



TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

Nice 7 au 12 mai 1973

COMPARAISON ENTRE CERTAINS SIGNAUX OPTIMAUX A GRAND BT
ET CEUX UTILISES PAR LES CHAUVES SOURIS

B. ESCUDIE^x et A. HELLION^x

RESUME

Après avoir indiqué comment l'étude des propriétés spectrales des signaux à grand produit BT peut s'appliquer aux signaux SONAR des chauve-souris l'exposé souligne :

la concordance étroite entre les signaux optimaux définis dans le cas de l'effet Doppler et dans celui de l'effet d'accélération et ceux employés par certaines chauve-souris.

des propriétés remarquables des signaux SONAR animaux, en présence de cibles à grande distribution spatiale, et lors de leur identification.

L'étude des signaux SONAR des chauve-souris dits "signaux Diversité" met en relief des propriétés intéressantes que corroborent le comportement des animaux. Enfin l'examen de diverses expériences récentes suggère quelques explications sur le pouvoir de résolution angulaire qu'obtiennent les chauve-souris et un modèle possible de leur système de réception.

SUMMARY

After having shown how the study of the spectrum properties of the signals with a great product BT can be applied to the SONAR signals of bats the expose points out :

- the close concordance between the optimal signals determined in the case of the DOPPLER effect and in that of the acceleration effect and the signals used by some bats.

- The remarkable properties of the SONAR animal signals when in presence of targets with a wide space distribution and at the moment of their identification.

The study of the SONAR signals from bats (called "Diversity signals") shows interesting properties that corroborate the animals' behaviour. At last the examination of various recent experiments suggests some explanations about the acuity angular resolution that bats get and a possible pattern of their system of reception.

* Institut de Chimie et physique Industrielles - Laboratoire de
Traitement du Signal - 25, rue du Plat 69288 LYON. CEDEX 1.

COMPARAISON ENTRE CERTAINS SIGNAUX OPTIMAUX A GRAND BT
ET CEUX UTILISES PAR LES CHAUVES SOURIS

B. ESCOFFIER et A. HELLON

ETUDE DES SIGNAUX A GRAND COEFFICIENT BT :

a) Propriétés, tolérance à l'effet Doppler et à l'effet d'accélération :

Les résultats obtenus par J.A. SIMMONS (1) (2) (3) sur la résolution en distance qu'obtiennent les chauve souris suggèrent que le traitement des échos par l'oreille de ces animaux, soit très analogue au filtrage adapté ou traitement par corrélation avec une copie du signal émis. Dans cette perspective, l'emploi par diverses chauve-souris (*Myotis lucifugus*, *Lasiurus borealis* (4), *Noctilio leporinus* (5),) de signaux de veille et de navigation à grand coefficient BT pose le problème de l'étude des performances SONAR de tels signaux à l'aide de la fonction d'ambiguïté ou de la fonction de corrélation, utilisant le fait que ces signaux de durée T et occupant une bande spectrale B sont tels que $BT \gg 1$ et l'existence du procédé de calcul dit "de phase stationnaire" (6a) on peut obtenir l'expression asymptotique ($BT \gg 1$) de la fonction de corrélation et de la densité spectrale de ce signal (6b). Ce calcul a été effectué pour les signaux de veille de *Myotis lucifugus* et de *Lasiurus borealis* compte tenu des données expérimentales (4). Le signal $S(t)$ s'écrit :

$$S(t) = \underbrace{F_T(t)}_{\substack{\text{enveloppe} \\ \nu_i \text{ fréquence instantanée } (\neq)}} \cos \underbrace{\Phi_i(t)}_{\text{phase instantanée}} \quad \Phi_i(t) = 2\pi \int_{-\infty}^t \nu_i(\theta) d\theta$$

Le tableau I résume les données pour les signaux étudiés.

Type C.S.	MYOTIS Luc.	LASIURUS boreal.
$F_T(t)$	$\frac{k}{\sqrt{t}} J_7(\beta t)$ $\beta = 2581 \text{ Hz}$ $T = 4,83 \text{ ms}$	$\frac{k}{\sqrt{t}} J_7(\beta \sqrt{t})$ $\beta = 105,7 \text{ Hz}^{1/2}$ $T = 11 \text{ ms}$



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

Type C.S.	MYOTIS Luc.	LASTOURS boreal.
$V_i(t)$	$\frac{V_0}{1 + at}$ $\left\{ \begin{array}{l} V_0 = 100 \text{ kHz} \\ V_f = \frac{V_0}{1 + at} = 40 \text{ kHz} \end{array} \right.$	$V_0 \frac{1 + at}{1 + bt}$ $a = 627, b = 346 \text{ Hz}$ $V_0 = 61 \text{ kHz}$ $V_f = 33 \text{ kHz}$

Les valeurs numériques indiquées ci-dessus sont celles utilisées par R.A. ALTES dans sa comparaison théorique entre les signaux des chauve souris et les signaux tolérant au mieux les effets Doppler ou d'accélération (8). Nous avons comparé les résultats théoriques obtenus (6b) avec une simulation des signaux faite à l'aide du générateur décrit auparavant (9) (cf. figure 1).

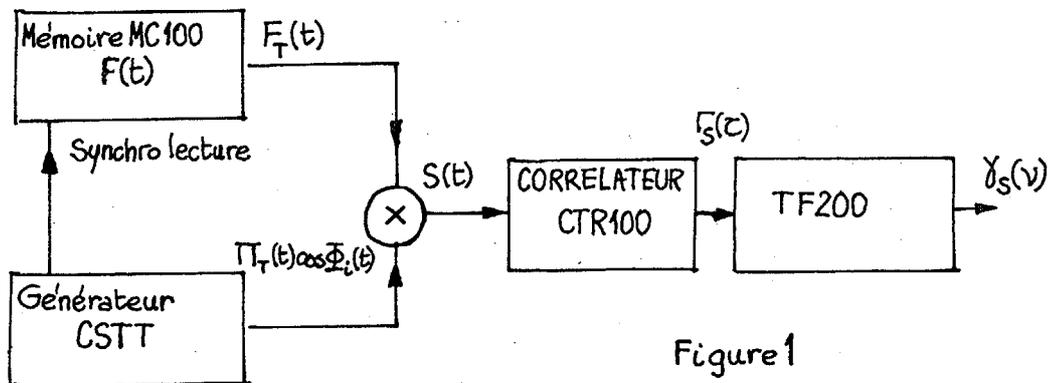


Figure 1

Nous avons tracé la fonction :

$$E(v) = \gamma_S(v)_{\text{calculé}} - \gamma_S(v)_{\text{mesuré}}$$

Cette courbe nous a donné la relation : $\frac{E(v)}{\gamma(v)} < 10^{-2}$.

Ayant obtenu cet accord, nous avons utilisé les résultats théoriques obtenus, qui ont été récemment confirmés par les résultats numériques dus à R.A. JOHNSON (10), et étaient en accord avec des études précédentes (11).

A l'aide du même procédé de calcul dont nous venons de vérifier la validité dans les cas considérés, B. HARRIS

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

et S. RAMER ont pu calculer $\chi_s(\tau, \eta)$, χ_s fonction d'ambiguïté des signaux à grand coefficient B T (12).

Ils utilisent la définition suivante de χ_s :

$$\chi_s(\tau, \eta) = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \int_R s(t) s(\eta t - \tau) dt$$

Possédant une expression générale de $\chi_s(\tau, \eta)$ on peut en déduire pour divers types de signaux à grand B T les paramètres suivants :

- Cas du signal modulé linéairement en fréquence :

Taux de tolérance à l'effet Doppler à l'aide $\eta_e = 1 - \frac{2V_e}{c}$
(V_e limite de la vitesse radiale) telle que

$$|\chi_s(0, \eta_e)| = \frac{\chi_s(0, 1)}{2}$$

- Cas du signal modulé hyperboliquement en fréquence :

Taux de tolérance à l'accélération $\ddot{r}_e = \left(\frac{d^2r}{dt^2}\right)_e$

(r distance) telle que : $|\chi_s(0, \ddot{r}_e)| = \frac{3}{4} \chi_s(0, 0)$

Le tableau 2 suivant, résume les valeurs de ces paramètres pour différentes chauve souris émettant des signaux modulés en fréquence et dont le coefficient $\mu = B T$ est grand devant l'unité.



SONARS BIOLOGIQUES AERIEES

	t_{ms} ms	f kHz	μ	$1/B$ μs	V_0 m/s	\ddot{r}_0 m/s ²	caractéristiques modératrices
<i>Myotis lucifugus</i>	3,3	60	257	10,0	optimal	600	periodique
<i>Lasiopterus borealis</i>	11	22,3	240	5		op. limit	"
<i>Hoculio leporinus</i>	12	30	360	33		30	periodique
<i>Hoculio leporinus</i>	3,75	40	110	25	2,5		linéaire
<i>Histoloph. ferr.</i>	4	20	80	50	1		linéaire
<i>Chilonycteris rub.</i>	3,3	10	33	100	2,5		

Remarquons que les chauves-souris péruviennes (*Crotopia es. (Co. lino)*) possèdent des performances très remarquables quant à la tolérance aux effets dus à la vitesse ou à l'accélération (voir éme. 1967 ci-dessus).



b) Effets dus à la compression en durée et au filtrage
dû au milieu

Divers auteurs ont signalé le raccourcissement des signaux lors de l'approche d'un cible par une charve-souris (13) (14). Que ce raccourcissement consiste à émettre un signal compatible avec la distance explorée (décroissante dans l'approche) paraît des plus plausibles. R.A. ALTES a montré qu'un signal optimal de type décrit au paragraphe a) (8)

$$S(t) = F_T(t) \cos \Phi_i(t) \quad F_T(t) = \frac{k}{t} J_1(\beta \sqrt{t})$$

$$v_i(t) = \frac{v_0}{1 + \alpha t} \quad 0 \leq t \leq T$$

T durée du signal

est invariant quant à ses performances décrites par sa fonction d'amplitude quand $T \rightarrow T' = \alpha T$, $\alpha < 1$. En même temps la résolution en distance augmente, ce qui a donc diminution de l'énergie émise tandis que la distance charve-souris s'en diminue. L'énergie de l'écho reçu va donc varier relativement peu. Les performances de résolution en distance égale et à tolérance Doppler inchangée. En effet si l'animal est limité en puissance d'émission, ce qui est le cas, on a :

$$\text{Sup} \left(\int_0^T [F_T(t) \cos \Phi_i(t)]^2 dt \right) \leq P_m$$

à T donné $E_s = P_m \cdot T$ à amplitude constante et si T devient T' on a :

$$E'_s = \alpha P_m T$$

Le traitement par filtre adapté reçoit comme paramètre primordial E_e énergie de l'écho, qui va augmenter du fait de la loi de décroissance en $1/r^2$ du champ vu que r diminue. Cette situation paraît bien être celle que l'animal rencontre pratiquement (8) (15).

Nous avons vérifié expérimentalement l'invariance des propriétés du signal émis par compression temporelle comme l'indique R.A. ALTES (8). Nous avons simulé



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

les signaux utilisés en veille SONAR par *Myotis lucifugus* (4) et *Vampyrum spectrum* (14). Le tableau 3 résume les conditions de l'opération et les résultats obtenus.

TABLEAU 3

	MYOTIS Luc.		VAMPYRUM Spectrum	
	$S_1(t)$	$S_2(t)$	$S_1(t)$	$S_2(t)$
T ms	2,5	0,8	20	3,7
$B = v_M - v_m $ KHz	50	20	4	20
$\mu = BT$	100	16	80	13,8
$\tau_0 = \frac{1}{B}$	16,6	50	250	48
$\frac{c}{2} \tau_0$ cm	2,3	0,85	4,25	0,82
$\Gamma(\tau)$	Fig. 2a	Fig. 2b	Fig. 2c	Fig. 2d

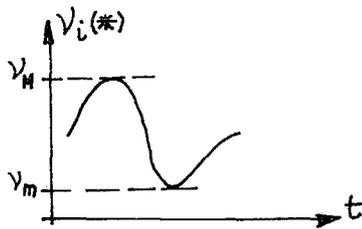
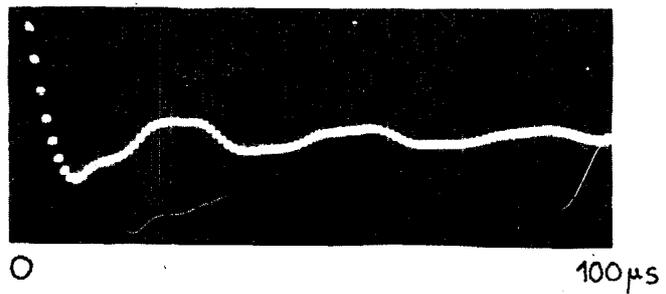
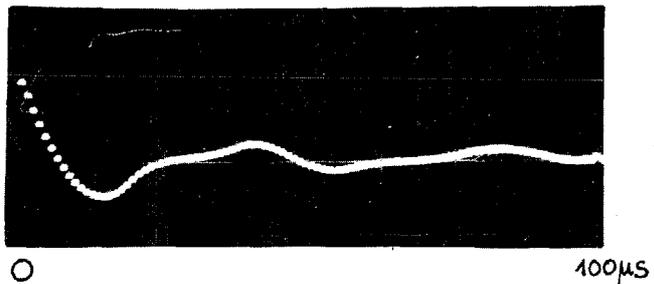


Figure 2

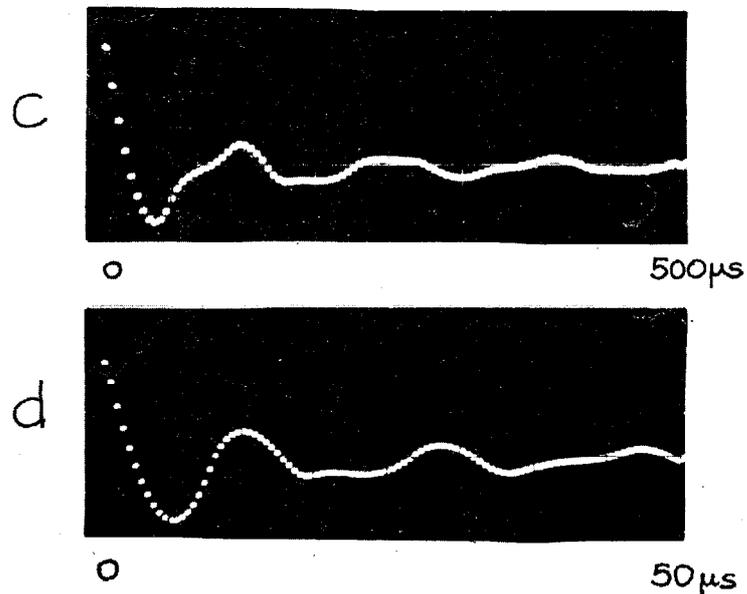
a



b



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS



Les figures 2a à 2d montrent les fonctions d'autocorrélation obtenues. Les résultats pratiques ou théoriques font apparaître dans le cas de VAMPYRUM spectrum une compression amenant une amélioration du pouvoir de résolution en distance de l'ordre de 5. F.W. BRADURY qui a étudié la discrimination acoustique des cibles par VAMPYRUM sp. précise que cet animal emploie le signal $S_1(t)$ en navigation et $S_2(t)$ en approche et identification (4). Ceci suggère que le résultat obtenu par J.A. SIMMONS peut s'expliquer par l'emploi par l'animal d'un traitement du type "filtre adapté au signal émis".

Récemment R.A. JOHNSON signalait qu'il existe un effet qui distord les signaux émis par les chauve-souris (10). Cet effet est dû à l'atténuation des sons haute fréquence dans l'air. D.R. GRIFFIN avait déjà attiré l'attention sur cet aspect dans l'étude des systèmes SONAR des chauve-souris (15). Si on étudie cette variation d'atténuation pour un trajet de 6 m par exemple (distance de détection probable pour certains cas) soit une portée SONAR de 3 m on obtient la courbe représentée sur la figure 3.

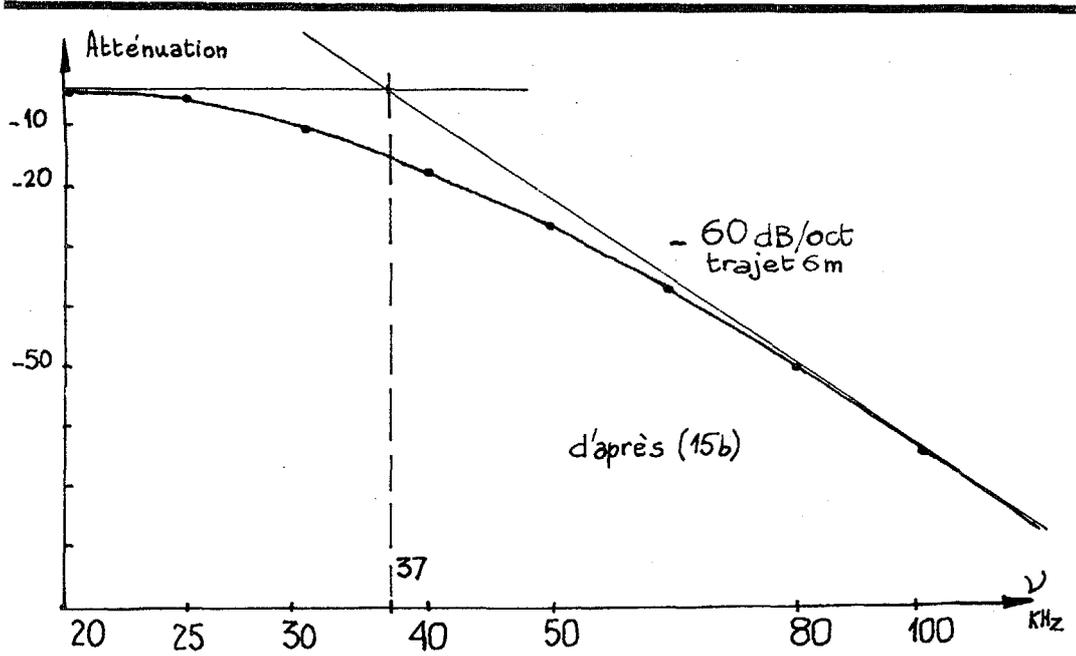


Figure 3

L'effet de filtrage est analogue de celui d'un filtre ayant une caractéristique de coupure de - 60 dB/octave et une fréquence de coupure voisine de 40 KHz. R.A. JOHNSON avait utilisé dans son étude un filtre de pente 48 dB/oct. Le résultat représenté figure 4 montre une faible perturbation de $|\chi_s(\tau, \eta)|$ pour $\eta = 1$.

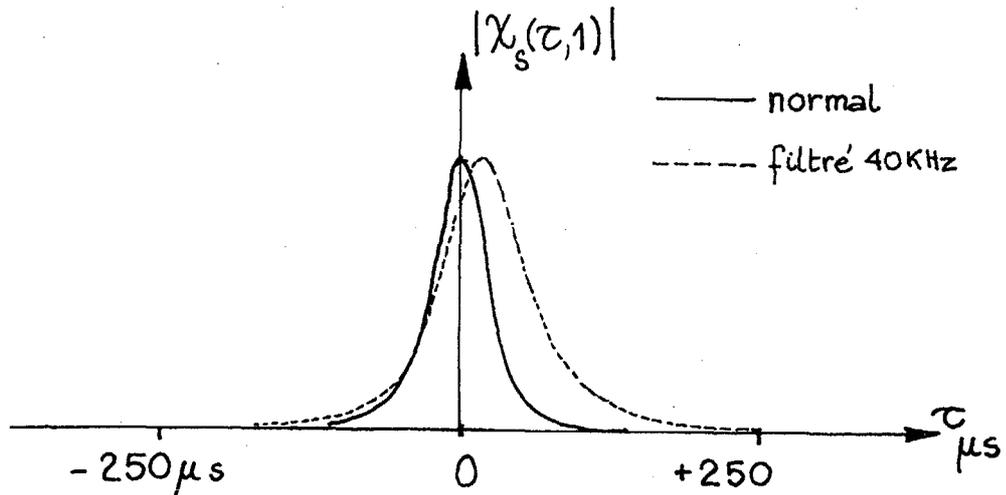


Figure 4a

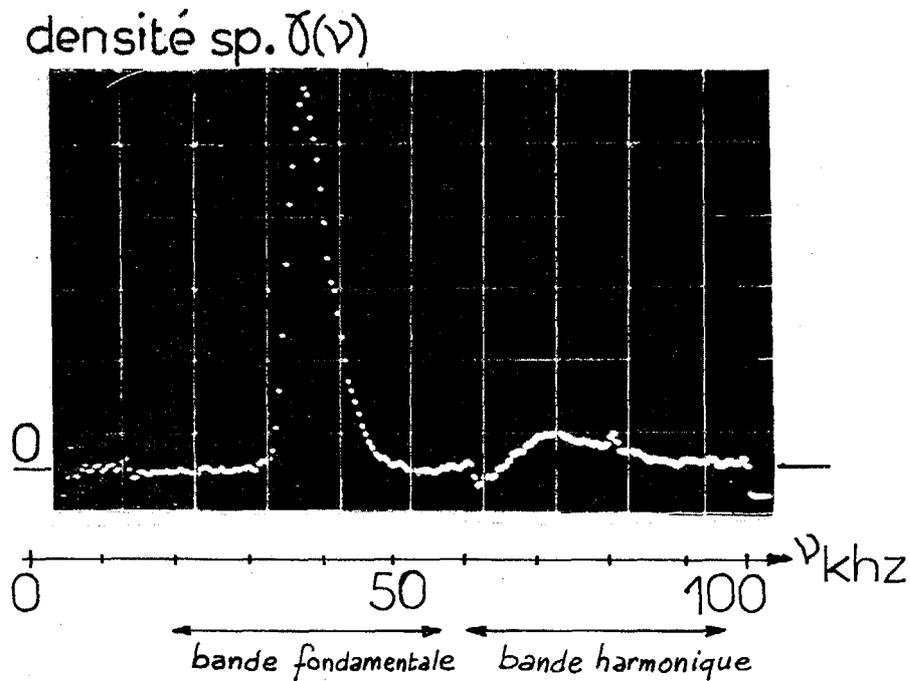


SOMARS BIOLOGIQUES AERIENS

Cet effet peut s'expliquer partiellement par les deux raisons suivantes :

- la densité spectrale de signal étudié (MYOTIS lucifera) est rapidement décroissante (voir tableau 1) (Fig 4b) pour $\nu \gg 45$ KHz on peut montrer que : $\delta_s(\nu) \sim k/\nu^2$. L'effet de filtrage sera peu sensible pour les fréquences hautes de l'ordre de 55 à 60 KHz.

- l'effet d'atténuation est relativement faible dans la gamme spectrale [25, 40 KHz] où se placent les fortes valeurs de la densité spectrale de signal émis.



signal de veille MYOTIS

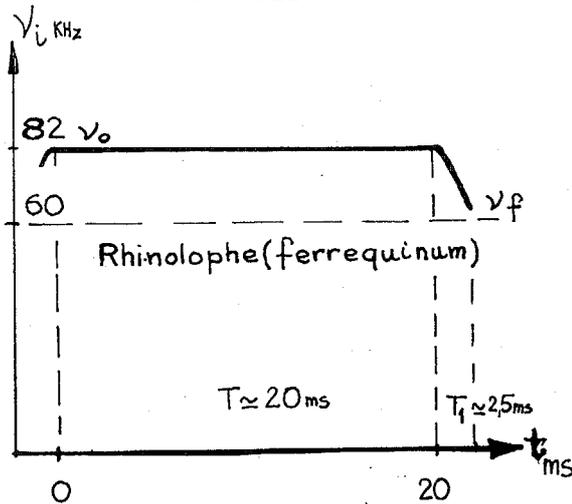
Figure 4 b



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

5 - SIGNAUX DIVERSITE UTILISES PAR CERTAINES CHAUVES-SOURIS :

a) Signaux Diversité :



Les signaux mis par certaines chauve souris possèdent des lois de modulation de fréquence représentées figure 5. Nous les appellerons "Signaux Diversité" par opposition au signal à fréquence PURE (FP) ou à fréquence Modulée (FM).

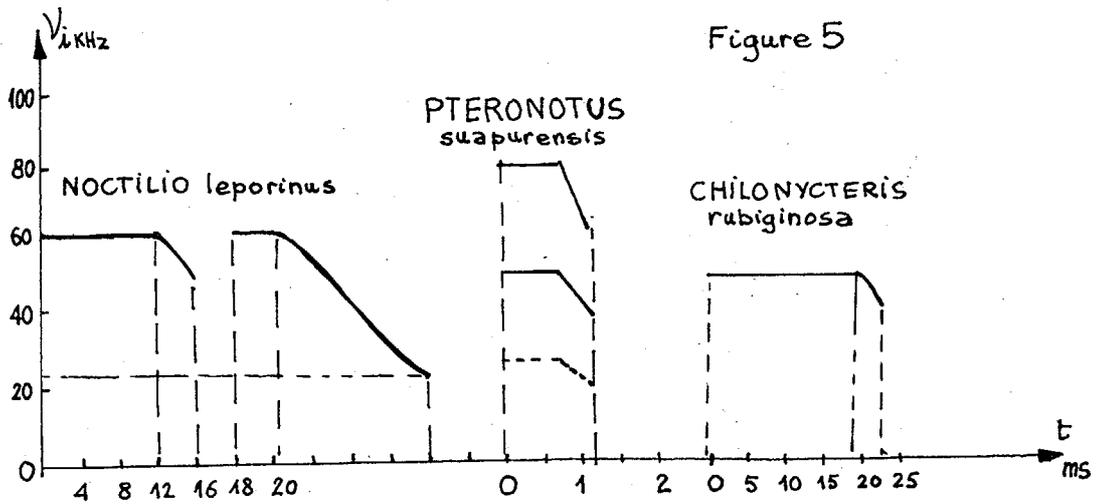


Figure 5

La partie (FP) de cette émission peut être utilisée à des fins diverses :

- soit comme signal servant à ESTIMER l'effet Doppler dû aux échos tel que
- soit comme signal "à longue portée" permettant par traitement à l'aide de son filtre adapté d'obtenir un rapport signal sur bruit grand :

$$\left(\frac{S}{B}\right) = \frac{E_s}{\delta_0} = \rho_0 \quad E_s = P_m \cdot T$$

avec T grand



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

d'où
$$\rho_0 = \frac{P_m T}{\gamma_0}$$

Si ρ_0 est grand il est possible de "détecter" la présence de cibles situées à des distances grandes.

b) Tolérance aux cibles distribuées :

Il faut noter un résultat important dû à R.A. ALTES qui permet d'expliquer aussi l'emploi de ces signaux (8). Toute cible complexe spatialement distribuée avec une périodicité $d_0 = \frac{c}{2\nu_0}$ va former des échos multiples dont les phases relatives seront des multiples de 2π . Il y aura addition de ces échos en un écho global fort. Remarquons dans le cas de l'émission du Rhinolophe fer à cheval les valeurs caractéristiques suivantes :

$$20 \leq T \leq 50 \text{ ms} \quad \nu_0 \simeq 80 \text{ kHz}$$

d'où
$$d_0 \simeq 2 \text{ mm}$$

Ce résultat permet d'affirmer que des buissons (spatialement périodiques) vont créer des échos forts malgré leur distribution spatiale ; ils seront détectés. L'analyse de l'effet DOPPLER que l'animal effectue en compensant son Doppler propre, comme l'ont montré H.U. SCHNITZLER (13) et J.A. SIMMONS (16) permet à l'animal d'identifier ces buissons comme OBSTACLES FIXES. L'écho dû à la cible (mouche, moustique, insectes, ...) sera entaché d'un Doppler caractéristique le faisant classer comme OBJET MOBILE. L'animal fait donc une analyse très proche de celle appelée "rejet d'échos fixes" (ou MTI en RADAR) (17).

La partie FM du signal sert par contre par ses propriétés de résolution spatiale à connaître la position et la "nature" de la cible. Le tableau 4 illustre ce fait dans le cas de l'émission du Rhinolophe fer à cheval (13).



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

T ms	T_1 ms	$B = \nu_0 - \nu_f$ KHz	$\mu_1 = BT_1$	$\tau_0 = \frac{1}{B}$ μs	$\frac{c}{2} \tau_0$ cm
$T < 60$ ≈ 20	1 à 3	20	20 à 60	50	0,85

Cette hypothèse semble d'ailleurs confirmée par l'ordre de grandeur de la résolution en distance obtenue par cet animal (3) et par le fait que l'animal diminue T_1 et augmente l'intensité du signal FM lors des phases de capture ou de navigation délicate comme l'avait noté D.R. GRIFFIN (15).

c) Emploi du couple FPFM du signal diversité :

L'émission de deux signaux de nature différente pose le problème de leurs utilisations respectives tant en télémétrie qu'en classification des cibles. F.S. HILL et P.M. SCHULTHEISS ont étudié le problème suivant (18) :

"Afin d'estimer au mieux la distance d'une cible à une date postérieure à l'obtention de signal écho comment doit-on disposer temporellement deux signaux SONAR et quelle doit être leur nature ?"

Les parasites envisagés dans cette étude sont soit un bruit gaussien à large bande ($\chi_B(\nu) = \chi_0 \sqrt{\nu} e(B)$) soit la réverbération due à des diffuseurs de positions poissonniennes, assimilée à un processus gaussien localement stationnaire (19) (20). HILL et SCHULTHEISS font l'hypothèse que les signaux émis sont à bande relativement étroite et que les vitesses relatives cible/émetteur sont faibles pour qu'on puisse assimiler l'effet Doppler à une translation de fréquence Φ . Les auteurs définissent les grandeurs suivantes :



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

$$S(t) \Rightarrow \delta(v) = |\delta(v)| e^{i\varphi(v)}$$

$$\text{Log } \delta = \alpha(v) + i\beta(v)$$

et

$$\mathcal{P}(v) = \frac{|\sigma_0|^2}{\rho_0} \cdot \frac{|\delta(v)|^2}{\gamma_B(v+\Phi)} \quad \rho_0 = |\sigma_0|^2 \int_R \frac{|\delta(v-\Phi)|^2}{\gamma_B(v)} dv$$

σ_0 facteur d'atténuation complexe dû à la cible. Compte tenu de ces définitions ils utilisent le fait que $\mathcal{P}(v)$ a les propriétés d'une densité de probabilité pour calculer les grandeurs suivantes :

$$\begin{aligned} \bar{v} &= \int_R v \mathcal{P}(v) dv & \bar{\alpha} &= \int_R \alpha(v) \mathcal{P}(v) dv \\ \mu_{11} &= 2 \int_R (v - \bar{v}) \mathcal{P}(v) dv & \mu_{12} = \mu_{21} &= -2 \int_R (v - \bar{v}) \left(\frac{d\beta}{dv} - \frac{d\bar{\beta}}{dv} \right) dv \\ \mu_{22} &= 2 \int_R \left(\frac{d\alpha}{dv} - \frac{d\bar{\alpha}}{dv} \right)^2 dv + 2 \int_R \left(\frac{d\beta}{dv} - \frac{d\bar{\beta}}{dv} \right)^2 dv \end{aligned}$$

Ces grandeurs permettent d'exprimer les variances des erreurs

e d'estimations sur la distance ($r \rightarrow \frac{c\tau}{2}$) et la vitesse

($v \rightarrow \frac{\Phi}{v_0} \cdot c$) de la cible déduites de la fonction d'ambiguïté

obtenue compte tenu des parasites () :

$$\mathbb{E}\{e_\tau^2\} = \frac{\mu_{11}}{\rho_0} \quad \mathbb{E}\{e_\phi^2\} = \frac{\mu_{22}}{\rho_0}$$

d'où

$$\frac{\mu_{22}}{\mu_{11}} = \frac{\mathbb{E}\{e_\tau^2\}}{\mathbb{E}\{e_\phi^2\}}$$

avec e_τ erreur sur τ et e_ϕ sur celle sur Φ . Si VAR e_τ est faible μ_{11} est grand et $\mathcal{P}(v)$ étant défini sur un support borné de mesure relativement grande si $\gamma_B(v)$ est constant dans la bande spectrale du signal et si la diffusion est due à des



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

diffuseurs immobiles. Pour ce qui est de μ_{22} considérons à titre d'exemple le "signal FM" suivant très voisin de celui émis par Rhinolophe "fer à cheval" (13), *Chilonycteris subiginosa* (21) ou *Chilonycteris parnelli* (22):

$$S(t) = \bar{e}^{t^2/D^2} \cos 2\pi \left(\gamma_0 t + \frac{Bt^2}{D} \right) \quad \begin{array}{l} D > 0 \\ B > \text{ou} < 0 \end{array}$$

Notons que ce signal est de durée "pratique" δD environ. On a :

$$\mu_{22} = \frac{1}{4} \cdot \frac{D^4}{1+B^2D^2} \cdot \mu_{11}$$

Distinguons les cas suivants : B peut être positif ou négatif selon le sens de la modulation de fréquence ; dans les cas cités ci-dessus B est négatif.

a) $BD < 1$	$\frac{\mu_{22}}{\mu_{11}}$	dépend de la durée D
b) $BD = 1$	$\frac{\mu_{22}}{\mu_{11}} = \frac{D^4}{8} = \frac{1}{8B^4}$	
c) $BD \gg 1$	$\frac{\mu_{22}}{\mu_{11}} \approx \frac{1}{4} \frac{D^2}{B^2}$	

de même le coefficient de corrélation entre e_τ et e_ϕ s'exprime par :

$$c_{\tau\phi} = \frac{E\{e_\tau e_\phi\}}{\sqrt{\text{VARE}_\tau \text{VARE}_\phi}} = \frac{-\mu_{12}}{\sqrt{\mu_{11}\mu_{22}}} = \frac{-BD}{\sqrt{1+B^2D^2}}$$

Rendre BD très grand devant 1 n'est pas forcément bénéfique car :

$$|c_{\tau\phi}| \rightarrow 1$$

Cependant cette corrélation entre erreurs d'estimation de τ et ϕ par un seul signal peut être compensée par l'emploi de 2 SIGNAUX. En s'intéressant à l'"ellipse d'incertitude" (projection de la coupe de la fonction d'Ambiguïté à $|X_S(\tau, \phi)| = \text{cte}$ dans le plan (τ, ϕ) (23) (18)) on peut montrer que la meilleure estimation de la distance consiste à "Prédire" la position de la cible à la date (à condition que $B > 0 \rightarrow \mu_{12} = 0$):

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

$$v_c \frac{\mu_{12}}{\mu_{11}} = \frac{v_c}{2} \frac{BD \cdot D^2}{1 + B^2 D^2} = t_{mc}$$

Notons que cette date correspond à un minimum de $C_{\tau\phi}$ donc de la corrélation entre erreurs de distance et vitesse, la vitesse de cible étant supposée constante au cours de la prédiction.

Pour estimer la position de manière précise à une date postérieure et quelconque, il faut disposer d'une estimation de la vitesse. Pour cela l'émission d'un deuxième signal est nécessaire ces deux signaux appelés 1 et 2 sont décalés dans le temps d'une durée t_i , et appelons t_p l'intervalle de prédiction entre l'arrivée de l'écho dû au signal 2 et l'instant où l'on veut prédire la position de la cible comme le montre la figure 6a.

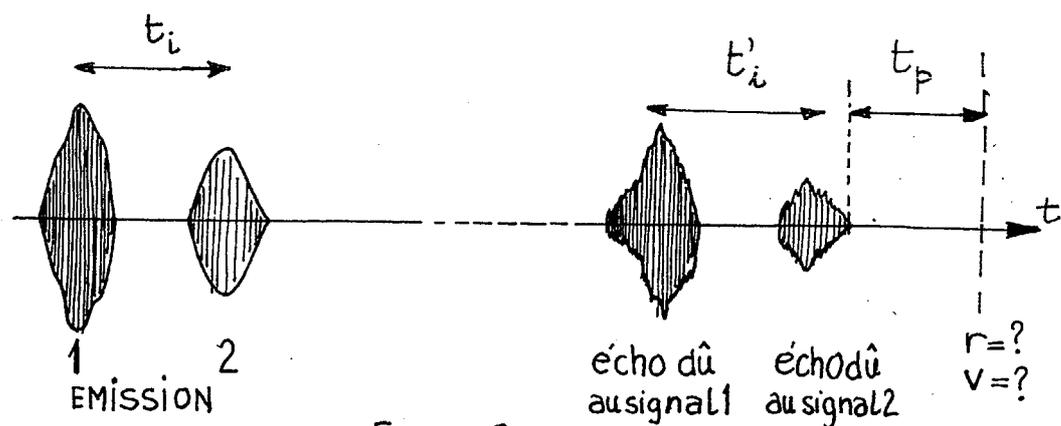


Figure 6a

La figure 6b représente $\text{VAR } e_r$ en fonction de t_i .

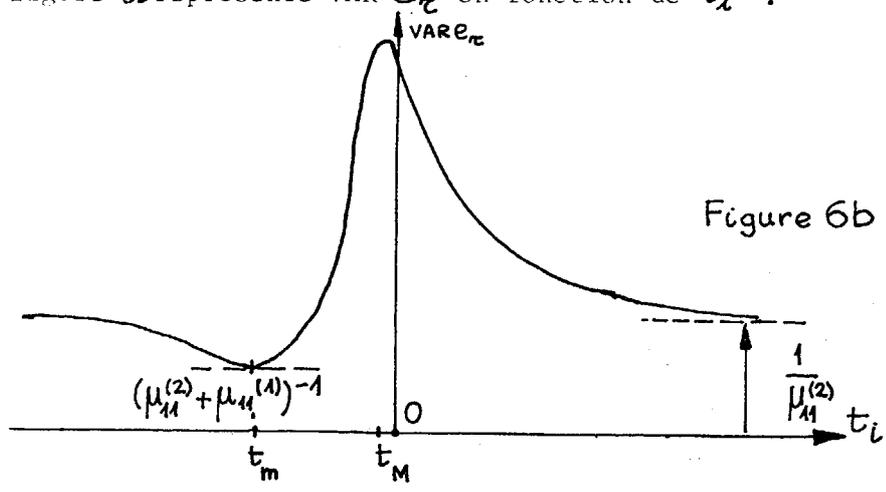


Figure 6b



SONARS LOGIQUES AERIENS

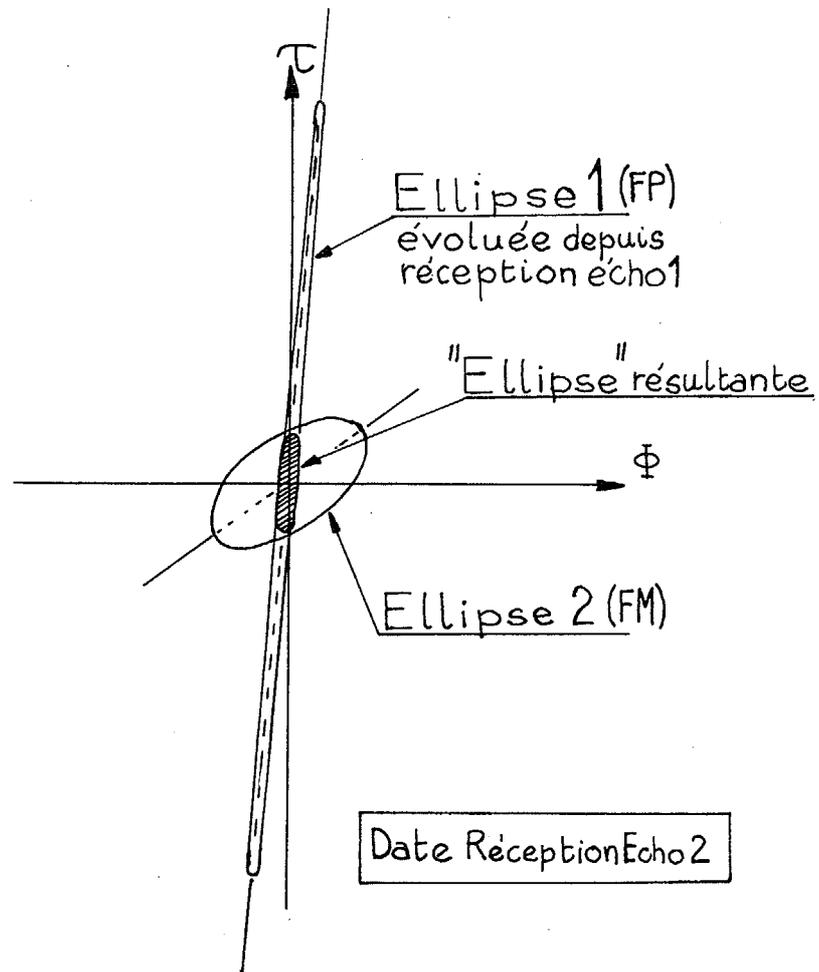


Figure 6c

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

Dans bien des cas t_p est grand t_m et t_M correspondant aux valeurs minimales et maximales sont négatifs et VAR e_z décroît pour $t_i > 0$; il y a alors intérêt à rendre t_i GRAND.

En effet comme le montre la figure 6c, l'ellipse d'Ambiguïté due au signal 1 ayant évolué pendant la durée t_i l'erreur sur Φ est faible et celle sur τ est grande. La distance déduite de la date de l'écho dû au signal 2 est estimée avec précision ; la prédiction finale correspondant à l'aire hachurée est alors de précision satisfaisante. Pratiquement HILL et SCHULTHEISS indiquent que $\frac{t_i}{t_p} \approx 3$ à 4 amène de bonnes conditions de prédiction. En fait la "nature" du signal 1 (modulation, enveloppe) importe peu car VAR e_z dépend avant tout de $\frac{1}{P_0} M_{11}^2$. Il y a intérêt à émettre d'abord un signal à "fréquence pure" (FP) estimant au mieux le décalage Doppler puis à émettre le signal 2 afin d'estimer avec précision la distance de la cible. Le tableau 5 résume les propriétés demandées aux deux signaux 1 et 2.

	Durée	Nature modulation	Résolution en vitesse	Résolution en distance
SIGNAL 1	T_1 grande	FP	$\Delta\Phi_1 = \frac{1}{T_1}$ bonne	T_1 médiocre
SIGNAL 2	$T_2 \ll T_1$	FM large bande comparé à 1	$\Delta\Phi_2 = \frac{1}{T_2}$ faible	$\approx \frac{1}{B}$ bonne

Le couple (S_1, S_2) émis doit comporter un signal à forte "résolution Doppler" et un signal à forte résolution en distance.

Notons qu'un signal modulé linéairement en fréquence correspond assez bien aux propriétés exigées du signal 2. En fait il y a un grand nombre de signaux modulés en fréquence qui y répondent. Le couple (S_1, S_2) émis par le Rhinolophe fer à cheval correspond à ces conclusions ; nous allons en calculer les performances déduites des données expérimentales (13a,b)



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

$$\begin{aligned}
 T &\approx 60 \text{ ms} \\
 T_1 &\approx 26 \text{ ms} \\
 6D &\approx 6 \text{ ms} \\
 S_2(t) &= e^{-\frac{t^2}{D^2}} \cos 2\pi \left(\nu_c t + \frac{Bt^2}{D} \right) \\
 67 &\leq \nu_i \leq 83 \text{ KHz} \\
 B &= -1,33 \text{ KHz}
 \end{aligned}$$

d'où $BD = -1,33$ on en déduit :

(. $\mu_{22}^{(2)}$ signifie μ_{22} relatif au signal (2))

$$\frac{\mu_{22}^{(2)}}{\mu_{11}^{(1)}} = \frac{1}{4} \frac{D^4}{1+(1,33)^2} = \frac{10^{-12}}{2,77} \quad C_{\text{cp}}^{(2)} = \frac{-BD}{1+B^2D^2} = 0,48$$

et $\mu_{11}^{(1)} = 5,54 \cdot 10^6 \text{ Hz}^2$. Les données expérimentales indiquent : $t_i = 0,9T = 54 \text{ ms}$ en admettant $\frac{t_i}{t_p} \approx 3$ il vient :

$$t_p = 18 \text{ ms} \quad r_p = \frac{c}{2} t_p \approx 2 \text{ m}$$

On prédira la position de la cible 18 ms après la réception de l'écho dû à S_2 . Nous avons :

$$\sigma_{e_z}^2 = E\{e_z^2\} = \frac{1}{\mu_{11}^{(2)}} = \frac{10^{-6}}{5,5} \text{ s}^2 \rightarrow \sigma_{e_z} = 425 \mu\text{s}$$

d'où l'écart type σ_r sur la distance :

$$\sigma_r \approx 7 \text{ cm}$$

D'autres

chauve-souris que le Rhinolophe "fer à cheval" semblent utiliser un tel système de mesure et de prédiction compte tenu de la nature de leur émission, comme l'indique la figure 6d. Notons que pour certaines d'entre elles il y a augmentation de $\frac{T_2}{T_1}$ par rapport au cas cité ci-dessus et qu'en outre dans le cas de *Noctilio leporinus* il faudrait utiliser une étude plus générale compte tenu de l'émission à large bande de l'animal.

Il apparaît donc que l'émission "Diversité" de certaines chauve-souris correspond à une utilisation communément explicable compte tenu des connaissances actuelles sur

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

les performances des signaux en présence de bruit à large bande étudiées à l'aide de la fonction d'ambiguïté. Cette étude est encore à poursuivre dans le cas de la réverbération par des diffuseurs animés de vitesses quelconques.

III - INFLUENCE DES HARMONIQUES SUR LES PERFORMANCES SONAR
DES SIGNAUX DES CHAUVES SOURIS :

a) Harmoniques et fonction de corrélation : étude pratique

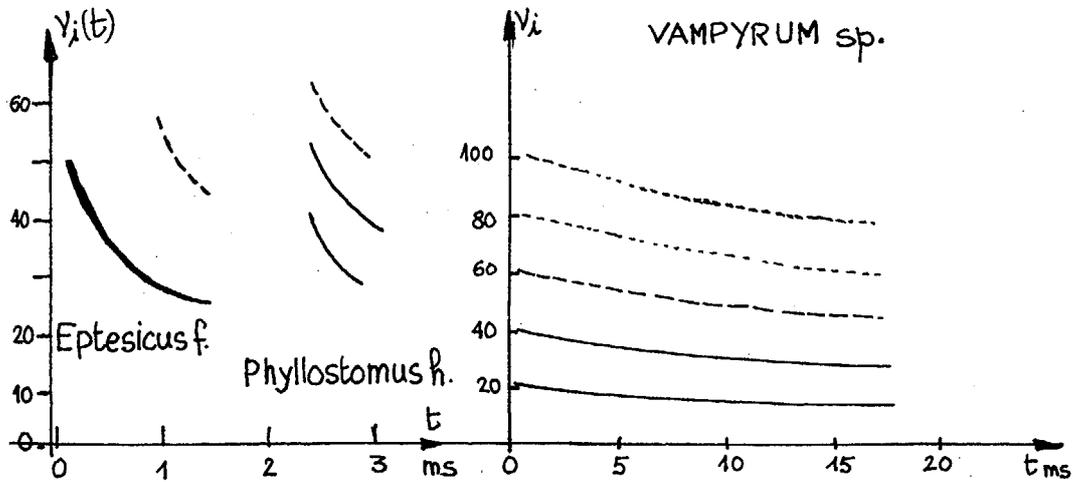


Figure 7

La figure 7 ci dessus représente quelques lois de modulation de fréquence utilisées par certaines chauve-souris. On note l'emploi d'harmoniques de rang k s'exprimant par

$$v_k(t) = k v_1(t)$$

v_1 étant la fréquence instantanée du fondamental $k = 1$.

Considérons, par exemple, le signal émis par VAMPYRUM Spectrum nous observons :



SIGNALS BIOLOGIQUES AERIEES

- une bande fondamentale $\nu_1(t) = \frac{\nu_0}{1+\alpha t}$
 $\nu_d = 20\text{KHz}$, $\nu_f = \nu_1(\tau) = 16\text{KHz}$

- un ensemble de bandes harmoniques

$$\nu_k(t) = \frac{k\nu_0}{1+\alpha t}$$

dont les pondérations sont décroissantes en fonction du rang k , comme l'a montré L.W. BRADBURY (14). Ce signal est utilisé en veille ou en croisière : sa "portée utile" doit être grande. Remarquons que la loi de modulation de fréquence hyperbolique lui assure une relative immunité aux effets de filtrage dus à la propagation comme l'a montré R.A. JOHNSON (10).

Afin de préciser l'influence des harmoniques sur la fonction d'autocorrélation d'un signal et partant sur la résolution en distance, nous avons réalisé une simulation des effets dus à un harmonique de rang 2. Supposons que $\gamma_1(\nu)$ densité spectrale relative à la bande fondamentale soit concentrée sur le support $[\nu_0 - \Delta\nu, \nu_0 + \Delta\nu]$ et qu'elle s'exprime par :

$$\gamma_1(\nu) = \gamma_1 \left[\frac{\pi(\nu - \nu_0)}{2\Delta\nu} + \frac{\pi(\nu + \nu_0)}{2\Delta\nu} \right] \Leftrightarrow \Gamma_1(\tau) = 2\gamma_1 \frac{\sin 2\pi\Delta\nu\tau \cdot \Delta\nu \cos 2\pi\nu_0\tau}{2\pi\Delta\nu\tau}$$

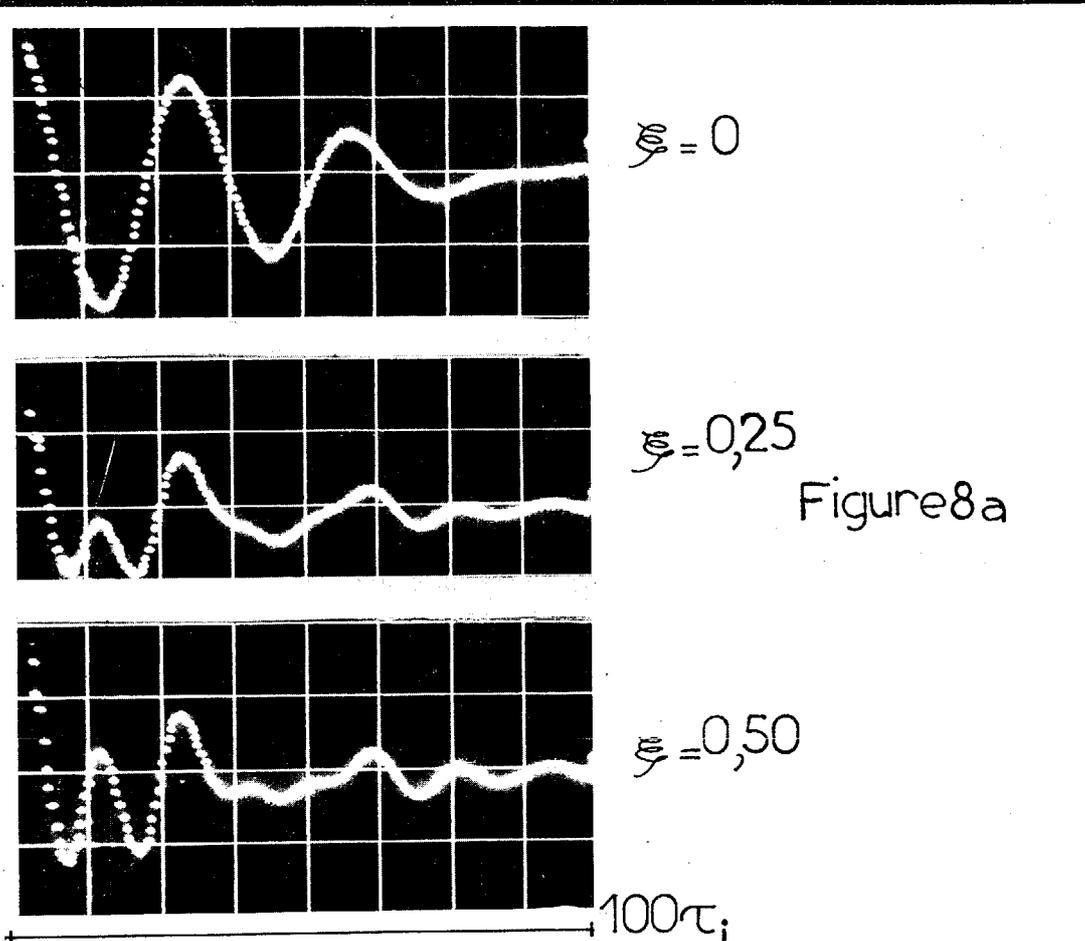
et appelons $\gamma_2(\nu)$ la densité spectrale relative à la bande harmonique de rang 2. Nous avons simulé la quantité :

$$\gamma_{1+2}(\nu) = \gamma_1(\nu) + \gamma_2(\nu)$$

telle qu'elle peut résulter de l'addition de deux signaux de loi de modulation $\nu_i(t)$ et $2\nu_i(t)$ ayant des densités spectrales disjointes (cas de *Pteronotus* par exemple) d'où par Transformée de Fourier :

$$\Gamma_{1+2}(\tau) = \Gamma_1(\tau) + \Gamma_2(\tau)$$

SOMMES BIOLOGIQUES AERIENS



La figure 8a représente les courbes obtenues pour les rapports ξ définis comme suit:

$$\xi = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \quad \gamma_R(\nu) = \gamma_R \left[\frac{\pi(\nu - R\nu_0)}{2\Delta\nu} + \frac{\pi(\nu + R\nu_0)}{2\Delta\nu} \right]$$

avec $\nu_{R_0} = R\nu_0$ Le ta

bleau 2 représente l'abscisse τ_0 de premier passage à zéro et τ_A l'abscisse correspondant à la 1/2 enveloppe maximum, et τ_c le rayon de corrélation.

ξ_0	τ_0 unités arbitraires	τ_A	τ_c
0	5	35	70
$\frac{1}{2}$	3,8	33	70
1	3	33	70



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

On remarque immédiatement que "l'élargissement" de la bande spectrale dû à la présence des harmoniques se manifeste surtout sur la position du premier zéro de la fonction de corrélation globale. L'effet est peu sensible sur l'enveloppe de la fonction de corrélation. La présence des harmoniques améliore donc la "rapidité" de la décroissance de $\Gamma_{1,2}(\tau)$ autour de $\tau = 0$

b) Etude théorique du phénomène :

Dans le cas général il faut rechercher la plus petite racine du polynôme trigonométrique suivant :

$$\Gamma_{1,N}(\tau) = \sum_{k=1}^N \gamma_k \frac{\sin 2\pi k \Delta v \tau}{\pi \tau} \cos 2\pi k v_0 \tau$$

On peut en effet remarquer que $\sin 2\pi k \Delta v \tau$ peut s'exprimer en fonction de $\cos \pi k \Delta v \tau$ et que l'on a dans une majorité de cas :

$$\frac{v_0}{\Delta v} = M \text{ entier supérieur à } 1.$$

L'étude générale est cependant très complexe. Pratiquement les études conduites sur les chauve souris indiquent $N \leq 4$. Dans bien des cas on rencontre $N = 2$ et $M = 4$ par exemple :

$$M=4 \quad v_0 = 4\Delta v \quad \Gamma_{1,2}(\tau) = \gamma_1 \frac{\sin 2\pi \Delta v \tau}{\pi \tau} \cos 2\pi v_0 \tau + \gamma_2 \frac{\sin 4\pi \Delta v \tau}{\pi \tau} \cos 4\pi v_0 \tau$$

$$\text{d'où } \Gamma_{1,2}(\tau) = \gamma_1 \frac{\sin 2\pi \Delta v \tau}{\pi \tau} \left[\cos 2\pi v_0 \tau + 2 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cos 2\pi \Delta v \tau (2 \cos^2 2\pi v_0 \tau - 1) \right]$$

dont les racines sont données par l'équation suivante :

$$L(\tau) = \cos 2\pi v_0 \tau + 2 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cos 2\pi \frac{v_0}{M} \tau (2 \cos^2 2\pi v_0 \tau - 1) = 0$$

Nous recherchons la racine τ_0 la plus proche de $\tau = 0$ et telle que l'équation soit vérifiée. Comme $\Delta v = \frac{v_0}{4}$ nous ferons l'hypothèse assez justifiée que : $\cos 2\pi \frac{v_0}{4} \tau_0 \approx 1$

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

d'où : $L(\tau) \approx x + 2 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} (2x^2 - 1) = 0$

en posant $x = \cos 2\pi\nu_0\tau$

et $\xi = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$ d'où $L(\tau) \rightarrow 4\xi x^2 + x - 2\xi = 0$

soit $x = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 32\xi^2}}{8\xi}$

Comme $\cos 2\pi\nu_0\tau$ est borné par 1 en module il vient :

$$\cos 2\pi\nu_0\tau = \frac{-1 + \sqrt{1 + 32\xi^2}}{8\xi}$$

quantité que nous avons étudié pour $\xi = \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = 0, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}, 1$
comme le montre le tableau 7 suivant :

$\xi = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$	$\varphi_0 = 2\pi\nu_0\tau_0$	x_0	$\nu_0\tau_0$
0	1,57 = $\pi/2$	0	1/4
0,25	1,18	0,366	1/5,3
0,50	1,04 = $\pi/3$	0,50	1/6
1,00	0,93	0,594	1/6,7

Ce résultat semble en accord avec les résultats expérimentaux obtenus ci-dessus et justifie les approximations faites pour la recherche de τ_0 . Nous pouvons donc indiquer que l'influence de N harmoniques $k\nu_k(t)$, $k=1, \dots, N$ se traduit nettement sur le premier zéro de $\Gamma_{1,N}(\tau)$.

Nous allons maintenant étudier l'influence de ces harmoniques sur l'enveloppe de $\Gamma_{1,N}(\tau)$:

$$\Gamma_{1,N}(\tau) = \sum_{k=1}^N \gamma_k \frac{\sin 2\pi k \Delta \nu \tau}{\pi \tau} \cos 2\pi k \nu_0 \tau$$

Les maxima ont lieu pour : $\cos 2\pi k \nu_0 \tau = 1 \rightarrow 2\pi \nu_0 \tau = 2l\pi$
 $l = 0, 1, 2, \dots$

soit aux instants : $\tau_l = \frac{l}{\nu_0}$



Nous appelons $E_1(\tau)$ l'enveloppe de $\Gamma_1(\tau)$ c'est à dire :

$$E_1(\tau) = \frac{\sin 2\pi \Delta v \tau}{2\Delta v \tau}$$

et $E'(\tau)$ la quantité :

$$E'(\tau) = \frac{1}{\sum_{R=1}^N 2\gamma_R k \Delta v} \cdot \sum_{R=1}^N 2\gamma_R k \Delta v \cdot \frac{\sin 2\pi \Delta v k \tau}{2\pi \Delta v k \tau}$$

Comme nous l'avons fait ci-dessus posons $v_0 = M \Delta v$ et calculons $(E')_{\tau_\ell}$ soit aux points $\tau_\ell = \frac{\ell}{v_0} = \frac{\ell}{M \Delta v}$:

$$(E')_{\tau_\ell} = \frac{1}{\sum_{R=1}^N 2\gamma_R k \Delta v} \sum_{R=1}^N 2\gamma_R k \Delta v \cdot \frac{\sin 2\pi k \ell / M}{2\pi k \ell / M}$$

Ces échantillons pris aux points τ_ℓ définissent l'enveloppe de $\Gamma_{1,N}(\tau)$. Notons que $\Gamma_{1,N}(\tau)$ possède une transformée de Fourier définie sur un support spectral borné. Les seuls échantillons E_ℓ suffisent pour reconstituer $E'(\tau)$ d'après le théorème d'échantillonnage. Nous allons comparer l'épanouissement temporel de E_1 et de E' au moyen de la formule d'incertitude due à D. GABOR (24) :

$$\frac{1}{\int_R E^2(\tau) d\tau} \cdot \int_R \tau^2 E^2(\tau) d\tau \cdot \frac{1}{\int_R |e(v)|^2 dv} \cdot \int_R v^2 |e(v)|^2 dv \geq \frac{1}{4\pi}$$

avec : $E(\tau) \rightleftharpoons e(v)$

Calculons $e(v)$ associée à $E(\tau)$:

$$e(v) = \frac{1}{\sum_{R=1}^N 2\gamma_R k \Delta v} \cdot \sum_{R=1}^N 2k \Delta v \frac{\Pi(v)}{2k \Delta v}$$

Nous allons calculer $e(v)$ et les "épanouissements" temporels et spectraux, dans le cas $N = 4$ cité auparavant, à l'aide des résultats généraux suivants : $(\delta v)'$ associée à E' ,

$$(\delta v)' = \frac{1}{\int_R |e(v)|^2 dv} \cdot \int_R v^2 |e(v)|^2 dv$$

$$(\delta v)' = \frac{\Delta v^2}{3} \frac{[\sum_{R=1}^N \gamma_R]^2 + \dots + (\sum_{R=m}^N \gamma_R)^2 (m - (m-1)^3) + \dots + \gamma_N^2 (N^3 - (N-1)^3)}{[\sum_{R=1}^N \gamma_R]^2 + \dots + (\sum_{R=m}^N \gamma_R)^2 + \dots + \gamma_N^2}$$

SOMMERS BIOLOGIQUES AERIEES

$$(\delta v) \text{ associé à } E_1 : \delta v = \frac{\int_R v^2 |e_1(v)|^2 dv}{\int_R |e_1(v)|^2 dv} = \frac{M \Delta v}{\sqrt{3}}$$

ce qui conduit dans le cas N = 4 à :

$$(\delta v)'^2 = \frac{\Delta v^2}{3} \frac{\delta_1(\delta_1+2\delta_2+2\delta_3+2\delta_4) + 8\delta_2(\delta_2+2\delta_3+2\delta_4) + 27\delta_3(\delta_3+2\delta_4) + 64\delta_4^2}{\delta_1(\delta_1+2\delta_2+2\delta_3+2\delta_4) + \delta_2(\delta_2+2\delta_3+2\delta_4) + 27\delta_3(\delta_3+2\delta_4) + \delta_4^2}$$

et on a :

$$(\delta v)' \geq \frac{1}{4\pi(\delta \tau)'}$$

$$(\delta v) \geq \frac{1}{4\pi(\delta \tau)}$$

Nous allons discuter des valeurs limites de $\delta \tau$ et $\delta \tau'$ pour différents harmoniques avec des importances relatives variables :
Le tableau 8 suivant résume les résultats obtenus.

Rang harmonique k	Pondération $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k, \dots, \delta_N$	$(\delta v)' / (\delta v)$	$(\delta v) / (\delta v)'$
1	1	1	1
1,2	1,1	1,48	0,67
2	1	2	0,50
1,3	1,1	2,25	0,465
2,3	1,1	2,38	0,420
2,3,4	1,1,1	2,85	0,35
3	1	3	0,33
3,4	1,1	3,3	0,30
4	1	4	0,25



SOMARS BIOLOGIQUES AERIENS

Nous avons pris comme élément de comparaison la quantité $\frac{(\delta v)_1}{(\delta v)'}$ qui est reliée aux quantités $(\delta \tau)_1$ et $(\delta \tau)'$ définies ci dessus. Le tableau montre que seule l'addition de signaux harmoniques d'amplitudes de l'ordre de celle du signal de départ permet un élargissement de bande se traduisant notablement sur la mesure de support borné temporel où est défini $E'(\tau)$. Pratiquement seule l'étude de chaque particulier des émissions SOMAR des chauve souris permettra de chiffrer l'effet apporté à l'enveloppe de la fonction de corrélation. Signalons par exemple que dans le cas du signal de veille utilisé par WAMPREM Spectrum le signal fondamental étant lui à coefficient α_1 grand (cf tableau 3) on peut utiliser la formulation asymptotique décrite en 1 qui exprime $\delta_s(v)$ qui est du type $\frac{A}{v^2}$ dont le calcul de (δv) est aisément réalisable.

c) Influence des harmoniques sur la fonction d'ambiguïté :

Nous écrivons le signal formé des N signaux harmoniques sous la forme suivante :

$$S_H(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{\alpha_k} S_k(t) \quad \text{avec } v_{i_k}(t) = k v_{i_1}(t)$$

Nous appelons fonction d'ambiguïté la quantité : (3)

$$\chi_{S_H}(\tau, \eta) = \int_R S_H(t) S_H(\eta t - \tau) dt$$

$\eta \approx 1 - \frac{2v}{c}$ v : vitesse relative cible Emetteur

d'où

$$\chi_S(\tau, \eta) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \int_R S_k(t) S_k(\eta t - \tau) dt$$

à condition que $\int_R S_k(t) S_l(\eta t - \tau) dt = 0$ ce qui a lieu si :

$$S(t) \Rightarrow \delta(v) \quad , \quad |\delta_k(v)|^2 = \delta_R(v) \text{ est disjoint de } \frac{1}{\eta^2} |\delta_l(\frac{v}{\eta})|^2$$

Ceci implique que le signal retardé et Dopplérisé soit spectrale-ment disjoint du signal non affecté de retard et de Doppler. Dans un tel cas il vient :

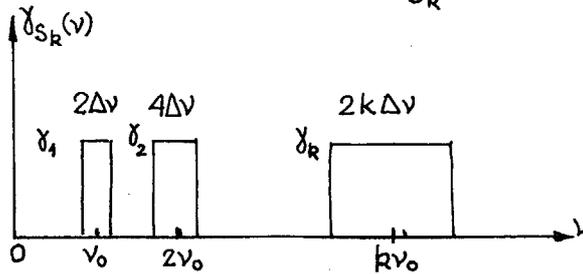
$$\chi_{S_H}(\tau, \eta) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \chi_{S_k}(\tau, \eta)$$

Cherchons à quelles conditions il en est ainsi pour l'exemple étudié en 3a et 3b.



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

La figure 6b représente $\gamma_{S_k}(\nu)$ densité spectrale du signal $S_k(t)$.



L'effet Doppler transforme les fréquences comme suit :

$$k\nu_0 \rightarrow \eta'k\nu_0$$

$$k\nu_0 \pm k\Delta\nu \rightarrow \eta'k\nu_0 \pm \eta'k\Delta\nu$$

Si les bandes spectrales restent disjointes on a :

$$\eta'k\nu_0 + \eta'k\Delta\nu < \eta'(k+1)\nu_0 - \eta'(k+1)\Delta\nu$$

$$\eta'(k-1)\nu_0 + \eta'(k-1)\Delta\nu < \eta'k\nu_0 - \eta'k\Delta\nu$$

ce qui conduit à : $k - \frac{1}{2} < k + \frac{1}{2} < \frac{\nu_0}{2\Delta\nu}$

Cette inéquation fixe le rang k des harmoniques tel que les supports spectraux restent disjointes. Dans certains cas il n'en est pas ainsi mais notons que pour l'émission de VAMPFIRUM Spectrum compte tenu des données indiquées au paragraphe 3a il vient :

$$\frac{\nu_0}{2\Delta\nu} = \frac{18}{4} = 4,5 = k + \frac{1}{2} \quad k=4$$

ce qui permet de calculer la fonction d'ambiguïté commodément compte tenu des harmoniques de rang inférieur ou égal à 4.

Dans le cas général de signaux dont les bandes spectrales harmoniques se recouvrent il faut calculer les termes

$\chi_{S_{kSm}}(\tau, \eta)$. Pour les signaux tels que $S_k(t)$ soit un signal à grand coefficient η et même pour $k=1$ on peut alors utiliser les méthodes asymptotiques qui facilitent les calculs de ces termes.

(6a)(6b)

IV - RESOLUTION ANGULAIRE DIFFERENTIELLE ET PERFORMANCES SONAR

DES CHAUVES SOURIS :

T.C. PEFF et J.A. SIMMONS ont étudié la résolution angulaire différentielle obtenue par les chauves souris *Eptesicus fuscus* et *Phyllostomus hastatus*. Pour ce faire ils ont entraîné ces animaux à choisir entre deux cibles celle qui est la moins éloignée angulairement d'une cible centrale. Ces trois cibles



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

sont placées sur un cercle dont l'animal occupe le centre. La résolution est exprimée à l'aide de l'angle θ_{\min} où l'animal choisit la cible la plus proche avec une efficacité de 95%. θ_{\min} est de l'ordre de 6 à 8° pour les deux espèces citées. Ces performances peuvent s'expliquer :

- soit par une directivité à l'émission et à la réception
- soit à l'aide d'un traitement par intercorrélation.

Compte tenu des dimensions des organes d'émission et de réception des espèces étudiées qui sont de l'ordre de la longueur d'onde des signaux utilisés une telle résolution angulaire paraît difficile à obtenir en utilisant la seule propriété de directivité.

La deuxième hypothèse paraît plausible d'après certaines études (26) (27). Pour la tester nous avons simulé le signal d'*Eptesicus fuscus* et calculé $\Gamma_S(\tau)$ et $\delta_S(\nu)$ comme le montre la figure 9a. La figure 9b décrit le dispositif utilisé par SIMMONS ; appelons :

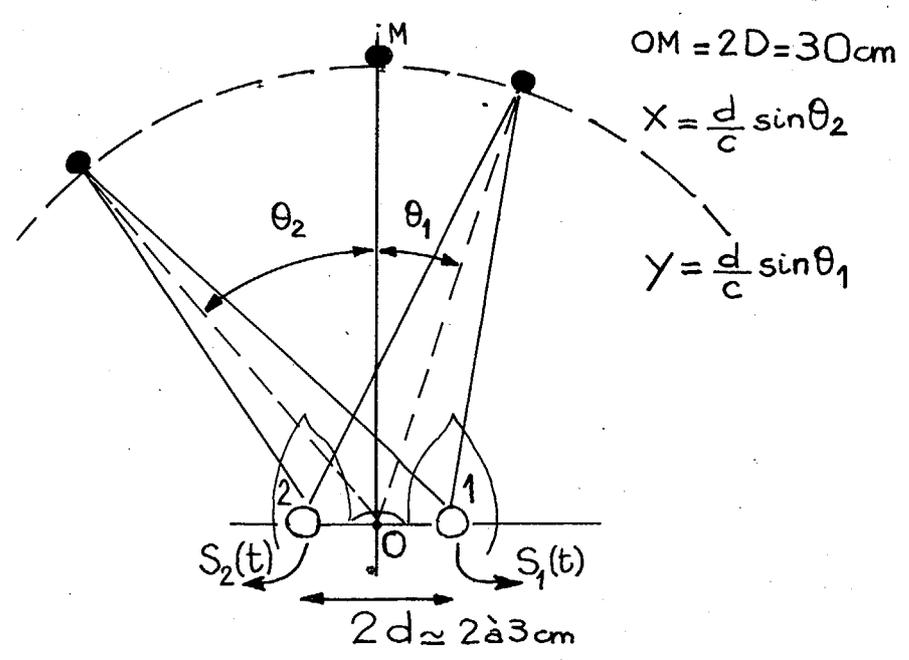
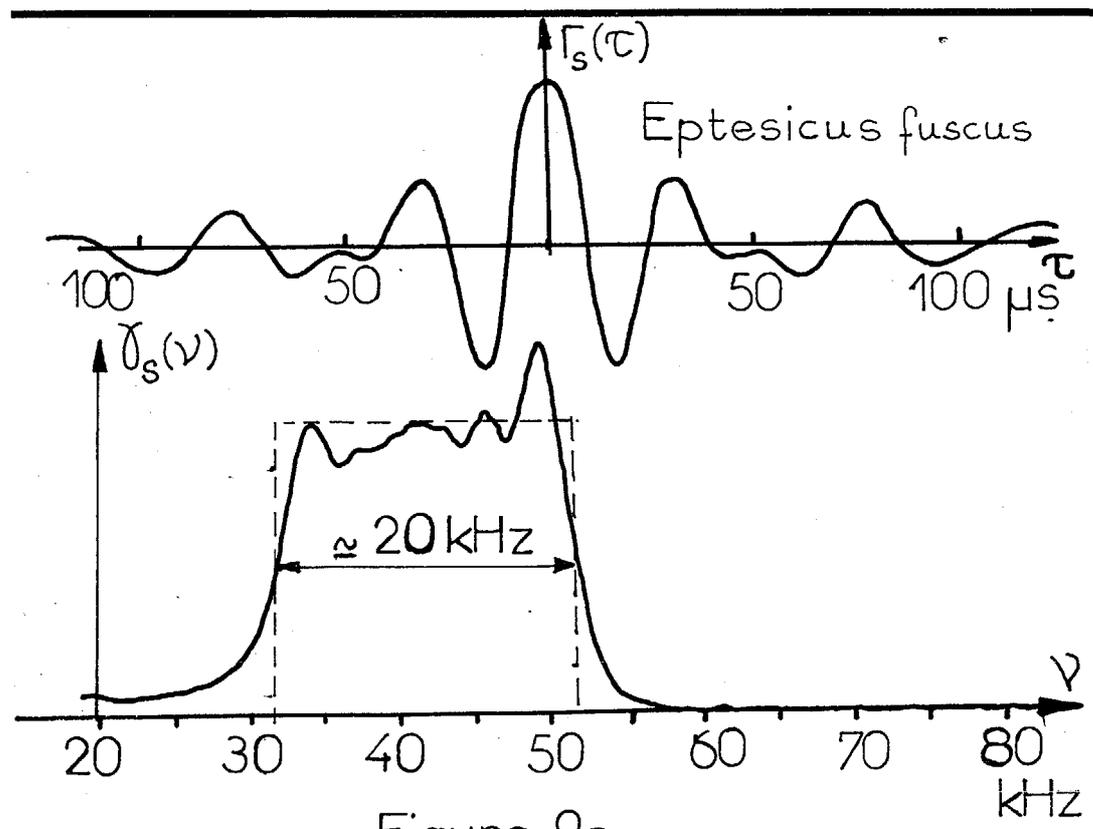
$$\begin{cases} S_1(t) = S(t-\tau_0) + S(t-\tau_0-x) + S(t-\tau_0+y) \\ S_2(t) = S(t-\tau_0) + S(t-\tau_0+x) + S(t-\tau_0-y) \end{cases}$$

(cf figure 9b)

$$\text{d'où : } \Gamma_{S_1 S_2}(\tau) = \Gamma_S(\tau) + 2\Gamma_S(\tau-x) + 2\Gamma_S(\tau+y) + \Gamma_S(\tau-2x) + \dots + \Gamma_S(\tau+2y) + 2\Gamma_S(\tau+y-x)$$

Le dernier terme de la relation exprimant $\Gamma_{S_1 S_2}$ détruit la symétrie de $\Gamma_S(\tau)$ autour de $\tau=0$ pour $x \neq y$. La "résolution angulaire différentielle" se ramène donc à la "discrimination" entre les fonctions $\Gamma_S(\tau)$ et $\Gamma_S(\tau+y-x)$. Notons que dans le cas d'une réception avec filtrage adapté sur chaque voie puis l'intercorrélacion entre les sorties, le résultat obtenu est de même nature que ci-dessus compte tenu de la densité spectrale quasi rectangulaire du signal émis. La structure fine de la fonction $\Gamma_S(\tau)$ (figure 9a) permet une telle résolution pour $x-y \geq 4\mu\text{s}$, ce qui correspond à $\theta_1 - \theta_2 \approx 7^\circ$, pour $\theta_1 \approx \theta_2 \approx 20^\circ$. Ce résultat est en accord avec ceux obtenus par PEFF et SIMMONS. Une telle possibilité de traitement, confirmée par certains travaux (26) (27), fut déjà mise en évidence (28)(30). Contrairement aux assertions de

SONARS BIOLOGIQUES AERIENS





O.W. JENSON (22) page 133) les décalages temporels binauraux de cet ordre sont décelables par des systèmes biologiques opérant par intercorrélation.

De telles performances angulaires impliquent une résolution temporelle quinze fois supérieure à celle qu'utilise l'animal dans les mesures de distance (1) (2) (3) (29). Dans de telles mesures faites sur des cibles placées à 50 cm de l'animal le retard signal émis écho est de l'ordre de 3,000 μs . Pour utiliser la structure fine de la fonction de corrélation, c'est à dire pour $|\tau| \leq 5 \mu s$, il eut fallu que le temps de parcours (3000 μs) fut stable à 10^{-4} près donc que la vitesse du son dans l'air possédât cette stabilité. En fait il n'en est rien compte tenu des inhomogénéités thermiques et des turbulences inévitables dans l'air ne seraient que celles dues à la présence de l'animal. (31). Ces effets se traduisent par la nature aléatoire de la date d'arrivée t_0 du signal écho à trajet sonore donné. Compte tenu de la nature fluctuante du retard à mesurer il est inutile, voire même nuisible, de rechercher la précision maximale (32). Ce fait est justifié théoriquement par la structure optimale du récepteur d'un signal de date d'arrivée inconnue comme l'a montré O. MACHUL (33).

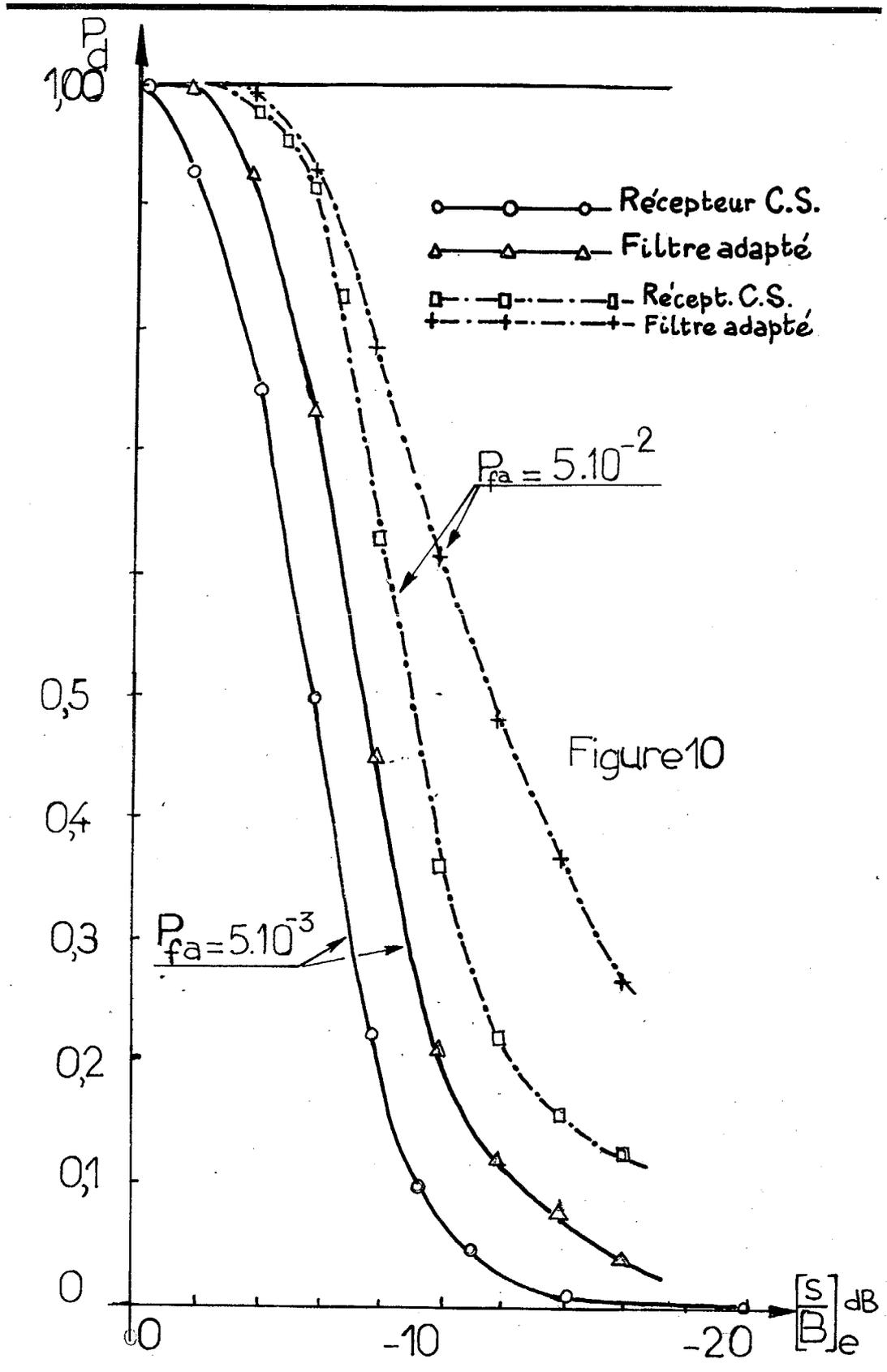
V - PERFORMANCES D'UN MODELE BIONIQUE DE RECEPTEUR

Divers résultats antérieurs (34) ont conduit à la réalisation d'un modèle bionique de récepteur (35), puis à son amélioration (36).

Les performances de la dernière version de cet appareil ont été testées en ce qui concerne les probabilités de détection et de fausse alarme (courbes COR).

La probabilité de fausse alarme a été déterminée à partir de la densité de probabilité de la sortie échantillonnée du récepteur, en l'absence de signal d'entrée (37) (38).

SOMARS BIOLOGIQUES AERIENS





SONARS BIOLOGIQUES AER-ENS

La probabilité de détection est obtenue à partir de la densité de probabilité du signal de sortie du récepteur, échantillonnée à la fin de chaque signal reçu.

La figure 10 compare les performances expérimentales d'un tel dispositif et celles d'un récepteur du type filtre adapté réalisé à l'aide d'un corrélateur. On constate une perte d'environ 2 dB en rapport S/B à l'entrée. Cette perte ne peut pas être due au procédé de mesure des performances qui est le même pour les deux types de récepteur. Par contre cet écart est attribuable à la réalisation de cet appareil et pourrait certainement être réduit dans une version technologiquement plus élaborée.

CONCLUSION

Les différents résultats présentés mettent en évidence l'existence chez de nombreuses chauve souris d'un traitement cohérent des échos reçus. Ce mode de traitement, qui n'était pas totalement confirmé par les performances de résolution en distance, l'est beaucoup plus par celles obtenues en résolution angulaire. Ce travail ne constitue toutefois que le début de cette étude qui au vu des résultats obtenus doit se poursuivre notamment par l'élaboration des fonctions d'ambiguïté (large bande) des signaux utilisés.

REMERCIEMENTS :

Les auteurs tiennent à remercier tout spécialement leur collègue J.A.SIMMONS pour son aimable collaboration et discussion au sujet de ses travaux. L'aide apportée par le Centre de Calcul de l'I.C.P.M. leur fut très précieuse. L'étude des performances du récepteur fut menée à bien grâce au concours précieux de la DRME et à l'efficacité de Monsieur DRUTEL. Cette étude fut entreprise et poursuivie grâce au bienveillant intérêt scientifique de Monsieur MERMOZ que les auteurs ne sauraient oublier.



SONARS BIOLOGIQUES AERIENS

BIBLIOGRAPHIE

- (1) J.A. SIMMONS Science 5 Mars 71 vol 171 p.925-928 1971
- (2) " " J.A. VERNON J.exp.Zool.vol 176 n° 3 1971
p.315-328
- (3) " " Com. priv. (JASA à paraître) 1973
- (4) D. CARLANDER Animal SONAR System R.G. BUSNEL Edit. 1967
t II
- (5) R.A. SMITHERS J.exp. Zool. Vol 158 n° 3 Avril 1965
- (6a) E.T. COPSON Asymptotic Expansions Cambridge PRESS 1967
p.27-35
- (6b) B. ESCUDIE et al. à paraître 1973
- (7) J. VILLE Câbles et Transmis. n° 1 2° Année n°1 1948
p.61-74
- (8) R.A. ALTES Methods of Wideband signals design for 1971
Radar and Sonar Systems Thèse Univ.
Rochester Ny USA
- (9) B. ESCUDIE A. DZIEDZIC G. BARREAU Rev. Acoustique 1972
p.26 vol 5
- (10) R.A. JOHNSON Energy spectrum analysis as a proces- 1972
sing mecanisme for Echolocation. Thèse
Univ. Rochester Ny USA.
- (11) B. ESCUDIE et al 2^{ème} Colloque GRETSI Nice 1969
- (12) B. FARRIS S.A. BRAMER Proc. IEEE vol 56 n°12 p.2149 1968
- (13a) H.U. SCHNITZLER Proc. 2nd Intern. Bat. Conf.
BIJDRAGEN TOT DE DIERKUNDE 40(1) 1970
- (13b) E. Sh. AYRAPETYANTS A. I. KOMSTANTINOV Echolocation
in Nature URSS Academy of Sciences p.67 1970
- (14) J.W. BRADBURY J. exp. Zool. vol 173 p.23-46 Janv 1970
- (15a) D.R. GRIFFIN Animal SONAR System, R.6. Busnel Ed. T1 1967
p. 273-300
- (15b) L. GUYESSE et P. SABATHÉ Acoustique sous marine Dunod Ed. 1964
- (16) J.A. SIMMONS Response of the Doppler Sonar System 1972
in Bat Int. Rept Washington Univ.
St Louis USA
- (17) CARPENTIER Radar théories Modernes Dunod 1963
- (18) P.S. HILL et P.M. SCHULTHEISS J.A.S.A. vol 51 n°6 1972
Part 1 p. 1802-1811
- (19) P. FAURE JASA 36 (2) p.259 1964
- (20) V.V. OLSHEVSKII Ac. Sci. URSS Nauka Press Moscou 1966
- (21) H.U. SCHNITZLER Z. Vergl. Physiologie p.25-37 1970



SONARS BIOLOGIQUES AERIEUS

- (22) O.W. HEMSON Biology of Bats vol.2 1972
- (23) C.W. HELSTROM, Statistical theory of Signal Detec. 1960
Perg. Pr. NY
- (24) D. GABOR Theory of Communication J. IEE Vol 33(3) 1946
.n°20 p.429
- (25) T.C. PEPP - J.A. SIMMONS JASA Vol 31 n° 3(2) p.2063 1972
- (26) J. FONDREFFO Science Progrès Découvertes p.11 Mai 1972
- (27) JCR HILFELDER Three auditory theories ; a study of Science Vol Ed SKOCH Mc Graw Hill 1969
- (28) L. PIMONOV vibrations en régime transitoire Dunod 1962
- (29) J.A. SIMMONS Orientations sensory basis Helmut Adler Ed, Annals of New York Acad. of Sciences vol 188 p.161-174- 1971
- (30) P. GREGUSS Nature Vol 219 Août 68 p.482 1968
- (31) D. BLOKHINTZEV JASA Vol 18 n°2 p.329-334 oct. 1946
- (32) M. CARPENTIER Radar Theories Modernes Dunod p.30 et 123 1963
- (33) O. MACCHI Annales de Télécommunications 25 Juil, Août 1970
- (34) H. MERMOZ A.D. GRIMMEL Sonars animaux R.G. BUSIÈRE Ed. Colloque Frascati p.451 et p.482 Tome 1 1967
- (35) B. ESCUDIE et al. 3ème colloque Nat. Trait. Sign. Nice - Juin 1971
- (36) Rapport Final DRME Contrat 7 1326 1972
- (37) B. PICINBONO A. BLANC LAPIERRE PSBF Masson Ed. page 78-81 1961
- (38) B. PICINBONO Thèse doct. ès Sciences Univ. Alger 1960