

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

29/1



NICE du 26 au 30 AVRIL 1977

ÉTUDE DES PERFORMANCES ANGULAIRES DE DIVERS SYSTÈMES SONAR
BIOLOGIQUES AÉRIENS À L'AIDE D'UN MODÈLE DE RÉCEPTEUR
INTERFÉROMÉTRIQUE : IMAGERIE ET IDENTIFICATION DES CIBLES

C. BARD (1), M. CHIOLLAZ (2), J.A. SIMMONS (3)
Y. TUPINIER (4)

(1) Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques (associé au CNRS), INPG Grenoble

(2) Service Traitement du Signal, Institut de Chimie et Physique Industrielle de Lyon

(3) Psychologie Dept. University Washington, ST. LOUIS, U.S.A.

(4) Département de Zoologie, Université Claude Bernard, VILLEURBANNE

RESUME

L'interprétation des performances angulaires obtenues par diverses chauve-souris, compte tenu des données existantes, conduit à un modèle de réception spatio-temporel du type interférométrique. Les diverses contraintes spatiales sur les antennes de réception de l'animal et sur l'encombrement spectral de son émission posent le problème de l'équivalence "espace-fréquence" et du "remplissage spectral" d'une bande donnée au niveau de performances imposé. L'étude de diverses espèces montre que les réalisations naturelles utilisent divers types d'émissions pour profiter pleinement de cette équivalence. L'étude par simulation d'un cas réel d'imagerie et d'identification d'une cible par un animal de performances connues montre les possibilités d'un tel modèle de récepteur. Dans ce cas l'émission SONAR de l'animal est modulée homographiquement en fréquence ; elle possède des propriétés remarquables de tolérance à l'effet DOPPLER, de discrimination temporelle, ainsi que d'identification spectrale des échos.

SUMMARY

The interpretation of the angular performances obtained by different bats, taking into account the existing facts, leads to a spatiotemporal receiver model of the interferometric type.

The various spatial restraints on the reception antennae of the animal and on the spectral width of its transmission pose the problem of the "space frequency equivalence and of the spectral fitting" of a given band, on the level of prescribed performance. The study of different species shows that natural productions use different types of transmission in order to profit fully from this equivalence. The study by simulation of a real instance of imagery and identification of a target by an animal of known performance shows the possibility of such a receiver model. In this case, the sonar transmission of the animal is homographically modulated in frequency ; it possesses remarkable characteristics of tolerance to the DOPPLER effect of temporal discrimination, as well as of spectral identification of echoes.



1 - INTRODUCTION

Les interféromètres radioélectriques ou acoustiques à corrélation, constitués de deux capteurs non ponctuels suivis d'un multiplicateur et d'un filtre passe bas, présentent une réponse angulaire qui dépend de la géométrie du système d'antenne, des lois de pondération d'ouverture ainsi que des propriétés spectrales des signaux incidents et des gains complexes des amplificateurs de voies.

L'hypothèse selon laquelle ce mode de traitement cohérent serait effectué par le système SONAR de réception des chauves-souris semble confirmée par les performances angulaires relevées chez ces animaux [1, 2].

Nous montrerons dans cette étude qu'on peut trouver une équivalence entre une antenne linéaire recevant un signal monochromatique et un interféromètre à deux capteurs recevant un signal présentant une certaine complexité fréquentielle.

Les chauves-souris profitent pleinement de cette propriété d'équivalence espace-fréquence, en compensant les contraintes spatiales dues à la géométrie naturelle du système de réception par divers types d'émission, plus ou moins riches en fréquences selon les performances désirées.

2 - MODELISATION DU SYSTEME DE RECEPTION

L'hypothèse d'un traitement angulaire cohérent du type interférométrique semble pleinement vérifiée par des expériences plus ou moins récentes où les résultats pratiques corroborent parfaitement les résultats théoriques [3].

Le modèle choisi (fig. 1) est un interféromètre à corrélation constitué de 2 antennes de dimensions l , la distance des centres étant D et l'encombrement total L .

Les deux antennes sont caractérisées par leurs fonctions de transfert respectives $H_{A1}(f, u)$ et $H_{A2}(f, u)$. Les deux voies associées comportent des filtrages linéaires caractérisés par les fonctions de transfert $H_{R1}(f)$ et $H_{R2}(f)$.

Derrière le multiplieur, le signal subit un filtrage passe-bas caractérisé par la fonction de transfert $H_F(f)$.

3 - REPONSE ANGULAIRE

La valeur moyenne du signal de sortie de l'interféromètre constituera la réponse angulaire du système.

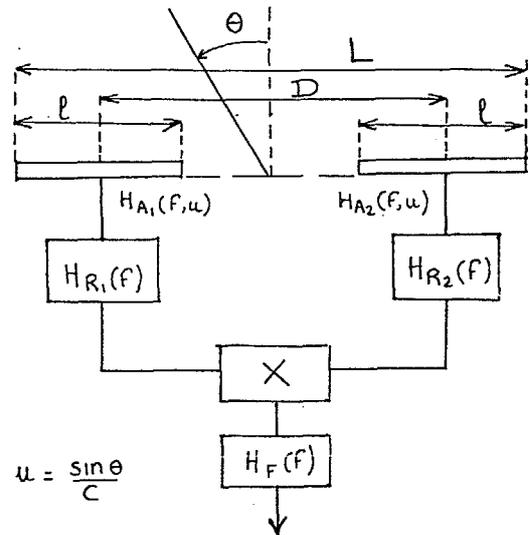


Figure 1 : Interféromètre à corrélation

Son expression est la suivante :

$$R(u) = K_1 \int_R \gamma_S(f) H_{R1}(f) H_{R2}^*(f) H_{A1}(f, u) H_{A2}^*(f, u) e^{j2\pi fuD} df \quad (1)$$

avec $K_1 = H_F(0)$ et $\gamma_S(f)$: densité spectrale du signal incident.

$$u = \frac{\sin \theta}{c} \quad \theta \text{ angle d'incidence du signal reçu.}$$

Si les deux antennes sont identiques, ainsi que les voies correspondantes, on obtient :

$$R(u) = K_1 \int_R \gamma_S(f) \cdot |H_R(f)|^2 |H_A(f, u)|^2 \cos 2\pi fuD \cdot df \quad (2)$$

En supposant que le gain des filtres de voie est une constante réelle dans la bande de fréquence occupée par le signal incident et que les antennes sont à loi de pondération continue équiphase et rectangulaire, on obtient l'équation simplifiée suivante [4] :

$$R(u) = K_2 \int_R \gamma_S(f) \frac{\sin^2 \pi fu l}{(\pi fu)^2} \cos 2\pi fuD \cdot df \quad (3)$$

4 - EQUIVALENCE ESPACE-FREQUENCE

Considérons un interféromètre à deux antennes ponctuelles :

$$a(\xi) = \alpha \delta(\xi) \quad A(v) = \alpha \\ \Rightarrow R(u) = \alpha^2 \int_R \gamma_S(f) \cdot \cos 2\pi fuD \cdot df$$

et prenons le cas où la densité spectrale du signal incident est constituée de raies (celles-ci étant repérées par rapport à une fréquence f_0 qui peut être celle d'une porteuse)

$$\gamma_S(f) = \frac{1}{2} \sum_p \beta_p [\delta(f - f_0 - \nu_p) + \delta(f + f_0 + \nu_p)] \quad (4)$$

la réponse angulaire est alors la suivante :

$$R(u) = \alpha^2 \sum_p \beta_p \cos 2\pi (f_0 + \nu_p) u D$$

c'est-à-dire, en normant par rapport à la valeur à

ETUDE DES PERFORMANCES ANGULAIRES DE DIVERS SYSTEMES SONAR
 BIOLOGIQUES AERIENS A L'AIDE D'UN MODELE DE RECEPTEUR INTERFEROMETRIQUE :
 IMAGERIE ET IDENTIFICATION DES DIBLES

l'origine :

$$\frac{R(u)}{R(o)} = \frac{\sum_p \beta_p \cos 2\pi(f_o + \nu_p)uD}{\sum_p \beta_p} \quad (5)$$

en particulier, pour un signal monochromatique de fréquence f_o , on a :

$$\frac{R(u)}{R(o)} = \cos 2\pi f_o u D \quad (6)$$

Il est intéressant de comparer ces deux derniers résultats, à ce que donnerait comme réponse angulaire une antenne-réseau raccordée à un récepteur linéaire ; la réponse angulaire est alors caractérisée, à la fréquence f_o , par le module de la fonction de transfert de l'antenne, c'est-à-dire, pour un réseau équiphase, par :

$$|H_A(u)| = |A(f_o u)|$$

Considérons une antenne réseau formée de deux groupements de capteurs ponctuels symétriques par rapport à l'origine o , les capteurs étant repérés dans chaque groupement par rapport à un capteur particulier à l'abscisse x_o ou $-x_o$:

$$a(x) = \frac{1}{2} \sum_p \alpha_p [\delta(x-x_o-\xi_p) + \delta(x+x_o+\xi_p)]$$

Cette distribution de capteurs sur l'axe ox est semblable à celle des raies spectrales sur l'axe des fréquences dans l'exemple précédent (4). On a :

$$a(x) \hat{=} A(\nu) = \frac{1}{2} \sum_p \alpha_p [e^{-j2\pi\nu(x_o+\xi_p)} + e^{j2\pi\nu(x_o+\xi_p)}]$$

la réponse angulaire est donc, pour un signal monochromatique de fréquence f_o , en valeur normée :

$$\frac{|H_A(u)|}{|H_A(o)|} = \frac{\sum_p \alpha_p \cos 2\pi f_o u (x_o + \xi_p)}{\sum_p \alpha_p} \quad (7)$$

en particulier, si le réseau ne comporte que deux capteurs ponctuels d'abscisses x_o et $-x_o$, on a :

$$\frac{|H_A(u)|}{|H_A(o)|} = \cos 2\pi f_o u x_o \quad (8)$$

La comparaison des formules (6) et (8) met en évidence le résultat connu, selon lequel la technique interférométrique, appliquée au cas de deux capteurs ponctuels en monochromatique, fait gagner un rapport deux sur l'encombrement du système d'antenne, par rapport à la méthode de réception purement linéaire avec combinaison additive des signaux de capteurs (à réponse angulaire identique).

Plus généralement, le rapprochement des formules (5) et (7) permet d'établir une équivalence entre un interféromètre à deux capteurs ponctuels, recevant un

signal dont la densité spectrale est constitué de raies, et un réseau de deux groupements de capteurs avec combinaison additive fonctionnant en monochromatique. Les formules d'équivalence sont :

$$\alpha_p = \beta_p, \quad \frac{\nu_p}{f_o} = \frac{\xi_p}{D}, \quad \forall p$$

De plus, on a la condition $x_o = D$, à savoir : le système linéaire est au moins deux fois plus encombrant que

l'interféromètre à corrélation.

Mise à part cette différence essentielle d'encombrement, il apparaît qu'un même résultat peut être obtenu, soit au prix d'une certaine complexité spatiale de l'antenne-réseau, soit au prix d'une complexité fréquentielle équivalente, relative à la densité spectrale du signal reçu par l'interféromètre. Cette équivalence espace-fréquence a été signalée succinctement en 1958 par KOCK et STONE [4]. Elle est illustrée sur un exemple particulier par la figure (2).

Lorsqu'on est maître du signal incident, ce qui est le cas de la détection active, il peut être particulièrement avantageux d'exploiter la méthode interférométrique avec "complexité fréquentielle", qui présente un double avantage pratique :

- simplicité du système d'antenne réduit à deux capteurs,
- gain d'encombrement dans un rapport supérieur à deux.

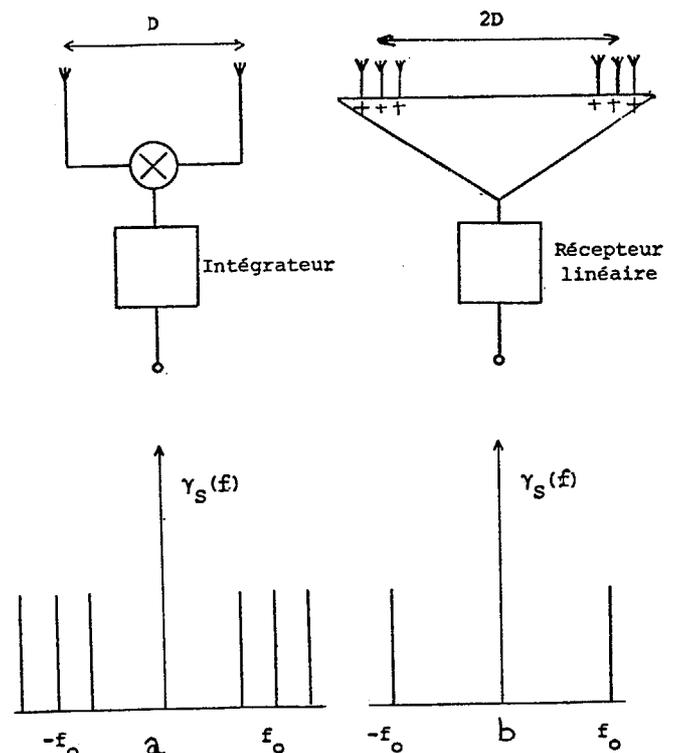


Figure 2 : Deux systèmes équivalents (réponses angulaires identiques) :
 a/ interféromètre à corrélation
 b/ système linéaire.



Cependant il peut s'avérer impossible d'enrichir suffisamment la bande spectrale du signal vers les fréquences basses de manière à éviter une lacune au voisinage de l'origine ; le système linéaire équivalent est alors une antenne lacunaire à laquelle manquent des éléments au voisinage du centre et il s'ensuit un effet néfaste sur l'ambiguïté angulaire (remontée du niveau de lobes secondaires). Cet effet peut être corrigé en utilisant un système mixte dans lequel on introduit une certaine "complexité spatiale" : c'est l'interféromètre à deux antennes (continues ou du type réseaux) étendues dont nous avons fait la théorie dans une autre étude [2] et dont nous examinerons quelques exemples typiques relatifs aux chauves-souris.

5 - APPLICATIONS

Le pouvoir séparateur de l'antenne linéaire est essentiellement déterminé par la distance des centres des 2 groupements de capteurs. Il est amélioré si l'on élargit l'antenne par l'addition d'éléments supplémentaires ou si l'on favorise le poids attaché aux éléments extérieurs.

Augmenter la dimension de l'antenne, par l'addition d'éléments, ou favoriser le remplissage interne ou le poids attaché aux éléments internes (cas de la pondération d'ouverture triangulaire) provoquent l'amortissement des pics d'ambiguïté secondaires.

La chauve souris ne pourra pas agir sur ces facteurs géométriques, mais elle arrivera à des résultats semblables en agissant sur la configuration spectrale du signal émis, puis reçu par son système de réception interférométrique.

Ainsi étendre la bande spectrale vers les hautes fréquences ou favoriser la densité liée à ces mêmes fréquences améliorera le pouvoir séparateur.

Élargir la bande spectrale (particulièrement vers les basses fréquences) ou favoriser le poids énergétique de ces mêmes fréquences se traduira par l'amortissement des lobes secondaires.

Nous allons vérifier ces propriétés en considérant l'effet de la géométrie du système de réception, ainsi que la configuration spectrale du signal émis, sur la réponse angulaire pour un certain nombre de chauves-souris.

6 - RESULTATS

6.1 - *Myotis mystacinus*

Cette chauve-souris a une vitesse de vol basse (< 4 m/s). Parmi les C.S. considérées *Myotis mystacinus* est celle qui présente les performances les plus limitées en résolution angulaire (fig. 3.2, courbes a et b). Ceci est lié à la petite géométrie de son système de réception ($D = 8$ mm) et à une émission à bande étroite (fig. 3.1, courbes a et b). Les signaux ont été enregistrés alors que l'animal volait dans une cage de 3 m³.

Les courbes c et d correspondent aux performances des signaux émis pendant le décollage. L'émission plus basse en fréquence se traduit par une détérioration du pouvoir séparateur et par une atténuation des lobes latéraux.

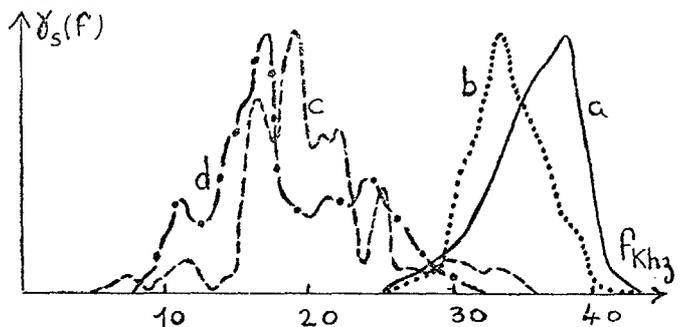


Figure 3.1 - Densités spectrales

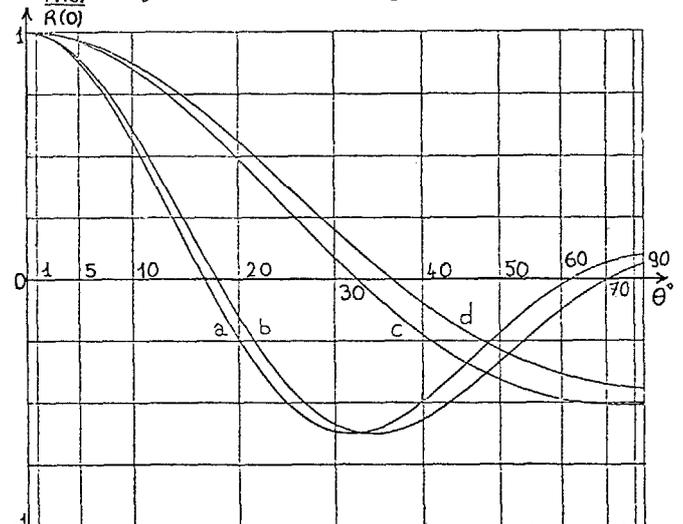


Figure 3.2 - Réponses angulaires

FIGURE 3 - *Myotis mystacinus*

6.2 - *Miniopterus schreibersi* :

Miniopterus chasse à grande vitesse (20 m/s) des insectes en vol, dans des espaces vastes (allées forestières...), en déviant peu de sa trajectoire. La densité spectrale des signaux émis (fig. 4.1) est du même type que la précédente (fig. 3.1, courbes a et b). Mais la distance interférométrique plus grande du système de réception ($D = 13$ mm) améliore le pouvoir séparateur (fig. 4.2).



ETUDE DES PERFORMANCES ANGULAIRES DE DIVERS SYSTEMES SONAR
BIOLOGIQUES AERIENS A L'AIDE D'UN MODELE DE RECEPTEUR INTERFEROMETRIQUE :
IMAGERIE ET IDENTIFICATION DES CIBLES

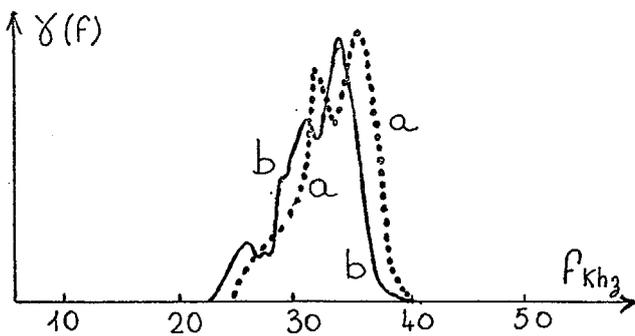


Figure 4.1 - Densités spectrales

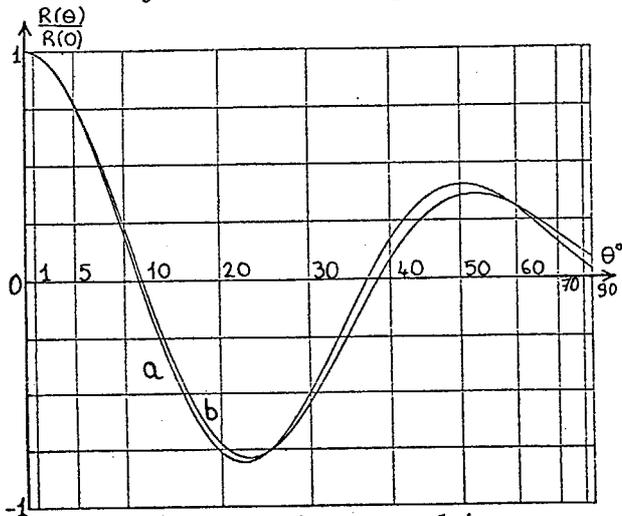


Figure 4.2 - Réponses angulaires

FIGURE 4 - *Miniopterus schreibersi*.

6.3 - *Mégaderma lyra*

Cet animal, plus gros que les précédents ($D = 23\text{mm}$) vole lentement lors d'une phase de détection ou d'acquisition d'informations, puis fond à grande vitesse sur sa proie (petits mammifères ou batraciens). Il devra lutter contre le diffus (feuillage); ses signaux à large bande lui permettront une bonne résolution en distance.

Les courbes c,d,e (fig 5.1) correspondent à des signaux de poursuites constitués de 2 bandes de fréquences, la plus élevée est responsable du pouvoir séparateur, alors que la plus basse atténue les pics d'ambiguïté secondaires (fig 5.2).

Les courbes a, correspondent à une émission de même configuration que la précédente, mais à fréquence beaucoup plus élevée, ce qui se traduit par un excellent pouvoir de résolution. La partie basses fréquences est responsable d'une atténuation très prononcée des lobes secondaires.

Enfin sur les courbes b, qui correspondent à une absence de basses fréquences qui ont pour rôle de diminuer l'ambiguïté angulaire, on observe une recrudescence de la hauteur des lobes latéraux.

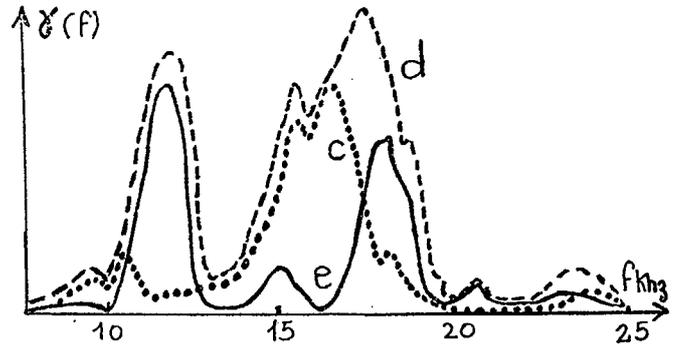


Figure 5.1 - Densités spectrales

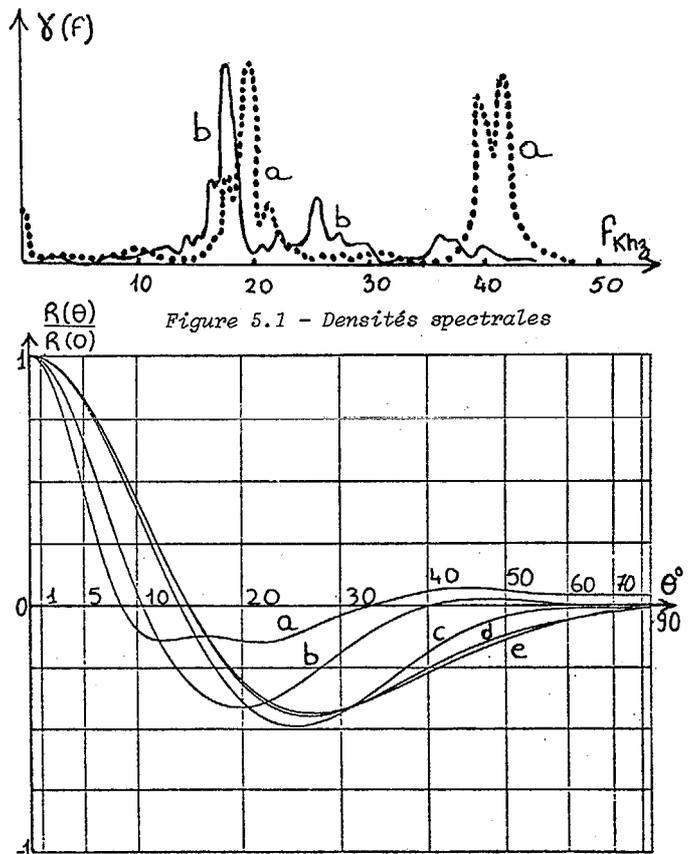


Figure 5.2 - Réponses angulaires

FIGURE 5 - *Mégaderma lyra*

6.4 - *Eptesicus fuscus* ($D = 15\text{mm}$)

Pour effectuer une imagerie spatio fréquentielle, cette chauve-souris émet un harmonique 2 de poids élevé, d'où l'excellent pouvoir séparateur observé sur la courbe a (fig. 6.2).

6.5 - *Vampyrum spectrum* ($D = 40\text{mm}$)

C'est la plus grosse chauve-souris considérée.

Sur la figure 7, nous voyons que l'émission d'harmoniques élargit la bande spectrale vers les hautes fréquences et se traduit par une amélioration très nette de la réponse angulaire.

7 - PROPRIETES DUES A LA MODULATION DE FREQUENCE DES SIGNAUX

Mis à part le cas de *Mégaderma lyra* qui module par commutation de fréquence, tous les autres animaux étudiés émettent des signaux à modulation homographique



ETUDE DES PERFORMANCES ANGULAIRES DE DIVERS SYSTEMES SONAR
BIOLOGIQUES AERIENS A L'AIDE D'UN MODELE DE RECEPTEUR INTERFEROMETRIQUE :
IMAGERIE ET IDENTIFICATION DES CIBLES

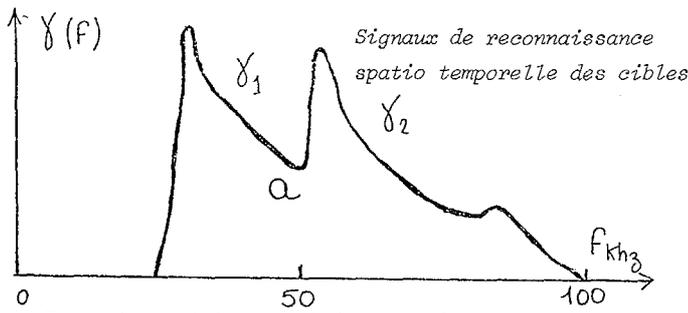


Figure 6.1 - Densité spectrale

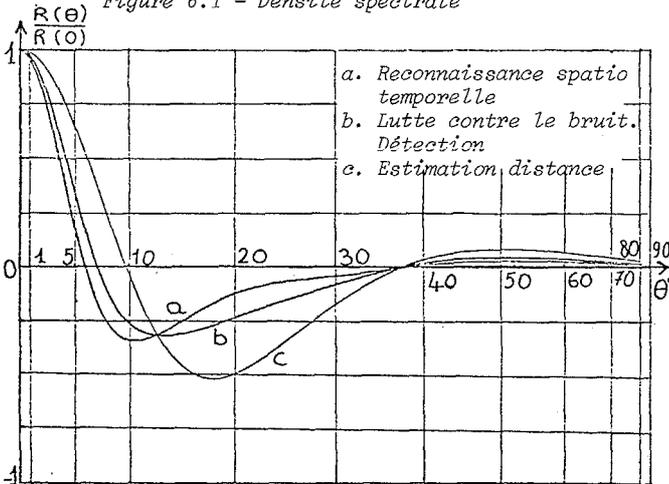


Figure 6.2 - Réponses angulaires

FIGURE 6 - Eptesicus fuscus

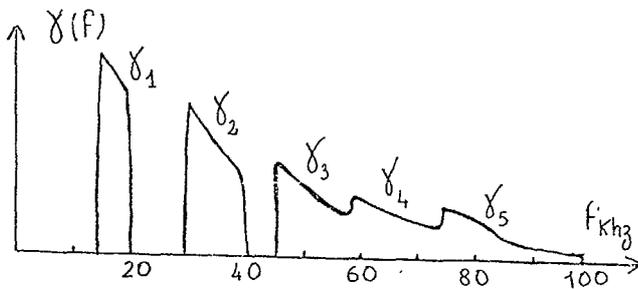


Figure 7.1 - Densité spectrale

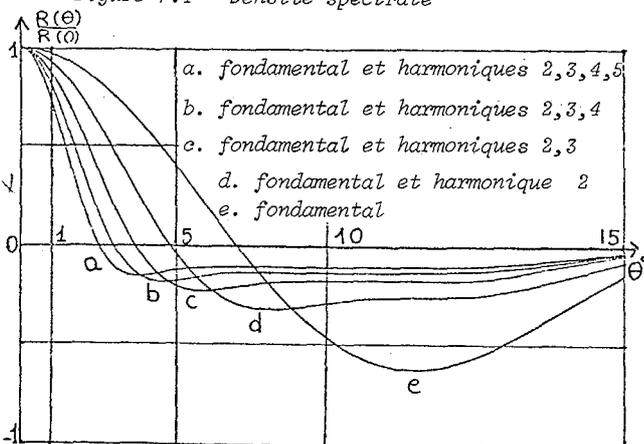


FIGURE 7 - Vampyrum spectrum

en fréquence. Rappelons que, dans un précédent article [7], nous avons montré que la trace du maximum de la fonction d'ambiguïté dans le plan retard Doppler est une droite d'équation $\tau_M(\eta) = \frac{T}{\alpha-1}(1-\eta)$ si le produit bande-durée est grand devant l'unité.

La figure 9 représente les traces $\tau_M(\eta)$ pour les signaux précédemment considérés et dont les caractéristiques sont données figure 8.

	DUREE D'EMISSION	LARGEUR DE BANDE	B.T	$\alpha = \frac{f_{max}}{f_{min}}$
VAMPYRUM SPECTRUM (Veille)	20 ms	5 KHz	100	1,3
EPTESICUS (Veille)	8 ms	20 KHz	160	2
FUSCUS (Identification)	1 ms	20 KHz	20	2
(volence)				
MYOTIS { a	0,43ms	16 KHz	8	1,5
MYSTACINUS { b	0,55ms	16 KHz	9	1,6
Envol { c	4,8ms	6 KHz	30	1,8
Envol { d	1,3ms	12 KHz	15	2
MINIOPTERUS a	1,2ms	20 KHz	26	1,9
SCHREIBERSI b	1,3ms	19 KHz	22	1,9

Figure 8

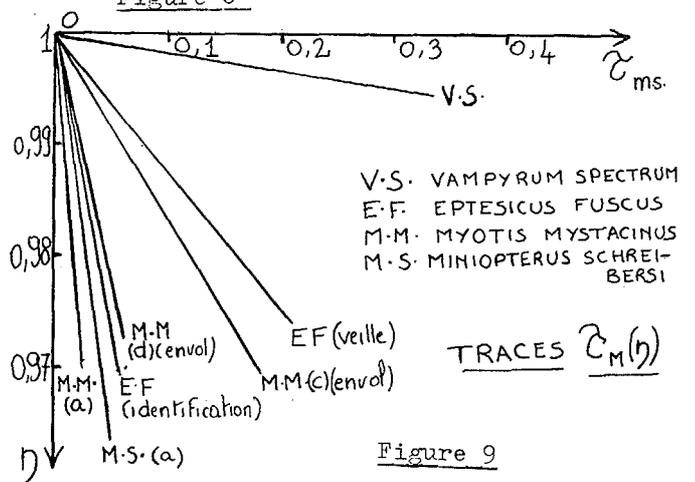


Figure 9

Il faut remarquer que cette trace τ_M est peu inclinée pour les signaux de poursuite par rapport à l'axe η et qu'il en est de même pour les signaux d'identification des cibles, comme le montre les travaux dus à J.W. Bradbury, signaux émis entre 100 KHz et 60 KHz et de durée de l'ordre de 0,5 à 0,8 ms à modulation hyperbolique.

Ces signaux permettent l'identification de cibles telles que des ellipsoïdes de révolution de facteur d'excentricité égal à 3 (petit axe 2,5 cm, grand axe 7,5 cm) comme le montre une simulation de cette expérience réalisée au laboratoire d'acoustique du CNRS de Marseille, dont les résultats sont représentés fig. 10. Le gain complexe équivalent à la réflexion sur la cible est fonction de l'attitude de celle-ci, le paramètre

ETUDE DES PERFORMANCES ANGULAIRES DE DIVERS SYSTEMES SONAR
BIOLOGIQUES AERIENS A L'AIDE D'UN MODELE DE RECEPTEUR INTERFEROMETRIQUE :
IMAGERIE ET IDENTIFICATION DES CIBLES

angulaire intervenant sur le taux de peignage du gain complexe et sur l'apparition de certaines fréquences de résonances.

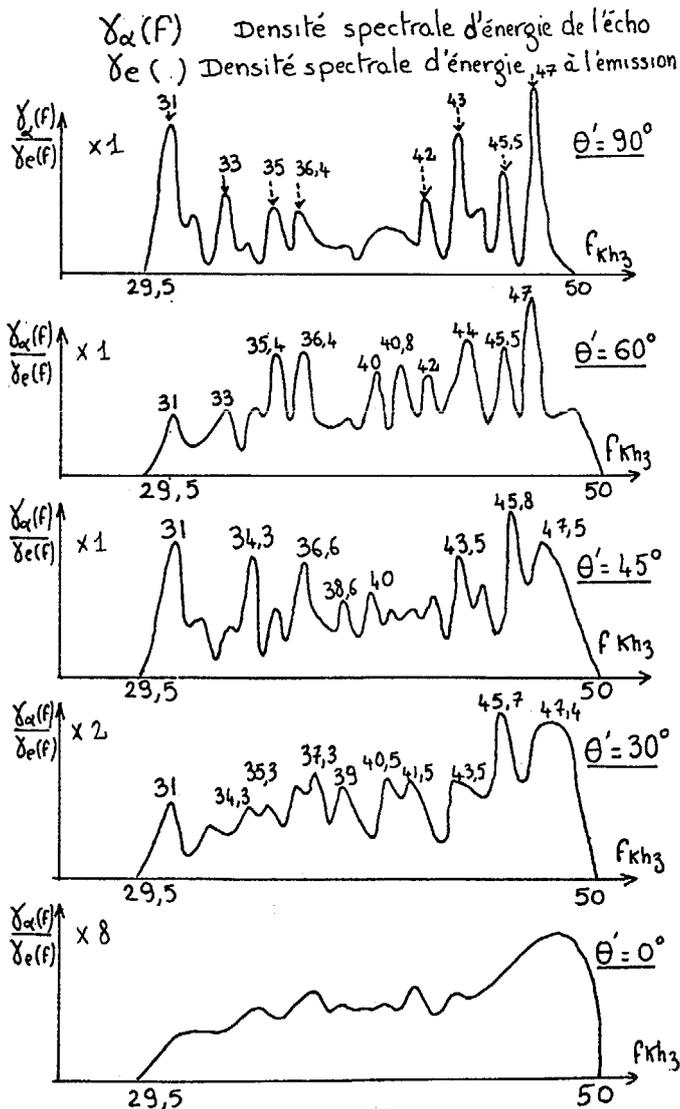
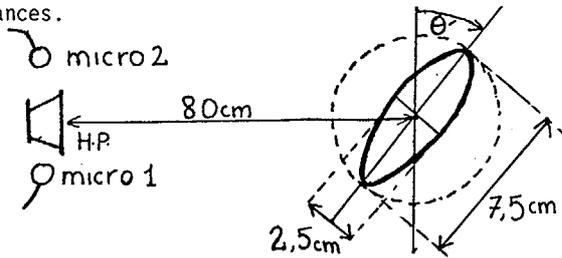


FIGURE 10

CONCLUSION

L'équivalence espace-fréquence semble vérifiée dans les cas considérés, sans restriction sur la possibilité d'émission par les animaux de signaux de performance encore plus élevée.

Chaque animal semble adapter ces performances de résolution angulaire et de résolution en distance aux conditions S.O.N.A.R. qui lui sont imposées par l'environnement.

A part *Mégaderma Iyra*, tous émettent des signaux à modulation hyperbolique et profitent pleinement de la tolérance à l'effet Doppler ; et considérant la largeur des bandes émises, on peut penser que les animaux réalisent une imagerie angulaire et spectrale des cibles qu'ils poursuivent.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été fait dans le cadre du groupe d'étude des sonars biologiques (GESB). Les auteurs tiennent à remercier leurs collègues pour leur participation aux différents essais et désirent plus particulièrement remercier K. Beuter pour les données qu'il a si obligeamment communiquées aux membres du groupe.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - T.C PEFF, J.A. SIMMONS - Journ. Acoust. Soc. Am. Vol. 51, n° 6, t. 2, p. 2063, 1972
- [2] - C. BARD - Thèse de docteur Ingénieur INPG GRENOBLE 1976
- [3] - J.A. SIMMONS, C. BARD - Science. A paraître 1977
- [4] - W.E. KOCK, J.L. STONE - Space-frequency equivalence Proc. I.R.E., 46, 499 1958
- [5] - K. BEUTER - Neuro Rezeptorphysiologie J.W. Goethe-Universität Frankfurt am Main communication privée Rapport I.C.P.I. n° TS7504
- [6] - M. BEROUJON, B. ESCUDIE, A. HELLION, J.A. SIMMONS, C. BARD - Performances de certains signaux SONAR animaux. Colloque GRETSI p. 393 1975

