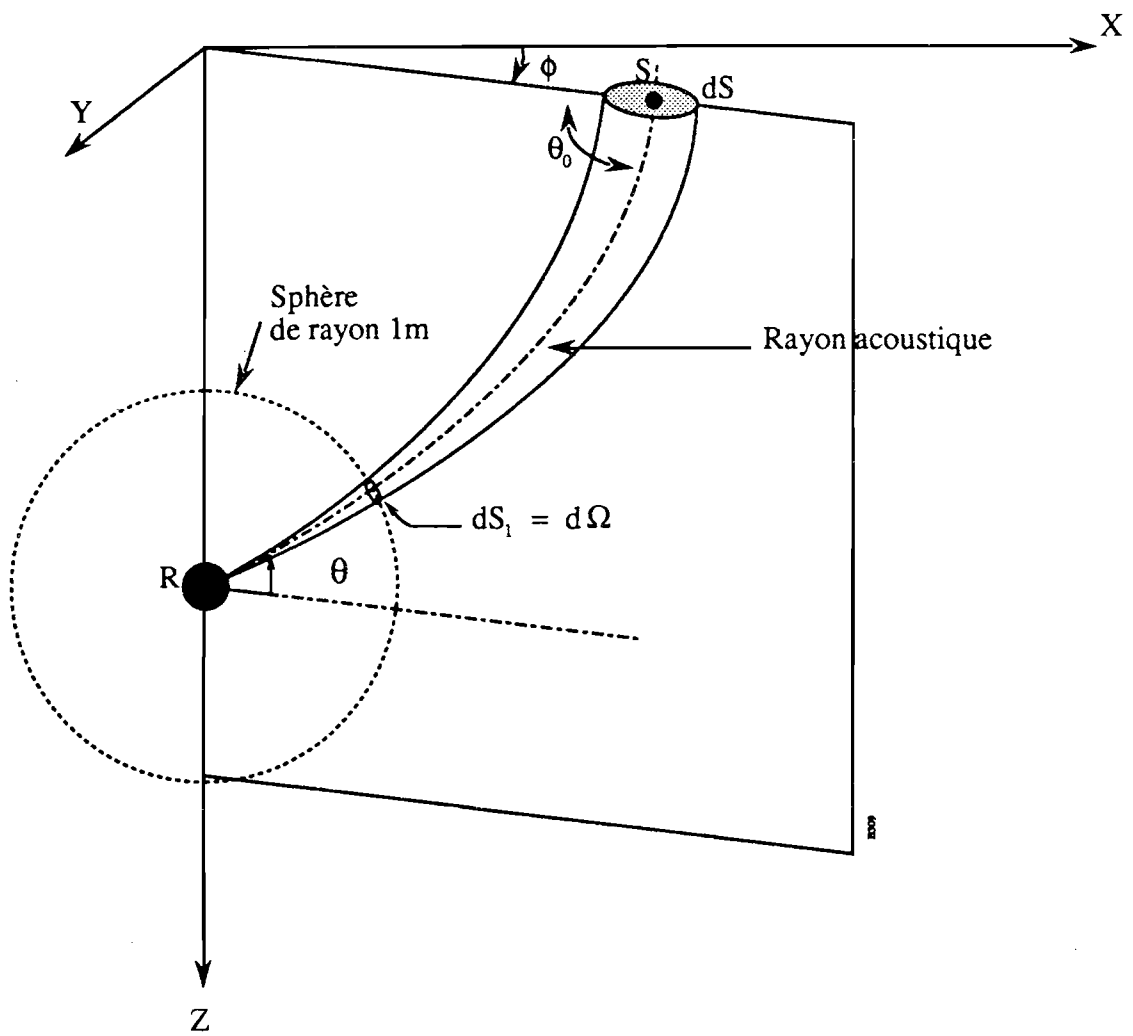
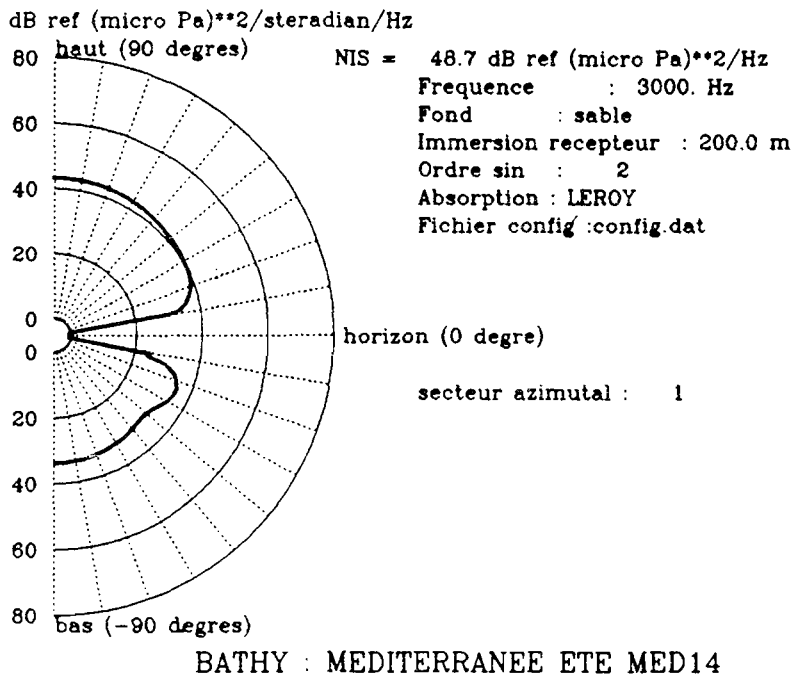


FIGURE 4 - ELEMENTS GEOMETRIQUES POUR LE CALCUL DE LA DENSITE ANGULAIRE DE PRESSION QUADRATIQUE

DIRECTIVITE DU BRUIT AMBIANT



DIRECTIVITE DU BRUIT AMBIANT

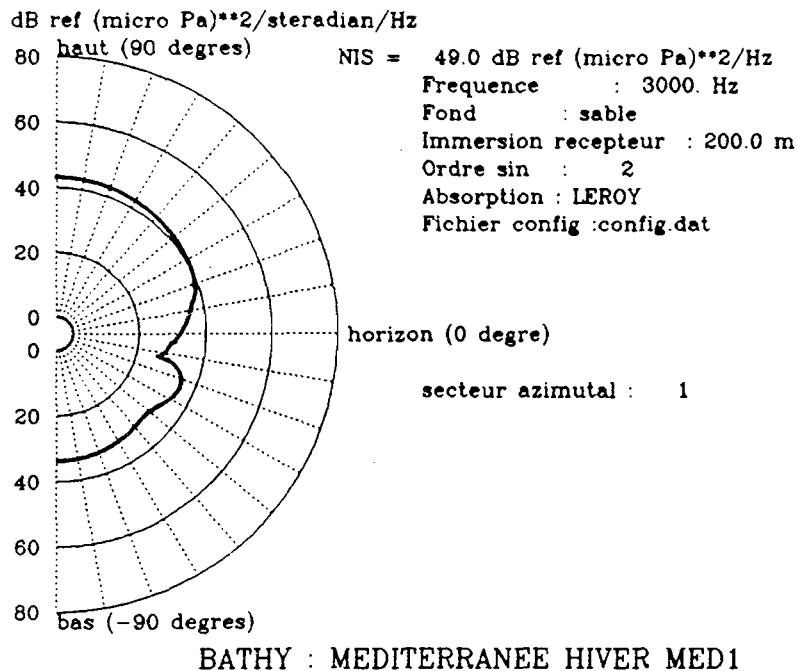
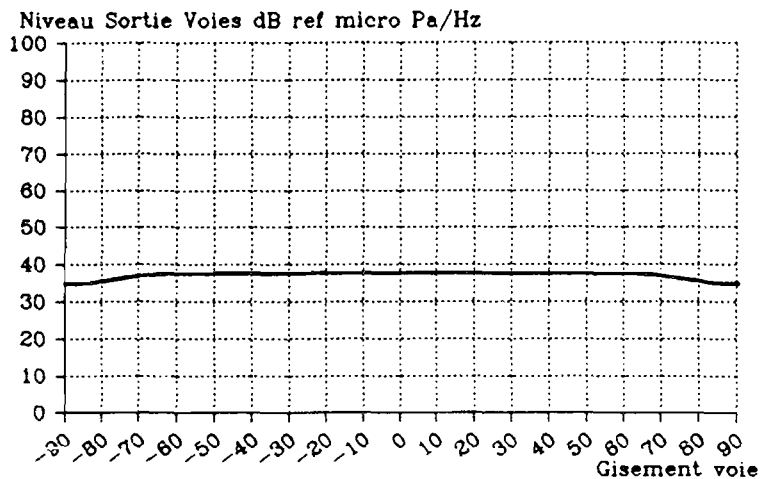


FIGURE 5 - EFFET DES CONDITIONS DE PROPAGATION SUR LA DIRECTIVITE VERTICALE DU BRUIT DE SURFACE

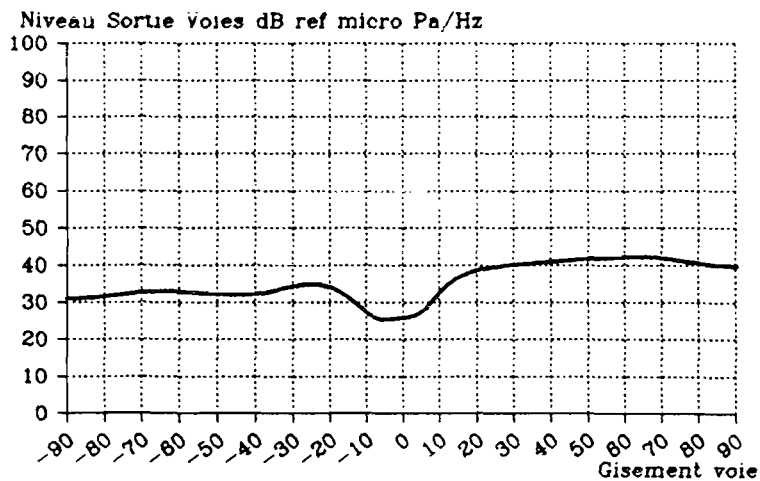
BRUIT ISOTROPE - FORMATION DE VOIES



NIS (dB) = 48.7

Fichier configuration : config.dat
 Frequence : 3000.0 Hz Azimut antenne : 0.0 deg
 Nombre de capteurs : 18 Site antenne : 90.0 deg
 Distance intercapteurs : 0.2 m
 Ponderation : sans

BRUIT DE SURFACE - FORMATION DE VOIES



NIS (dB) = 48.7 BATHY : MEDITERRANEE ETE MED14

Fichier configuration : config.dat
 Frequence : 3000.0 Hz Azimut antenne : 0.0 deg
 Nombre de capteurs : 18 Site antenne : 90.0 deg
 Distance intercapteurs : 0.2 m
 Ponderation : sans

FIGURE 6 - EFFET DES CONDITIONS DE PROPAGATION SUR LE BRUIT EN SORTIE DE FORMATION DE VOIES