



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS

34/1

NICE - 5 AU 10 MAI 1969

RESULTATS PRELIMINAIRES D'UNE ETUDE DE CERTAINS
SONARS BIOLOGIQUES

- ANALYSE SPECTRALE DE SIGNAUX DE 7 ESPECES DE
CETACES ODONTOCETES.
- ETUDE D'UN MODELE MATHEMATIQUE D'UN SONAR
BIOLOGIQUE AERIEN.

A. DZIEDZIC, B. ESCUDIE, A. HELLION, C. VIAL,



DEUXIÈME COLLOQUE
SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL
ET SES APPLICATIONS

34/3

NICE - 5 AU 10 MAI 1969

RESULTATS PRELIMINAIRES D'UNE ETUDE DE CERTAINS SONARS
BIOLOGIQUES.-

- ANALYSE SPECTRALE DE SIGNAUX DE 7 ESPECES DE CETACES
ODONTOCETES -
- ETUDE D'UN MODELE MATHEMATIQUE D'UN SONAR BIOLOGIQUE
AERIEN -

A. DZIEDZIC^{*}, B. ESCUDIE^{**}, A. HELLION^{**}, C. VIAL^{**}

INTRODUCTION

De nombreuses études expérimentales (1,3,4), ont démontré que certaines espèces de chauves-souris de de Delphinidae, possèdent un système sonar naturel qui surclasse à différents points de vue les systèmes technologiques analogues, même les plus élaborés.

La connaissance du fonctionnement de ces sonars naturels et des caractéristiques physiques des signaux sur lesquels ils reposent, présente donc un intérêt certain dans le cadre d'une étude bionique et de traitement du signal.

Cet exposé rapporte d'une part les résultats analytiques préliminaires d'une étude entreprise sur les signaux d'écholocation utilisés par diverses espèces de Cétacés odontocètes ; d'autre part l'étude et la réalisation d'un modèle mathématique d'un sonar de chauve-souris, d'après des données analytiques publiées par D.CAHLANDER(2) et devant servir à des travaux expérimentaux (masquage et diffus en particulier) sur les signaux d'écholocation.

.../...

* Laboratoire de Physiologie Acoustique I.N.R.A. E.R.A. n°38
78- Jouy-en-Josas
Directeur R.-G. BUSNEL.

** Institut de Chimie et Physique Industrielles 25, rue du Plat
69- LYON 2e.



...

A.- ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX D'ECHOLOCATION DE 7 ESPECES DE CETACES ODONTOCETES.

Les documents sonores utilisés pour ce travail proviennent tous d'enregistrements réalisés en mer* sur des animaux en liberté, à l'exception de ceux du marsouin Phocaena phocaena qui ont été faits au Danemark lors de diverses expériences sur des animaux captifs.

Seuls les signaux impulsionnels d'écholocation émis par les animaux pour la détection d'obstacles et de proies ont été utilisés pour :

- 1° - déterminer les bandes de fréquences couvertes.
- 2° - préciser ultérieurement leur propriété du point de vue sonar.

I. - MATERIELS ET METHODES

I - I Prise de son -

Les enregistrements ont été réalisés avec des hydrophones H P 40 (Marine Nationale) ou LC32 et LC10 (Atlantic Research Corp) associés avec des magnétophones Ampex (307 et SP 300 - 4 pistes) Tolana ER 850 M- ou Nagra III B . Les bandes passantes suivant les chaines utilisées étaient comprises entre 40 Hz et 30-50 ou 100 kHz.

.../...

* Expéditions réalisées par le laboratoire de Physiologie Acoustique avec l'aide financière des organismes suivants : I.N.R.A. C.N.R.S. O.N.R. O.T.A.N.



...

I - 2.- METHODES ANALYTIQUES

Plusieurs échantillons de signaux de chaque espèce, montés sur boucles magnétiques ont été analysés par 2 méthodes différentes :

1° - avec un analyseur hétérodyne type A.F- 10 S (L.E.A.) à fréquence chercheuse, dans les gammes de 1 à 15 kHz et 15 à 50 kHz et une sélectivité de 30 Hz. Dans ce cas chaque gamme a été exploré 6 fois, la durée de chaque exploration automatique étant de 150 s.

2° avec un corrélateur type CTR 100 de la S A I P et transformation de FOURIER de la fonction d'auto-corrélation par voie numérique.

Chez les Delphinidae, la fréquence de répétition des impulsions d'écholocation, peut atteindre et même dans certains cas dépasser 800 impulsions/s, la constitution d'une boucle magnétique ne contenant qu'un seul signal est donc très délicate.

Aussi, les analyses réalisées avec l'analyseur hétérodyne, ont-elles généralement porté sur des salves entières et les résultats obtenus dans ce cas, représentent le spectre moyen de chacune d'elles,

Par contre, l'ensemble des appareils mis en jeu avec le corrélateur dont le bloc diagramme est représenté sur la fig.I. permettait, grâce à un jeu de portes de largeurs réglables, l'analyse d'un signal unique répété un nombre de fois suffisant (supérieur à 15) pour obtenir une fonction d'autocorrélation d'amplitude suffisante.

II.- RESULTATS

Dans les sonars biologiques on distingue 2 phases d'émission dites ^{de} veille et d'attaque. Pendant la première, la fréquence de répétition est faible, de l'ordre de quelques dizaines d'impulsions/s, tandis que pendant la seconde, on observe un accroissement rapide de la cadence d'émission et une certaine diminution de la durée des impulsions. Les spectres d'impulsions



...

uniques, suivant qu'ils appartiennent à l'une ou à l'autre de ces 2 phases, diffèrent donc par la largeur de leurs bandes.

Par ailleurs, pour une même espèce, les écarts observables sur les résultats analytiques sont encore dûs :

1°- aux affaiblissements dûs à l'absorption de propagation et à la directivité des émissions.

2°- à la possibilité naturelle qu'ont les animaux de modifier la forme des cavités associées à leur organe émetteur.

La première de ces deux causes est surtout appréciable sur les enregistrements réalisés en mer où la distance et la position de l'émetteur par rapport au récepteur sont continuellement variables ; la seconde, qui est occasionnelle s'explique par l'auto-adaptivité des animaux à une situation particulière.

Pour ces différentes raisons, dont l'influence est surtout notable en haute fréquence, on a volontairement limité la bande d'analyse à la plus faible bande passante des diverses chaînes d'enregistrement qui ont été utilisées, c'est-à-dire 30 kHz. Cette limitation ayant par ailleurs l'avantage d'éviter les copies et les ralentissements successifs, générateurs de distorsions parfois importantes.

Par conséquent, les analyses données ici, ne doivent pas être considérées en valeur absolue. Néanmoins, les divers écarts observés, ne détruisent pas le caractère spécifique des résultats.

Sur la fig. 2 et 2 bis on a représenté les oscillogrammes et les spectres correspondants des signaux d'écholocation utilisés pendant une phase d'approche et de veille par le marsouin Phocaena phocaena en captivité.



...

La durée de ces signaux est comprise entre 0,85 ms et 5 ms et leur spectre moyen s'étend jusqu'à 25 kHz à -12 dB par rapport au maximum situé vers 1 kHz.

Grâce à des signaux de ce type, le marsouin aveuglé expérimentalement, peut détecter des fils métalliques n'ayant que 0,2 mm de diamètre (1).

Les fig. 3 et 3 bis se rapportent au cachalot Physeter catodon - (enregistrement réalisé au large de Madère).

Sans qu'aucune preuve expérimentale n'ait été donnée quant à l'utilisation de l'écholocation par cette espèce, la forme impulsionnelle de ses signaux permet néanmoins de la penser.

Le spectre moyen des impulsions, qui ont une durée maximum de 6 ms, couvre une bande comprise entre 2,5 et 10 kHz, celui obtenu (fig.3 bis) à partir de la fonction d'autocorrélation d'une seule impulsion s'y apparente étroitement.

L'analyse suivante est relative au dauphin Delphinus delphis d'après des enregistrements réalisés en Méditerranée.

Les signaux émis par cette espèce ont une durée comprise entre 0,07 et 1,3 ms. Leurs spectres (fig.4 et 4 bis) présentent un maximum vers 2 kHz, couvrent une bande à -6dB par rapport à cette fréquence comprise entre 800 et 5000 Hz.

Une autre espèce enregistrée en Méditerranée, est le T. truncatus. Les signaux qu'il utilise en écholocation, ont une durée comprise entre 0,1 et 0,13 ms, ils sont parfois émis en doublet d'une seule polarité, positive ou négative et leur spectre moyen représenté sur la fig.5 s'étend au delà de 30 kHz, le maximum étant situé vers 1 kHz.



...

Dans le cas du spectre moyen de la fig.5, les composantes situées vers 24 kHz atteignent un niveau de 1,5 dB inférieur à celui de la dominante B.F., par contre dans le signal unique analysé par autocorrélation, ce sont ces fréquences H.F qui prédominent (fig. 5 bis)

- Les fig. 6 et 6 bis, se rapportent aux signaux émis par Grampus griseus, comme pour T. Truncatus, on observe chez cette espèce des impulsions monopolaires émises parfois en doublets. La durée des signaux est comprise entre 0,05 et 1 ms parfois plus longues par suite des réverbérations successives comme c'est le cas des 2 impulsions dont les oscillogrammes sont donnés au haut de la fig.6.

les analyses spectrales donnent par les 2 méthodes employées, des résultats parfaitement cohérents. On trouve 2 bandes de fréquences préférentielles de part et d'autre de 10 kHz, depuis 0 jusqu'à 30 kHz.

- Les fig. 7 et 7 bis représentent les résultats analytiques des signaux émis par le Globicephala melaena, (enregistré en Méditerranée). La durée des signaux utilisés en écholocation par cette espèce est comprise entre 0,08 et 15 ms et leur bande recouvre entièrement celle des chaînes d'analyse utilisées. Les fréquences dominantes sont situées vers 20 kHz.

- Enfin, la dernière espèce étudiée est le Steno breanensis (rencontré dans l'archipel de Madère). Les signaux émis par cet animal ont une durée comprise entre 0,08 et 0,15 ms (fig.8) la fréquence dominante se situant vers 20 kHz.

- Dans la fig. 9, on a regroupé les résultats individuels présentés ici. Pour chaque espèce on a tracé les bandes de fréquences couvertes par leurs émissions d'écholocation à -3, -6 et -9 dB par rapport aux fréquences dominantes.

Respectivement de haut en bas de cette figure et pour chacun de ces 3 niveaux, les tracés correspondent à 1-P. phocaena, 2-S. bredanensis, 3-P. catodon, 4-D. delphis, 5-T. truncatus, 6- G. griseus, 7- G. melaena,



...

Ces tracés montrent en particulier qu'à -9 dB par rapport aux niveaux maximums, la bande des émissions couvre totalement celle des chaînes d'analyse.

Si les niveaux d'émission des signaux analysés ici ne sont pas connus avec précision, les expériences sur le marsouin, nous ont permis pour cet animal d'évaluer à 30 dB /barye, le niveau global maximum à 1m, dans l'axe sagittal de l'animal. Ce niveau peut varier dans des proportions importantes suivant les individus et les situations expérimentales données, néanmoins, les observations sur les autres espèces mentionnées ici, indiquent que ce chiffre peut également s'appliquer à chacune d'entre elles.

CONCLUSION -

Les résultats exposés dans cette première partie montrent que dans chaque cas considéré, les spectres portent une signature spécifique bien caractéristique, et que comparativement, entre les diverses espèces, les différences de structure et de forme des signaux sont parfois très importantes. Ceci, par exemple, est particulièrement net lorsque l'on compare les signaux utilisés par P. phocaena avec ceux du G. melaena ou du T. truncatus. Chez le premier la largeur de bande est faible, alors qu'elle est au contraire très large pour les autres, dépassant certainement la gamme de la présente analyse. Il s'en suit donc que les performances en localisation et révolution en distance doivent également présenter des différences notables. Dans ces conditions, si l'on considère les résultats expérimentaux obtenus chez P. phocaena et qui sont déjà très remarquables (I) et que, apparemment, cette espèce semble la plus défavorisée parmi toutes celles considérées ici, (vu l'étroitesse de la bande couverte par ses émissions basses fréquences), on doit donc s'attendre dans ces autres cas à des performances encore meilleures. Ceci étant d'un grand encouragement dans la poursuite de ces travaux.



BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- 1 - BUSNEL, R.-G., DZIEDZIC A., - Résultats métrologiques expérimentaux de l'écholocation chez le Phocaena phocaena et leur comparaison avec ceux de certaines chauves-souris.
Les systèmes sonars animaux - Cours d'Eté
O.T.A.N. Frascati 1966 - R.-G. BUSNEL éditeur.
- 2 - CAHLANDER, D.A. Echolocation with wide band waveforms : bat sonar signal, Tech, Rep. Lincoln lab. M.I.T. 271, 1964.
- 3 - DZIEDZIC, A - Performances des sonars biologiques et problèmes connexes.
Colloque National du Groupe d'Etudes du Traitement du Signal. Nice 17.20. Août 1967.
C.N.E.T. Collection Technique Scientifique - revue d'optique 1968.
- 4 - GRIFFIN , D.R. FRIEND, J.H. WEBSTER, F.A.
Target discrimination by echolocation of bats -
Science, 144 : 563, 1964.



B) - ETUDE D'UN MODELE MATHEMATIQUE DE SONAR
BIOLOGIQUE AERIEN ESTIMATION DES PERFORMANCES

A.DZIEDZIC, B.ESCUDIE, A.HELLION, C.VIAL

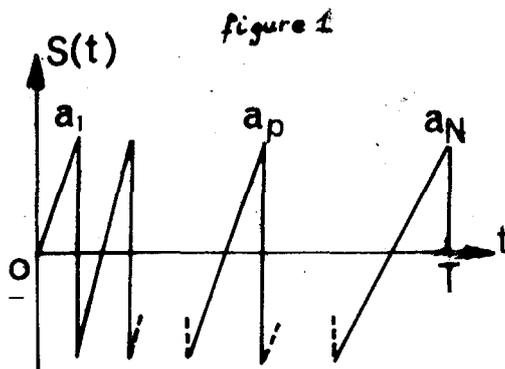
I.N.R.A. et I.C.P.I. Laboratoire d'électronique
 et de traitement du signal

Introduction :

Les travaux de D.CAHLANDER (1) (2) ont montré qu'il était possible de chiffrer les performances des sonars biologiques à l'aide des notions utilisées en SONAR et RADAR. Une expression mathématique des signaux émis permet un calcul aisé des grandeurs caractéristiques ; bande passante, densité spectrale, et fonction d'autocorrélation. On compare les résultats théoriques à ceux de CAHLANDER afin d'en vérifier l'accord. S'il y a concordance, le modèle permettra la génération artificielle des signaux facilitant l'étude dans ce domaine.

1) Elaboration du modèle

Les signaux de veille, de détection et de poursuite du but (signaux notés n° 2,3,4,5,6 par CAHLANDER) sont à modulation de période sur la durée T. On définit la période comme l'intervalle entre deux instants successifs de passage à zéro.



$$S(t) = \sum_{p=1}^N S(t_p, t_{p-1}, t)$$

où $S(t_p, t_{p-1}, t)$ est le p ème motif du signal, connaissant la distribution des instants de passage à zéro t_p, t_{p-1}, \dots

$S(t_p, t_{p-1}, t)$ est l'équation d'une dent de scie dont les paramètres dépendent des instants de passage à zéro t_p, t_{p-1} . Selon la distribution des instants t_i , nous obtiendrons des lois de variation des passages à zéro correspondant aux signaux des deux espèces étudiées par CAHLANDER : MYOTIS LUCIFUGUS et LASIURUS BOREALIS. On peut étendre ce procédé à n'importe quel type de signal de sonar biologique. L'annexe (I) donne le calcul détaillé dans les deux cas cités ci-dessus.



pieme dent de scie $S(t_p, t_{p-1}, t) = at + \beta$
pour t_{p-1}, t, t_p

$$\begin{cases} a = \frac{1}{t_p - t_{p-1}} \\ \beta = \frac{t_{p-1} + t_p}{2(t_{p-1} - t_p)} \end{cases}$$

Dans les signaux réels les amplitudes ai ne sont pas constantes, ce phénomène est du à un filtrage par la cavité d'émission dont nous tiendrons compte dans les calculs.

2) Analyse spectrale des signaux :

a) spectre du signal

Le signal s'écrit :

$$S(t) = \sum S(t_p, t_{p-1}, t) \quad \mathcal{L}(v) \Leftrightarrow S(t)$$

$$\mathcal{L}(v) = \sum \mathcal{L}(t_p, t_{p-1}, v) \quad \mathcal{L}(t_p, t_{p-1}, v) \Leftrightarrow S(t_p, t_{p-1}, t)$$

$$\mathcal{L}(t_p, t_{p-1}, v) = \text{Re } \mathcal{L}_p + \text{Im } \mathcal{L}_p = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t_p, t_{p-1}, t) e^{-2i\pi vt} dt$$

$$\text{Re } \mathcal{L}_p(\omega) = \frac{a}{\omega^2} (\cos \omega t_p - \cos \omega t_{p-1}) + \frac{a}{\omega} (t_p \sin \omega t_p - t_{p-1} \sin \omega t_{p-1}) + \frac{\beta}{\omega} (\sin \omega t_p - \sin \omega t_{p-1})$$

$$\text{Im } \mathcal{L}_p(\omega) = \frac{a}{\omega^2} (\sin \omega t_{p-1} - \sin \omega t_p) + \frac{a}{\omega} (t_p \cos \omega t_p - \dots - t_{p-1} \cos \omega t_{p-1}) + \frac{\beta}{\omega} (\cos \omega t_p - \cos \omega t_{p-1})$$

On calcule alors par voie numérique

$$- |\mathcal{L}(v)| = \left[\left(\sum \text{Re } \mathcal{L}(p, v) \right)^2 + \left(\sum \text{Im } \mathcal{L}(p, v) \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$- \gamma(v) = |\mathcal{L}(v)|^2$$

$$- \Phi(v) = \text{Arctg} \left(\text{Im} / \text{Re} \right)$$



b) fonction d'autocorrélation

Possédant $\gamma_S(\nu) = |S(\nu)|^2$ la méthode de transformée de Fourier proposée par J.M FAUQUE (3) nous permet d'obtenir rapidement :

$$\Gamma_S(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t)S(t-\tau) dt$$

Connaissant $\gamma_S(\nu)$ et $\Gamma_S(\tau)$ on peut définir la bande énergétique B_e :

$$B_e = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \gamma_S(\nu) d\nu}{[\gamma_S]_{\max}}$$

Cette quantité reliée aux propriétés de décroissance de $\Gamma(\tau)$ permet de chiffrer les performances de séparation en distance, sous l'hypothèse que l'animal effectue un traitement cohérent du signal reçu.

3) Résultats obtenus dans le cas MYOTIS

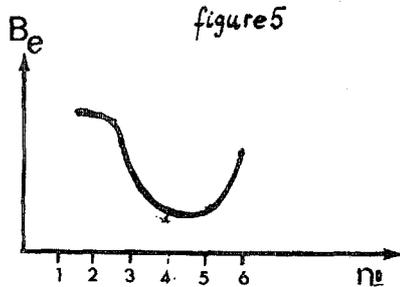
a) Les figures 2a, b et la fig. 3 montrent le module et la phase de différents signaux émis. Les figures 4a, b, c, d montrent les densités spectrales et les fonctions d'autocorrélation.

Les bandes énergétiques B_e calculées et comparées aux données de CAHLANDER montrent :

- B_e est de l'ordre de l'excursion en fréquence
- τ_c exprime cette quantité (τ_c est le rayon de corrélation pris comme valeur du premier zéro de $\Gamma(\tau)$)

SIGNAL	DUREE T	ν_d khz	ν_f khz	B_e khz	τ_c μ S	B_e T
2	3,2ms	100	40			
3	2,2ms	100	35	30	4	66
4	0,8ms	50	30	15,5	6	12,4
5	0,4ms	40	22	17,5	8	7
6	0,3ms	50	17	24,5	9,5	7,35

On constate que l'animal utilise :



permet peut être la reconnaissance des formes (6)

b) En fait le signal possède un facteur de forme car les amplitudes a_i ne sont pas constantes. J.D. PYE (4) a montré expérimentalement que cet effet était dû à un filtrage du signal par la cavité d'émission de l'animal. On peut assimiler cet effet à un filtrage par un circuit résonnant de surtension Q faible :

$$1 \leq Q \leq 3$$

$$h(x) = \frac{iQx}{1+iQx(1-x)}, \quad x = \frac{\nu}{\nu_0}, \quad \nu_0 \text{ fréquence d'accord}$$

Le calcul de la transformée de Fourier de la nouvelle densité spectrale

$$\gamma_s(\nu) \cdot |h(\nu)|^2$$

fournit $\Gamma(\tau)$

c) Lors du congrès de FRASCATI, H. MERMOZ a suggéré que les performances obtenues par les animaux pouvaient peut être s'expliquer par différents procédés de traitement (5)

(1) - Les traitements non cohérents sensibles à la puissance, du genre détection linéaire ou quadratique.

(2) - Les traitements cohérents par comparaison avec la structure du signal émis (type filtre adapté, convolution avec copie, ...)

Dans le cas du parasite appelé "diffus" ou "réverbération", qui est un filtrage aléatoire par des centres diffuseurs (feuilles, brindilles, branches dans le cas des chauves souris) du signal émis, on montre (cf annexe II) que le rapport (signal/diffus) pour un signal modulé en fréquence est amélioré par rapport à un signal à fréquence pure dans le rapport :

- durant la veille un signal à coefficient BeT gd
- durant la localisation BeT diminue, Be , T
- à proximité de la cible ona $T=0,6ms$; Be augmente à nouveau comme le montre la figure 5. Ceci suggère que l'animal utilise les parties "hautes fréquences" du spectre d'émission pour obtenir une image sonore, qui



$$g = 5 \log_{10} BT \quad \text{procédé (1)}$$

$$g = 10 \log_{10} BT \quad \text{procédé (2)}$$

Si on trace cette quantité en fonction des différents types de signaux on obtient les résultats suivants :

Type	Signal	(Khs)	B.T	g_2 (dB)	ϵ_1 (dB)
MYOTIS	Veille 2	60	190	23	11,5
	localisation 3	60	190	22	11
	poursuite 4	20	16	12	6
	interception 5	18	9	10	5
	proximité 6	25	7,5	8,7	4,3
LASIURUS	Veille	25	250	24	12

Ces gains montrent que dans tous les cas le parasite DIFFUS est combattu efficacement, si les hypothèses que nous avons faites au départ sont vérifiées. Le calcul du facteur BT montre en outre la souplesse de modulation de l'émetteur puisque ce facteur varie de 200 à 10. Ceci suggère de créer artificiellement des échos diffus afin d'observer les réactions de l'animal dans son émission, et les conséquences sur les performances de son système sonar en poursuite.

Signalons à ce propos que dans la lutte contre les parasites (bruits) D.CAHLANDER montre que l'expression du récepteur idéal dans le cas d'un parasite gaussien coïncide avec l'expression appelée fonction d'ambiguïté. Les parasites aériens sont en fait à très large bande et une étude est actuellement en cours pour en déterminer les caractéristiques statistiques d'ordre 1 et 2 et pour vérifier leur nature gaussienne.

4) Poursuite angulaire : Ambiguïté angulaire

a) Ambiguïté angulaire

Les différentes caractéristiques du modèle employé ayant été comparées aux résultats expérimentaux (), il faut maintenant essayer d'estimer les performances de l'animal lors de la poursuite. D.CAHLANDER utilise pour cela la notion d'ambiguïté. Cette grandeur s'interprète comme la sortie du filtre adapté au signal émis quand l'un ou plusieurs de ses paramètres sont



modifiés dans la formation de l'écho. Elle décrit aussi la séparation possible entre le signal émis et l'écho. La notion courante d'ambiguïté exprime les "séparations possibles" en distance et vitesse entre différents échos.

Une variable essentielle dans la poursuite des buts par l'animal est l'angle entre l'objectif et l'émetteur. Ceci introduit la fonction d'ambiguïté angulaire qui tient compte des angles d'émission et de réception des signaux. Cette grandeur a été introduite par H. URKOWITZ (7)(8). Nous ne pouvons pas utiliser la notion d'amplitude complexe du signal analytique, car l'émission n'est pas du type à bande étroite. Nous devons tenir compte de la réponse angulaire de l'antenne à L'EMISSION et à la RECEPTION.

Soit $D(\theta, t)$ la réponse percussive de l'antenne observée dans le gisement θ et $d(\theta, \nu)$ le gain complexe correspondant (cf fig.6). Le signal émis se déduit de $S(t)$ par :

$$S_{\text{émis}}(t) = S(t) * D(\theta, t) \Rightarrow \mathcal{L}(\nu) \cdot d(\theta, \nu)$$

L'effet Doppler dû à l'objectif est une compression de taux k

$$k = \frac{1 - v/c}{1 + v/c} \quad \text{d'où en appelant } S_r(t) \text{ le signal réfléchi :}$$

$$S_r(t) \rightleftharpoons \mathcal{L}\left(\frac{\nu}{k}\right) \cdot d\left(\frac{\nu}{k}\right)$$

et le signal reçu vaut :

$$S_{\text{reçu}}(t) = \mathcal{L}\left(\frac{\nu}{k}\right) \cdot d\left(\theta, \frac{\nu}{k}\right) \cdot d(\theta, \nu)$$

si le diagramme de directivité est identique en émission et en réception.

Le facteur de séparation s'écrit :

$$\epsilon^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left| S_{\text{émis}}(t) - S_{\text{reçu}}(t) \right|^2 dt$$

Ce qui compte tenu des énergies des deux signaux revient à étudier (8) (9) le double produit selon un calcul classique : $S(t)$ et $D(\theta, t)$ étant réels nous obtenons :



$$\Gamma_{SD}(\tau, k, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(\frac{\nu}{k}) d(\nu)^* d(\theta, \nu) d(\theta, \nu)^* d(\theta, \frac{\nu}{k}) d(\theta, \frac{\nu}{k})^* e^{-2i\pi\nu\tau} d\nu$$

La fonction d'ambiguité angulaire est donc :

$$\Gamma_{SD}(\tau, k, \theta) = \Gamma_D(\tau, k, \theta) *_{(\tau)D} \Gamma(\theta, \tau) *_{(\theta)S} \Gamma(\tau, k)$$

avec :

$$\Gamma_S(\tau, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(\frac{\nu}{k}) d(\nu)^* e^{-2i\pi\nu\tau} d\nu$$

fonction d'ambiguité du signal (10)

$$\Gamma_D(\tau, k, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(t, \theta) D(\theta, kt - \tau)^* dt$$

fonction d'ambiguité (angle, doppler)

$$\Gamma_D(\tau, \theta) = \int_{-\infty}^{+\infty} D(\theta, t) D(\theta, t - \tau)^* dt$$

fonction d'autocorrélation des
réponses d'antenne

Cette quantité n'est pas forcément séparable en fonction de θ et de k ; la fonction d'ambiguité n'est pas séparable à l'inverse du cas des émissions à bande étroite. Si l'émission est isotrope un terme en $d(\nu, \theta)$ disparaît. L'exploitation de ces quantités par voie numérique nécessite la connaissance de $D(\theta, \theta)$ ou de $d(\nu, \theta)$.

b) Réponse angulaire

D. CAHLANDER avait fait l'hypothèse que l'oreille de l'animal était assimilable à une antenne dispersive (1). Cette hypothèse lui avait permis de préciser les propriétés de localisation du dispositif. Nous avons, en tenant compte de la dépendance fréquentielle, étudié le rayonnement du à un contour idéalisé de l'oreille. En attendant des données plus précises on peut admettre qu'elle fonctionne comme une ouverture semi-circulaire, de rayon R faible devant la longueur d'onde.



On calcule (Annexe n° III) la figure de diffraction correspondante et on obtient pour $d(\nu, \theta)$:

$$d(\nu, \theta) = (c^2 \tau / 2 \nu \theta) \cdot J_1(2 \pi \nu \theta \tau)$$

Où C est la célérité du son, θ l'angle de gisement, τ le retard correspondant au trajet $S_2 = \tau$ (fig 7), J_1 la fonction de Bessel d'ordre 1.

Cette hypothèse fait apparaître un diagramme de rayonnement "large" en basse fréquence, et "concentré" en haute fréquence. Dans la bande B_e du signal émis $d(\nu, \theta)$ à l'aspect suivant (fig 6a, b). Cette hypothèse assez simple permettra d'étudier et de mettre au point la réalisation numérique du calcul de $\int_{SD}(\theta, t, k)$, en attendant des données plus élaborées. A notre avis seule une étude directe de l'oreille fournira $d(\nu, \theta)$ et un modèle mathématique convenable. Ces résultats exploités avec la notion d'ambiguïté préciseront les données et les performances en poursuite angulaire. Nous attendons de ces résultats une étude plus approfondie des phénomènes mis en jeu par le sonar biologique aérien.

CONCLUSION :

Ce modèle nous fournit une formulation commode des performances des signaux de sonar biologique aérien. Il permet en outre la génération artificielle des signaux des diverses phases de la poursuite de buts, un tel générateur est actuellement à l'étude. Dans cette perspective les comportements des animaux en présence de signaux parasites, dont les caractéristiques seraient connues, devraient fournir aux biologistes et aux ingénieurs de nombreuses possibilités d'action dans le domaine passionnant des sonars biologiques tant aériens que marins.

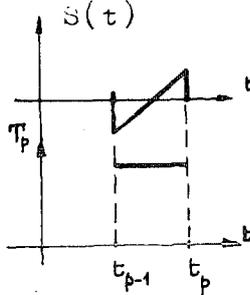
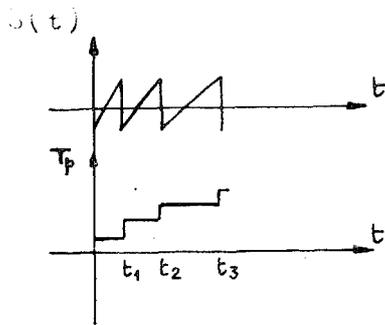
REMERCIEMENTS :

Les auteurs tiennent à remercier Monsieur B. POUJARDIEU du Laboratoire de Génétique Animale de l'INRA pour son amicale et fructueuse collaboration aux divers calculs sur machine de cette étude. Nous ne saurions trop remercier Monsieur H. MERMOZ, Directeur Scientifique du Laboratoire DSM du Brusac pour les conseils et les encouragements qu'il nous a apportés au cours de ce travail.



ANNEXE I :

Elaboration du modèle

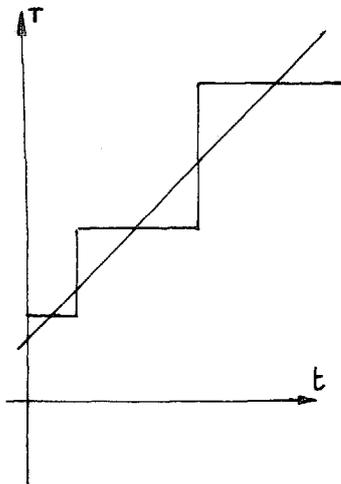


T_p période de la piène dent de scie

$$T_p = t_p - t_{p-1}$$

La courbe $T = f(t)$ doit être une droite

On suppose que les différents T_p sont liés par une relation de récurrence. Il s'agit donc de trouver cette loi qui est l'équation de la courbe en escalier approximée par une droite.



$T = f(t)$ peut se mettre sous la forme :

$$U_p = \sum_{q=1}^p U_q$$

p est le pième terme de la loi de récurrence

La loi $U_p = \sum_{q=1}^p U_q$ est une progression géométrique

$$D'où \quad T_1, q^{p-1} = T_1 \frac{1-q^p}{1-q} \quad \left\{ \begin{array}{l} q \text{ raison de la progression} \\ T_1 \text{ le premier terme} \end{array} \right.$$

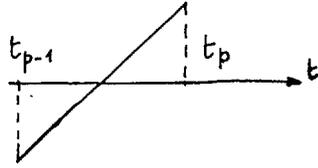
On a comme données: T_1 période initiale,

T_N période finale

T_s durée du signal

$$\begin{cases} T_s = T_1 (1-q^N)/(1-q) \\ T_N = T_1 q^{N-1} \end{cases}$$

et N nombre de dents de scie; $Q = \frac{T_1 - T_s}{T_N - T_s}$; $N = \frac{(T_N/T_1)}{\text{Log } Q}$



Equation de la dent de scie :

$$\alpha t + \beta = S(t)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{1}{t_p - t_{p-1}} \\ \beta = \frac{1}{2} \cdot \frac{t_{p-1} + t_p}{t_{p-1} - t_p} \end{array} \right.$$



ANNEXE II

Comparaison entre un traitement cohérent et un traitement non cohérent d'un signal mélangé à un parasite du type réverbération.

- a) Le traitement cohérent employé dans ce modèle est du type filtrage adapté ou convolution avec des copies du signal. Le traitement non cohérent est du type détection quadratique. Dans le premier cas

on a : $\left[\frac{S}{B} \right] = \frac{S_m^2}{\sigma^2} \leq \frac{E_s}{\gamma_0} ; E_s = \int_0^T S^2(t) dt$

$\gamma(y) = \gamma_0 = \text{cte}$ dans la "bande" du signal B_s

Si on compare ce traitement à un traitement quadratique qui fournit en sortie comme rapport signal sur bruit :

$$\left[\frac{S}{B} \right] = \frac{P_s}{P_b} \quad \text{où } P_b \text{ est la puissance moyenne du bruit}$$

en marquant que $E_s = P_s T$ (P_s du signal constante sur la durée T)

$$\text{on a : } P_b = \gamma_0 B_s, \quad E_s = P_s \cdot T.$$

$$\text{d'où } \left[\frac{S}{B} \right]_{\text{coh}} = \left[\frac{S}{B} \right]_{\text{n.coh}} \cdot B_s T$$

$$\text{soit un gain } g = \frac{\left[\frac{S}{B} \right]_{\text{coh}}}{\left[\frac{S}{B} \right]_{\text{n.c}}} = 10 \log_{10} B_s T \text{ (dB)}$$

- b) Le parasite appelé réverbération est en fait un parasite non stationnaire dont la puissance P_r varie au cours du temps selon la loi :

$$P_r = k(t) \cdot E_s$$

Si la densité des centres diffuseurs est très grande le parasite ne sera que peu ou faiblement corrélé au signal ; on peut dans le cas où $k(t)$ est lentement variable assimiler ce parasite à un bruit localement stationnaire et admettre en première approximation (11)

$$\gamma_{\text{rev}} = |d(\nu)|^2$$

$$\text{soit } \gamma_r(\nu) = d_r; \forall \nu \in B_s$$

$$\text{avec } d_r = \frac{P_r}{B_s} = \frac{k E_s}{B_s} = \text{cte dans la bande } B_s \text{ du signal}$$



c) Utilisons un filtrage cohérent avec $S(t)$ pour extraire le signal $S(t)$ du parasite réverbération

$$\left[\frac{S}{R} \right]_{\text{coh}} = \frac{E_s}{d} = \frac{B_s}{K} \quad \text{c'est à dire proportionnel à } B_s \text{ signal de bande } \gg \frac{1}{T}$$

(noté B.L.)

Considérons maintenant le même traitement appliqué à une tranche de sinusoïde de durée T :

$$\sin 2\pi \nu_0 t \cdot \Pi_T(t) \quad (\text{noté F.P.})$$

$$\text{on a } B_s = \frac{1}{T}$$

d'où une perte qui est de $B_s \cdot \frac{1}{T} = B_s \cdot T$ soit :

$$g = 10 \log_{10} B_s T = \left[\frac{[S/R]_{\text{B.L.}}}{[S/R]_{\text{F.P.}}} \right]_{\text{coh.}}$$

$$g = \left[\frac{[S/R]_{\text{BL}}}{[S/R]_{\text{F.P.}}} \right]_{\text{coh.}} = 10 \log_{10} B_s T \quad (\text{dB})$$

d) Utilisons maintenant un traitement quadratique :

Le filtrage n'est plus cohérent on obtient maintenant dans le cas $B_s \gg \frac{1}{T}$ c'est-à-dire à large bande :

A la sortie du détecteur

le signal vaut : $P_s = E_s/T$ et l'écart type du bruit est analogue à celui d'un corrélateur à $\tau = 0$:

$$\text{soit : } \sigma_{\Gamma} = \Gamma(0) \cdot \frac{1}{\sqrt{BT}}$$

$$\text{d'où } \left[\frac{S}{B} \right]_{\text{n.c.}} = \frac{E_s}{T} \cdot \frac{1}{\gamma_0 B} \cdot \sqrt{BT} = \frac{P_s}{P_b} \sqrt{BT}$$

$$\text{soit } \left[\frac{S}{B} \right]_{\text{n.c.}} = \frac{P_s}{P_b} \cdot \sqrt{BT} \quad \text{perte pour le traitement non linéaire de } \sqrt{BT}$$

$$\text{alors que } \left[\frac{S}{B} \right]_{\text{coh}} = \frac{P_s}{P_b} \cdot BT$$



$$\frac{[S/B]_{\text{coh.}}}{[S/B]_{\text{n.c.}}} = \sqrt{BT} = 5 \log_{10} BT \text{ (dB)}$$

Appliquons ceci au cas du parasite de réverbération on obtient sous les hypothèses précédemment admises :

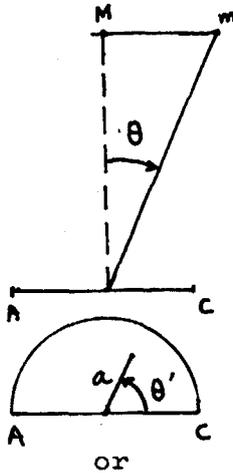
$$g = \left[\frac{[S/R]_{\text{B.L.}}}{[S/R]_{\text{F.P.}}} \right]_{\text{n.c.}} = 5 \log_{10} BT \text{ dB}$$

Remarquons que dans le cas à fréquence pure le parasite de réverbération est lui-même à bande étroite. Dans ce cas $B \approx \frac{1}{T}$ et alors $\log_{10} BT \approx 0$

Les deux types de traitement coïncident.



ANNEXE III : Calcul de la directivité d'une ouverture semi-circulaire.



L'ouverture étant semi-circulaire, on calcule son diagramme de diffraction à l'infini, c'est-à-dire à grande distance devant la longueur d'onde.

Le rayon rayonné à l'infini est $d(\nu, \theta)$ dans le gisement θ au point m :

$$d(\nu, \theta) = \int_{a=0}^{a=R} \int_{\theta'=0}^{\theta'=\pi} e^{i \frac{2\pi\nu}{c} a \theta \cos \theta'} a d\theta' da$$

$$e^{i z \cos \theta'} = J_0(z) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} (-1)^p J_{2p}(z) \cos 2p\theta' - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k-1}(z) \sin (2k-1)\theta'$$

en tenant compte des différents termes et en intégrant on a :

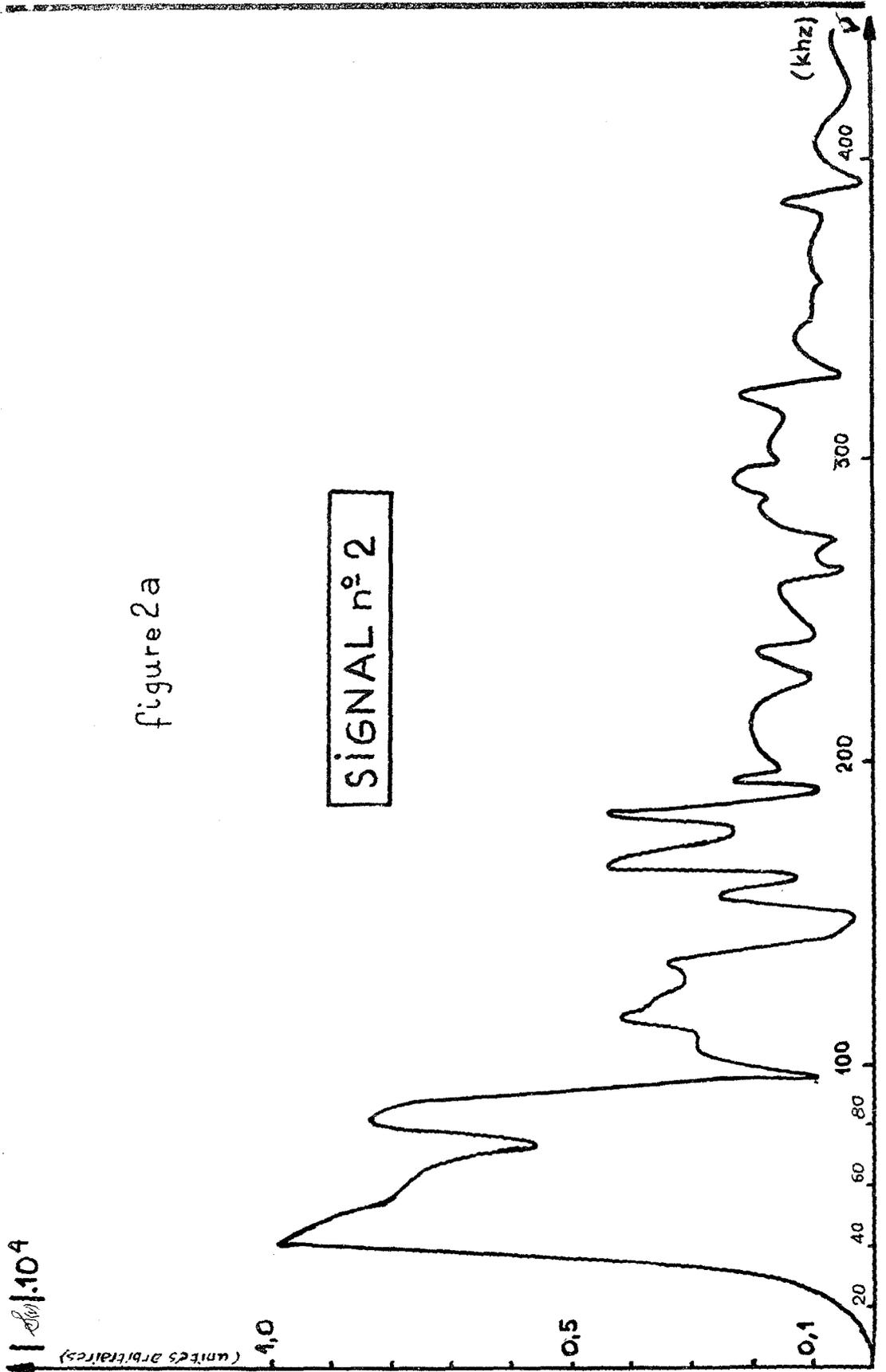
$$\int_{\theta'=0}^{\theta'=\pi} e^{i z \cos \theta'} d\theta' = \pi J_0(z)$$

d'où en utilisant les propriétés des fonctions Bessel

$$d(\nu, \theta) = \frac{cR}{2\nu\theta} J_1\left(2\pi\nu\theta\frac{R}{c}\right) \quad \frac{R}{c} = \tau$$

d'où

$$d(\theta, \nu) = \frac{c^2 \tau}{2\nu\theta} J_1(2\pi\nu\theta\tau)$$



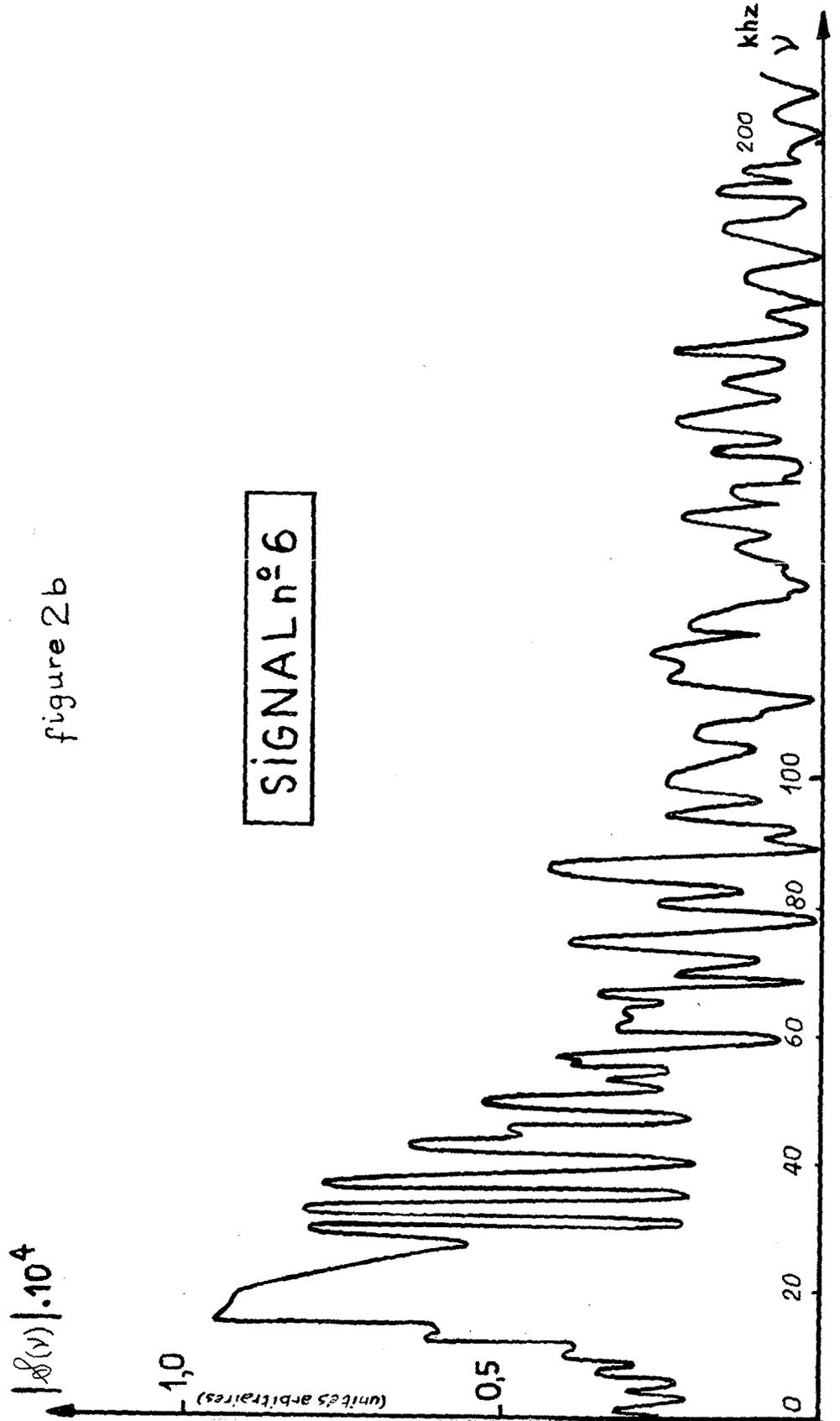
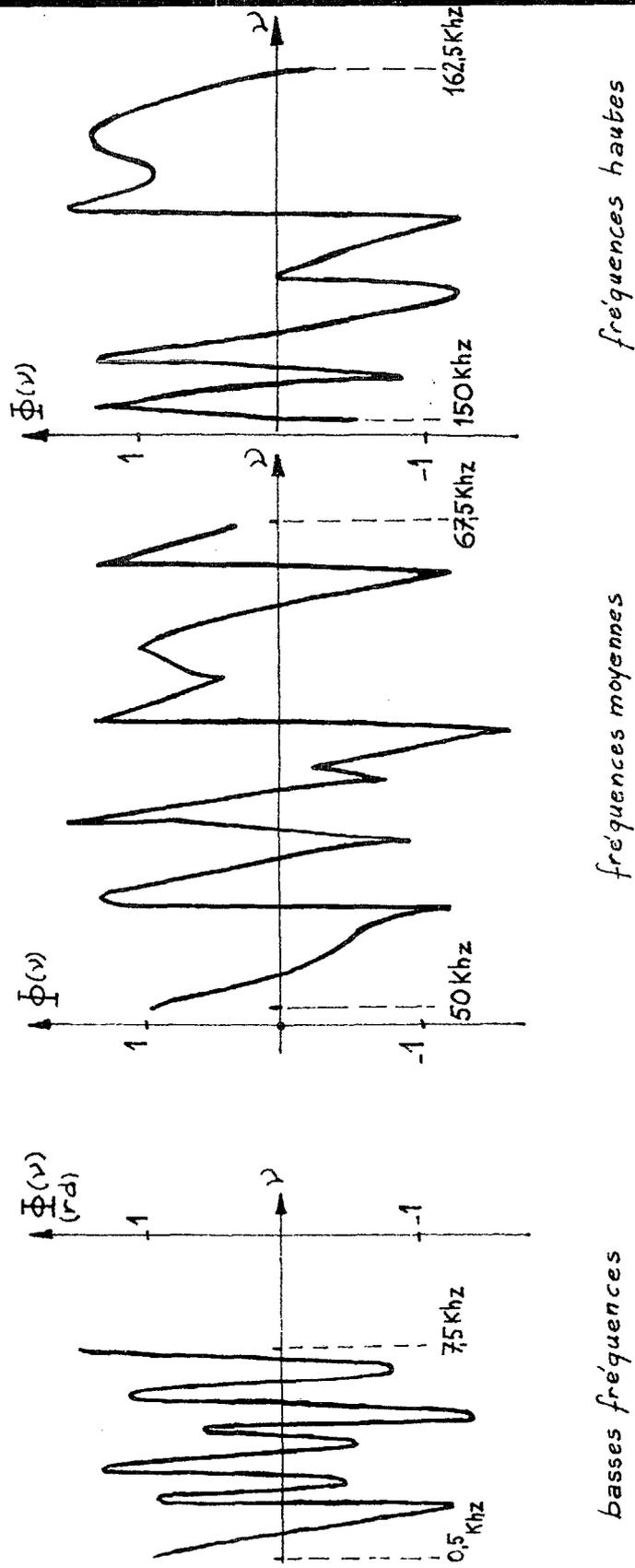


figure 2b



figure 3



Phase du Signal n°6

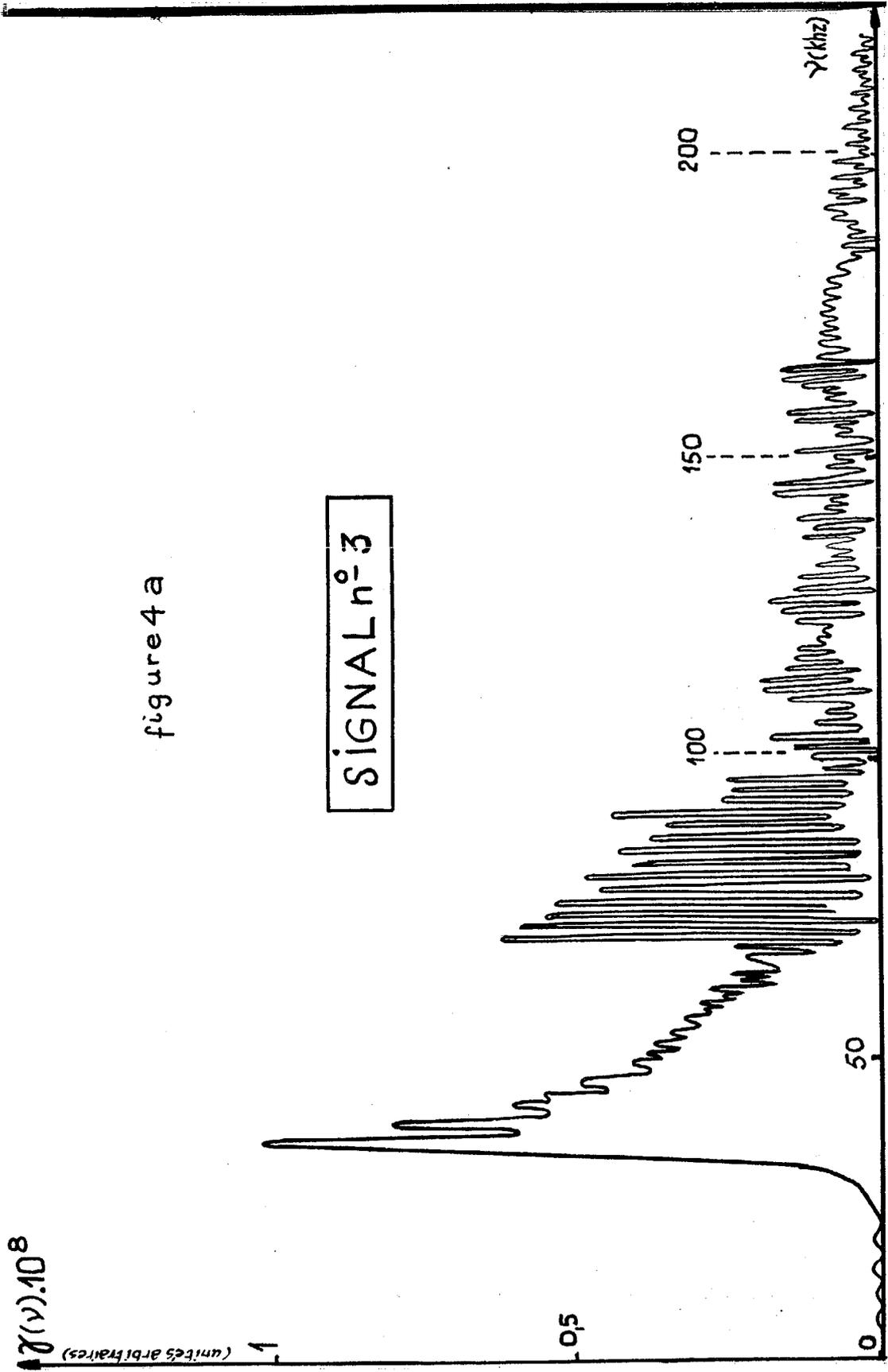
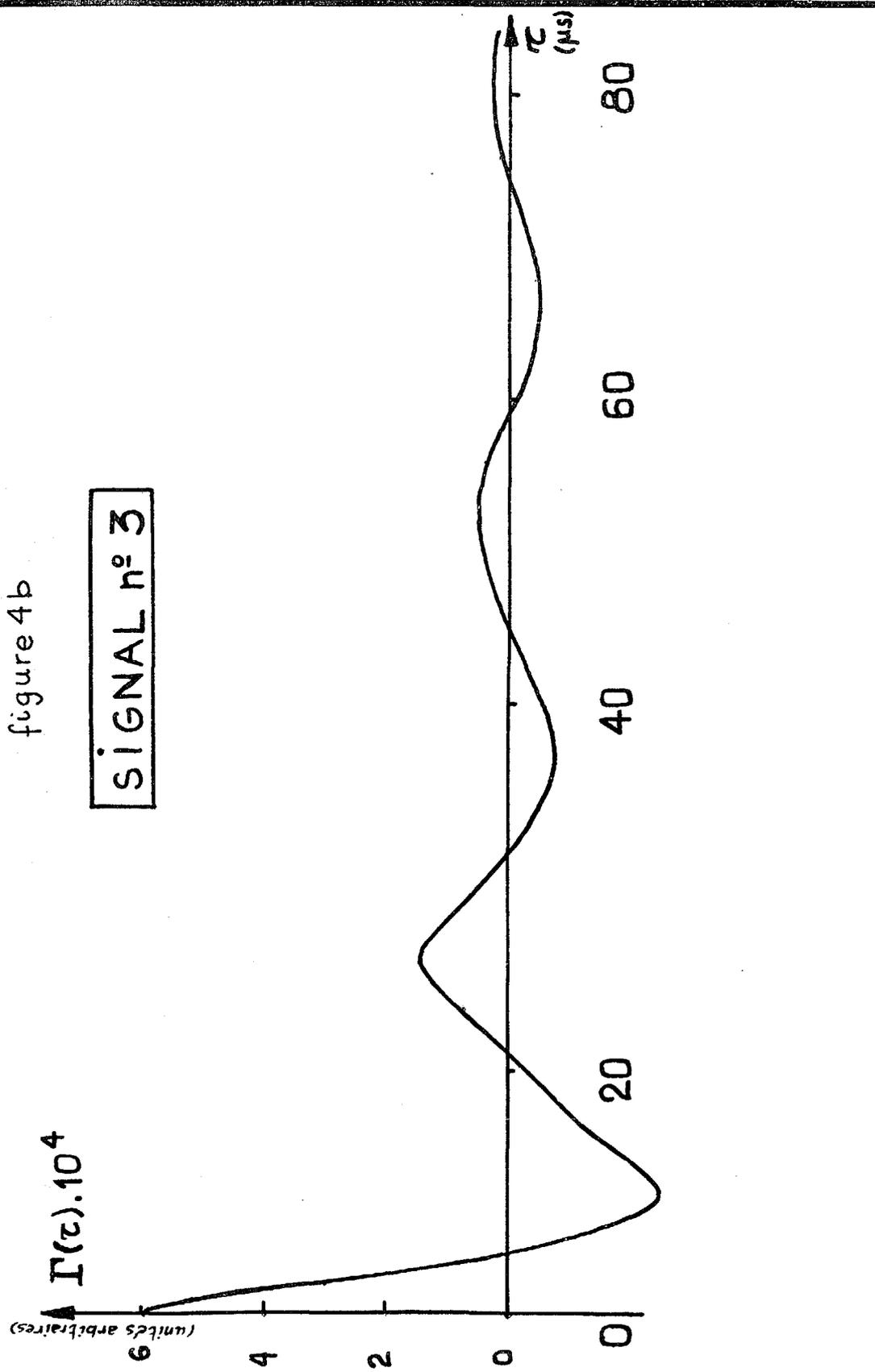


figure 4 a



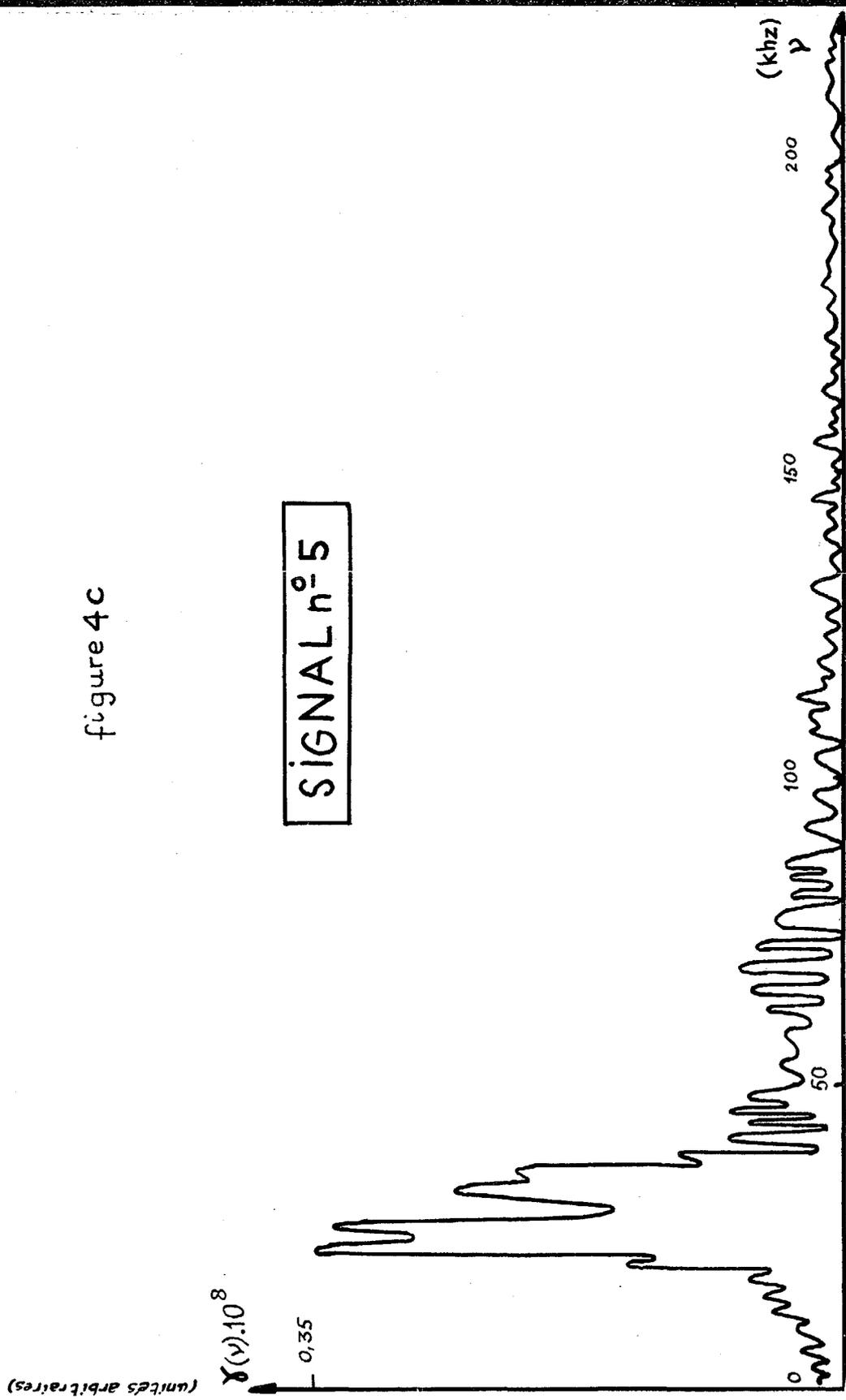


figure 4c

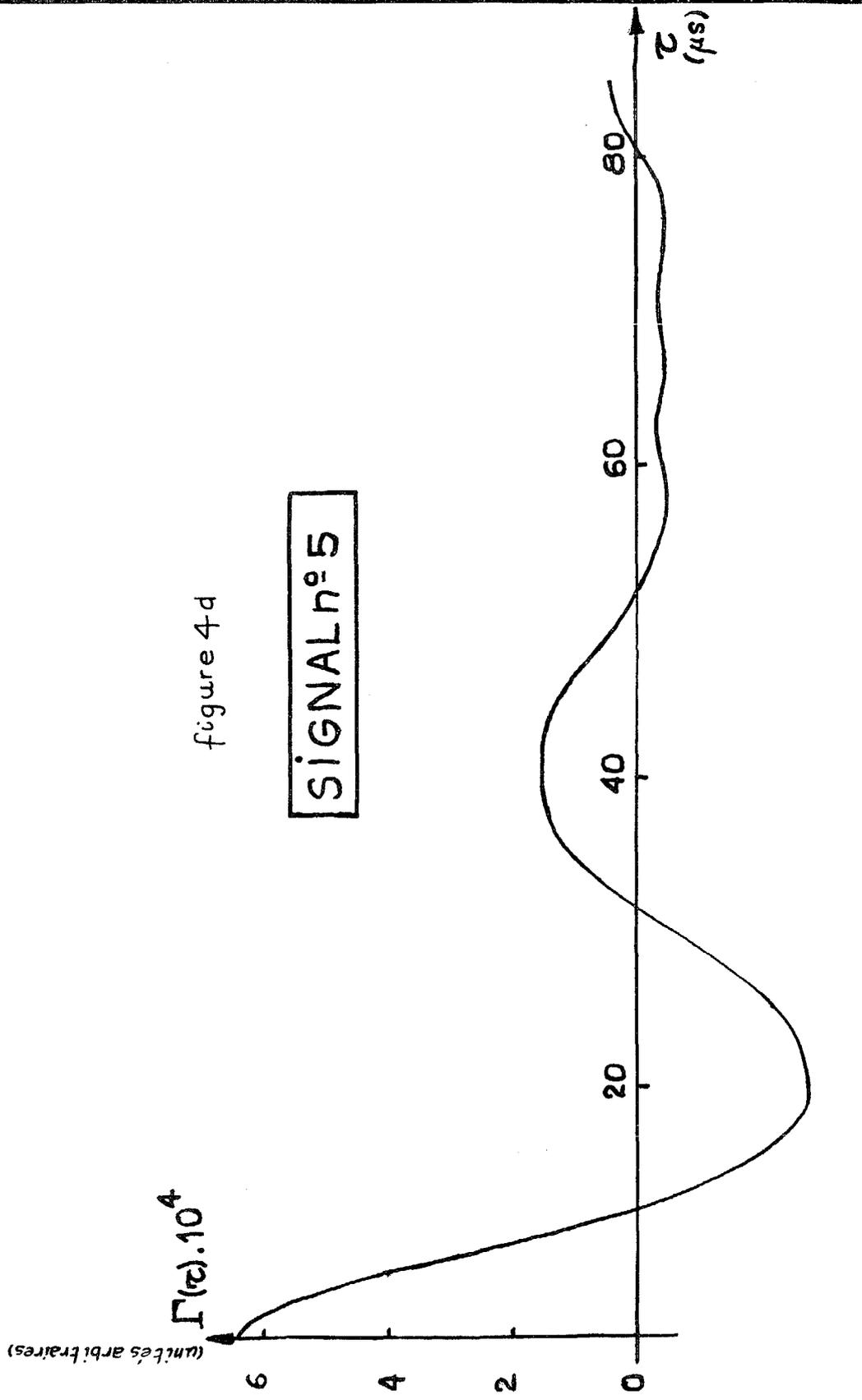


figure 4d

SIGNAL n° 5

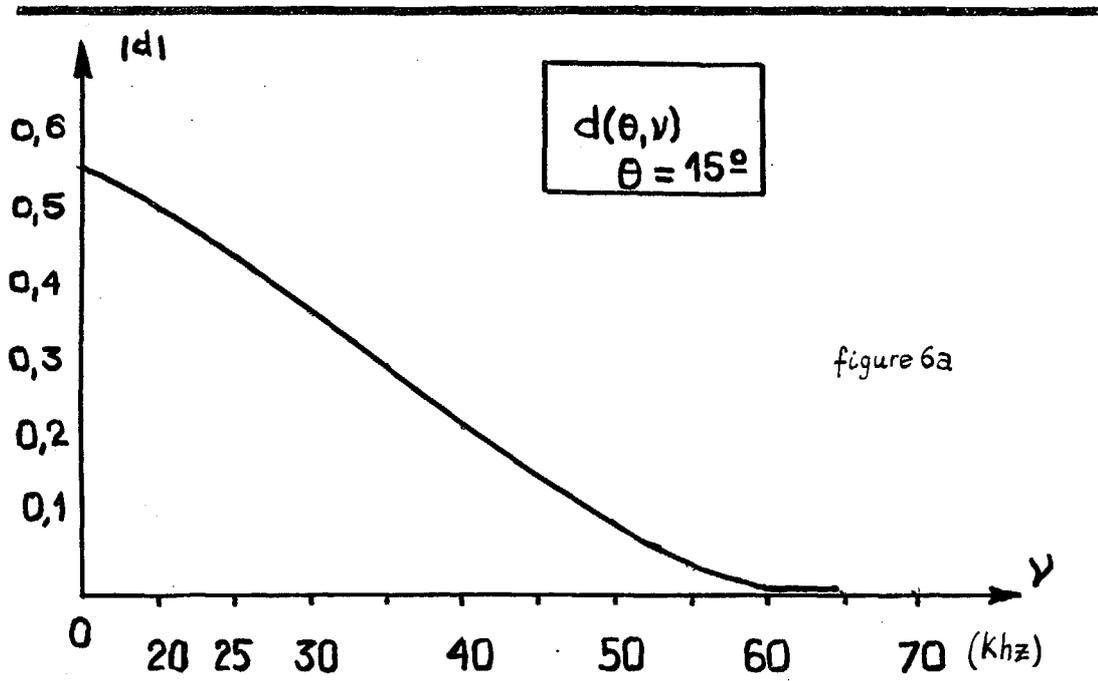


figure 6a

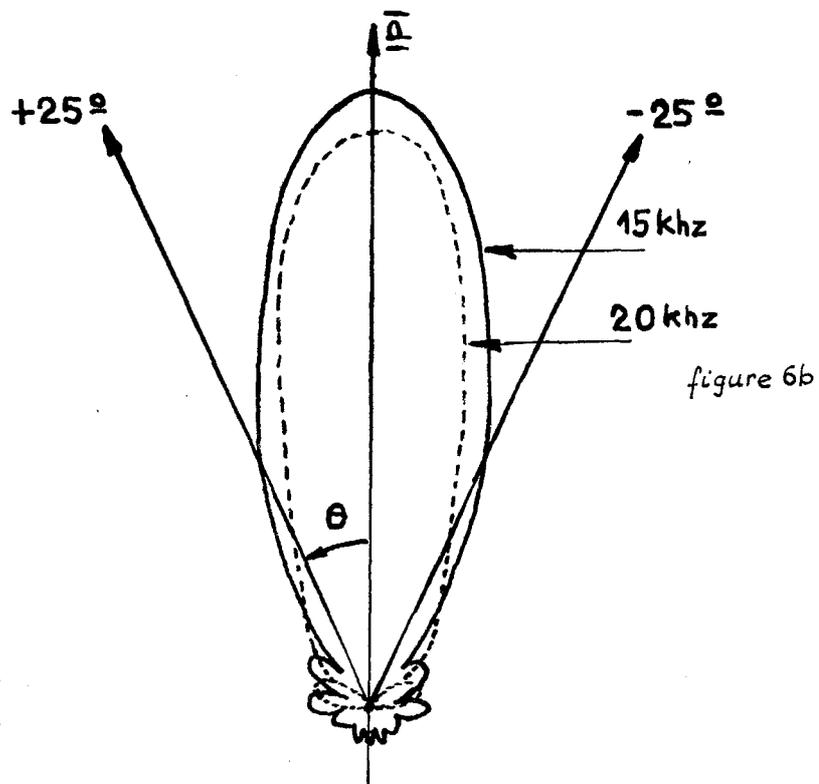


figure 6b

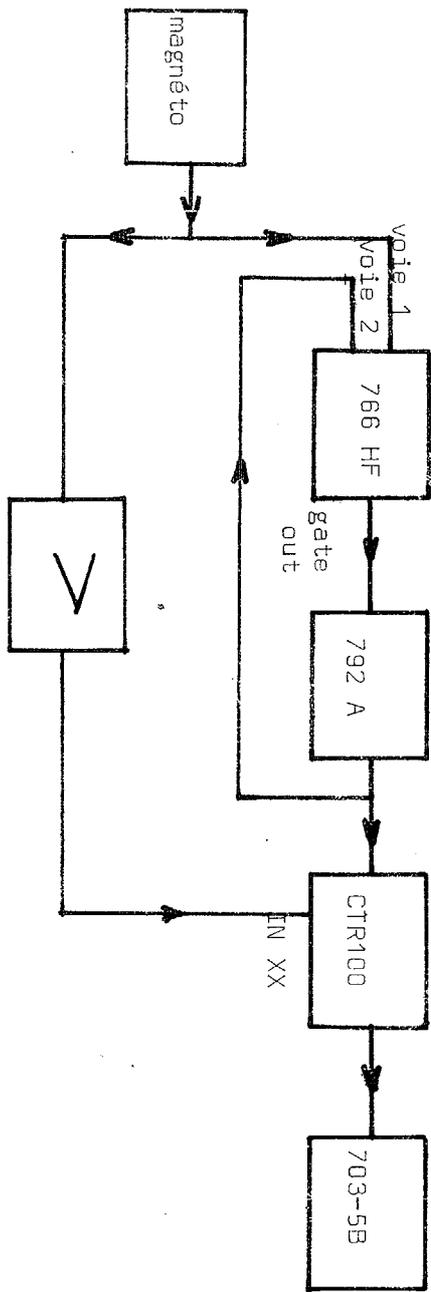


Fig.1 Schéma de principe du montage utilisé pour l'autocorrélation des signaux de delphinidas -

Les signaux lus que le magnétophone attaquent, après amplification l'entrée XX du corrélateur CTR100.

Le générateur Fairchild 792 A ouvre l'entrée du CTR 100, pendant la durée du signal - La sortie porte de l'oscilloscope Fairchild 766 HF. déclenche le 792 A dont le créneau de sortie est envoyé sur la voie 2 du 766 HF pour réglage de la durée. -

La fonction d'autocorrélation est obtenue en lecture du corrélateur sur table XY 703-5 B de Hewlett PACKARD.



PHOCAENA PHOCAENA

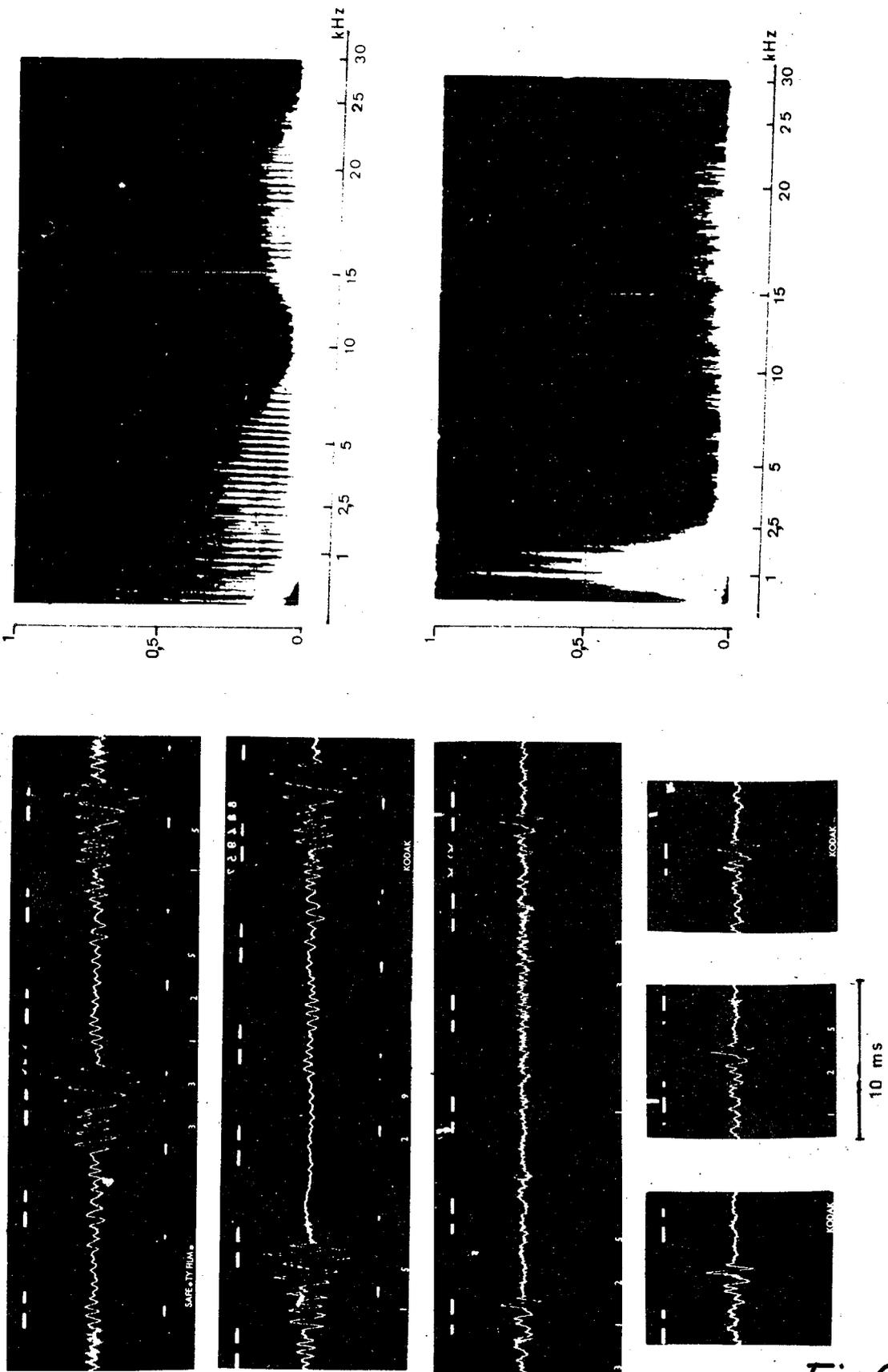


Fig 2



PHOCEANA PHOCEANA

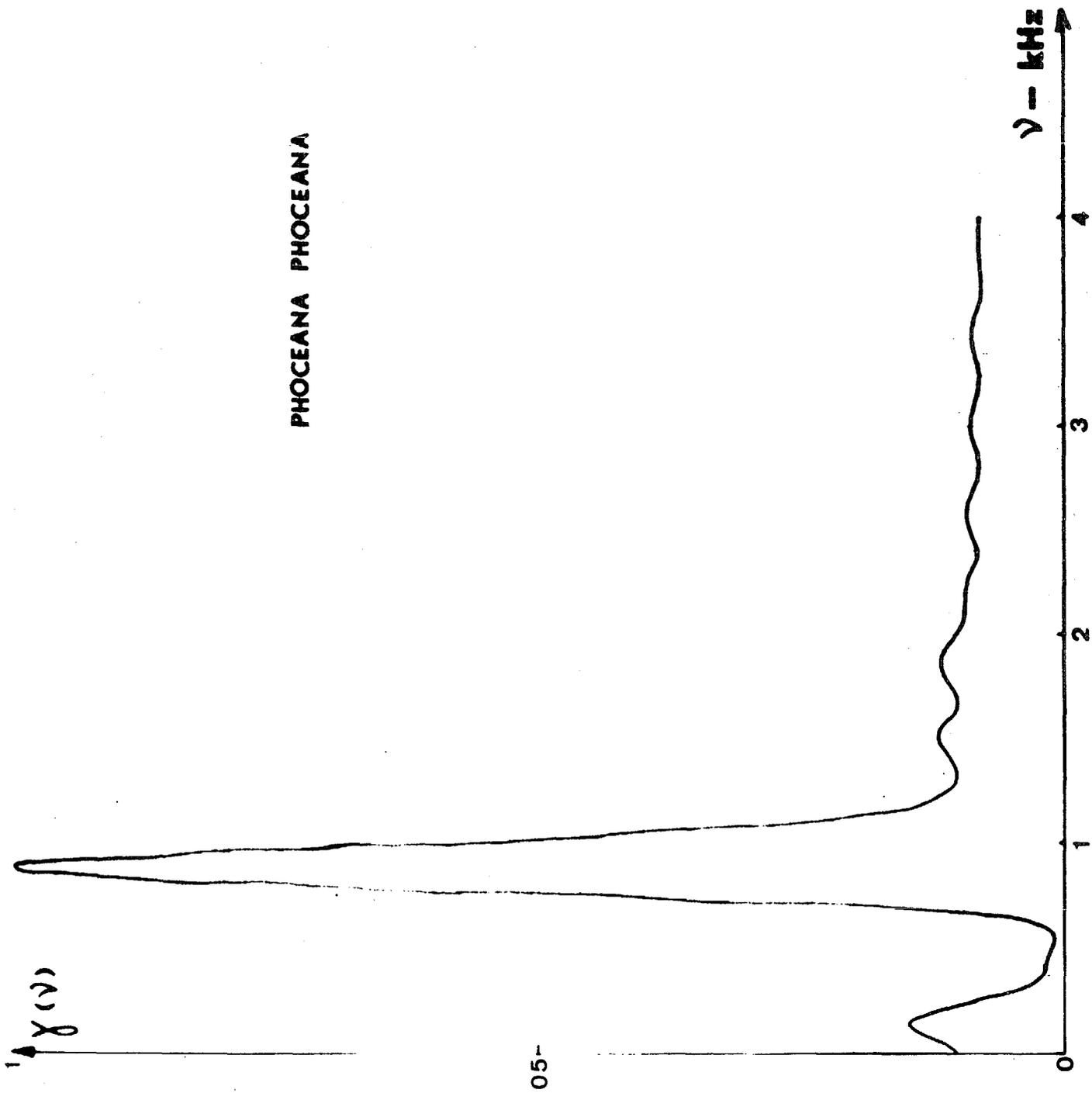


Fig 2^{bis}



PHYSETER CATODON

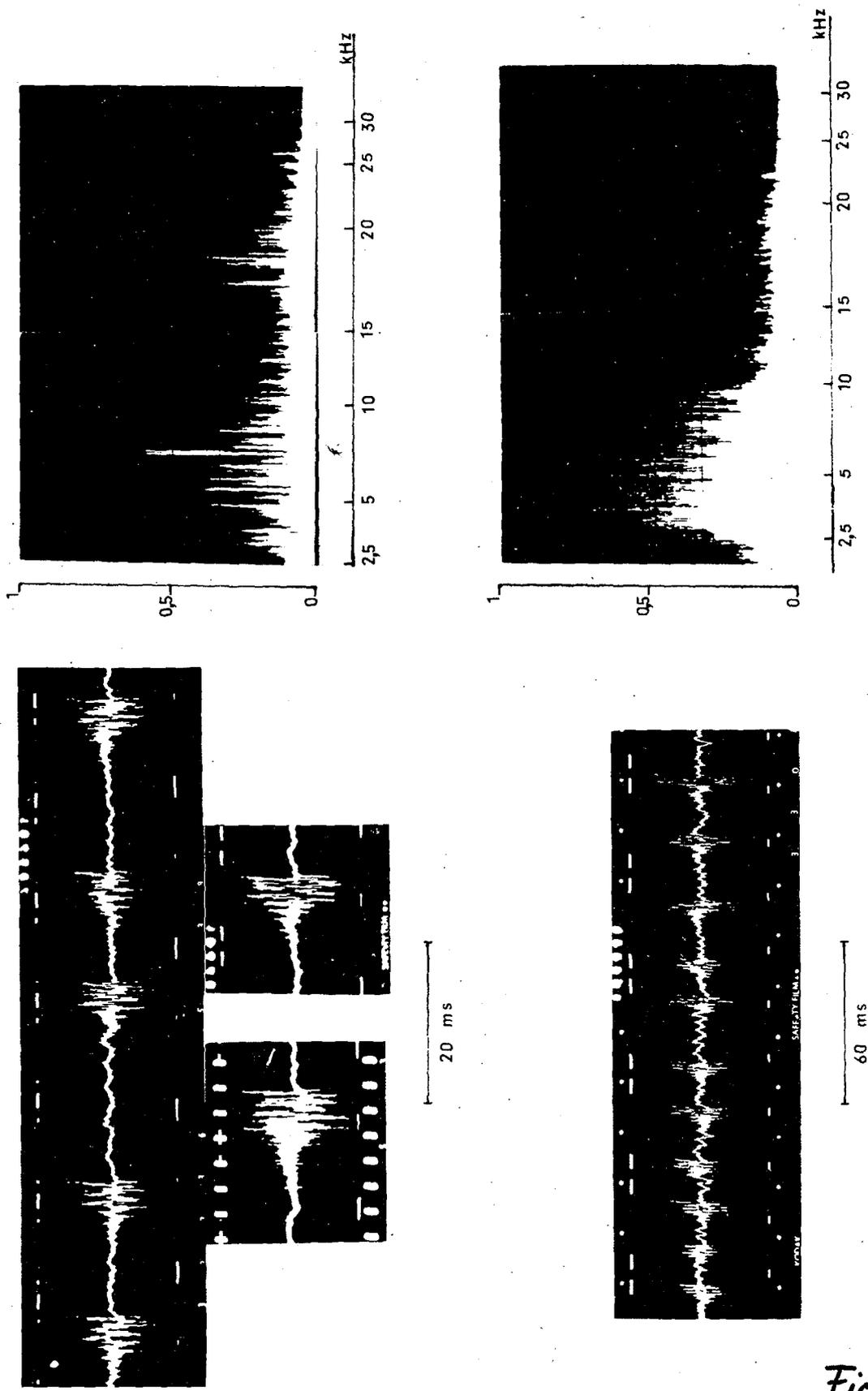


Fig 3

PHYSETER CATODON

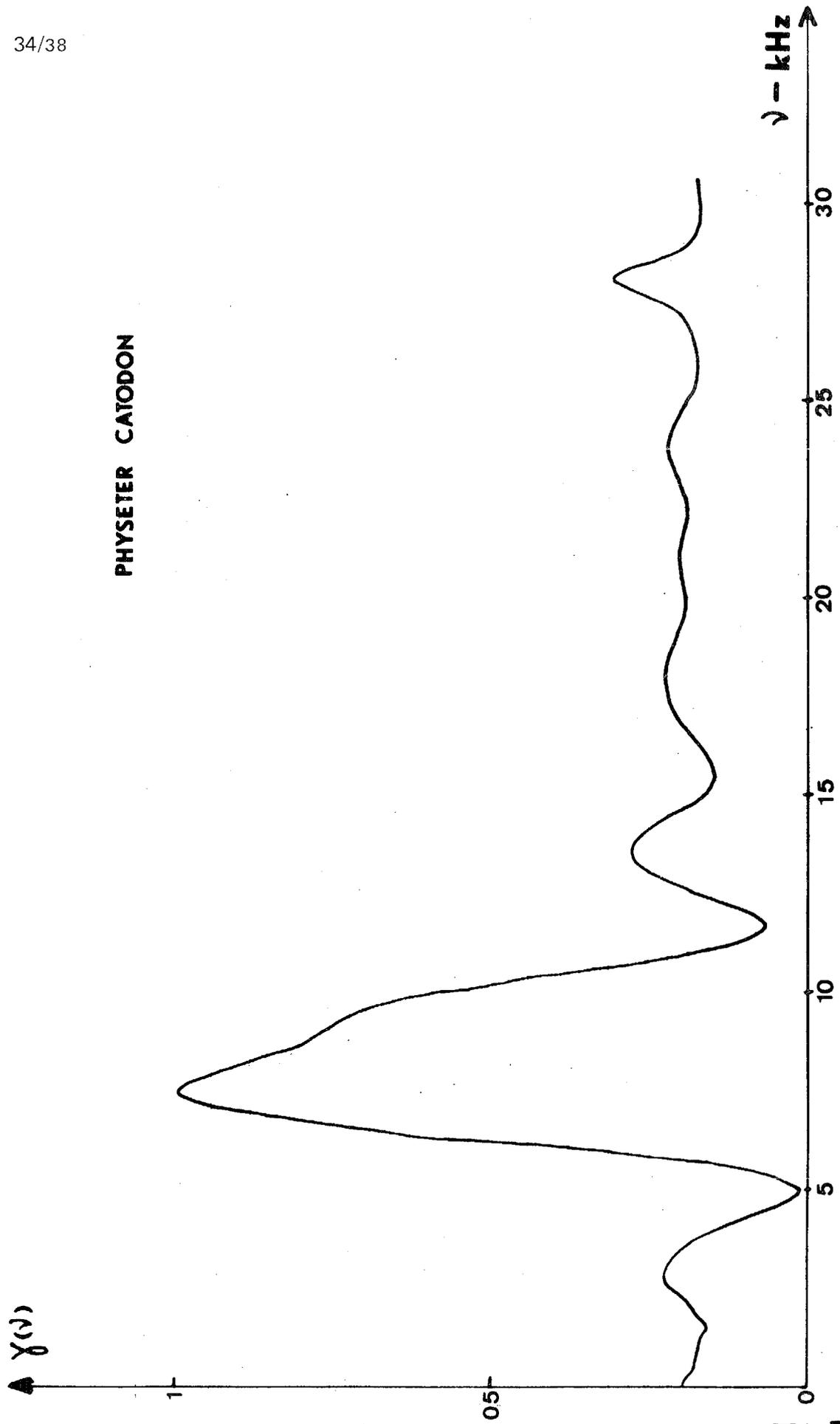


Fig 3^{bi}





DELPHINUS DELPHIS

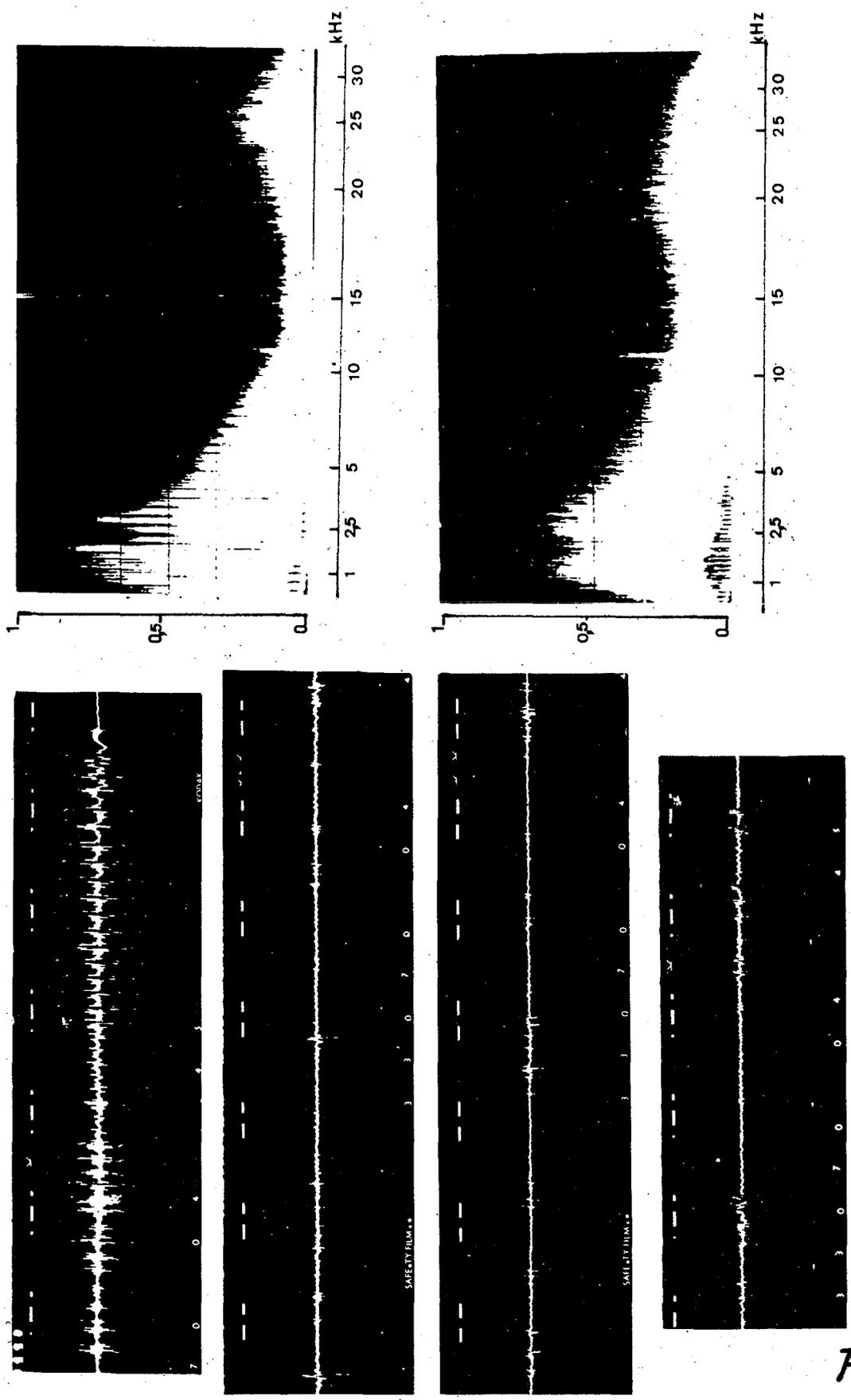
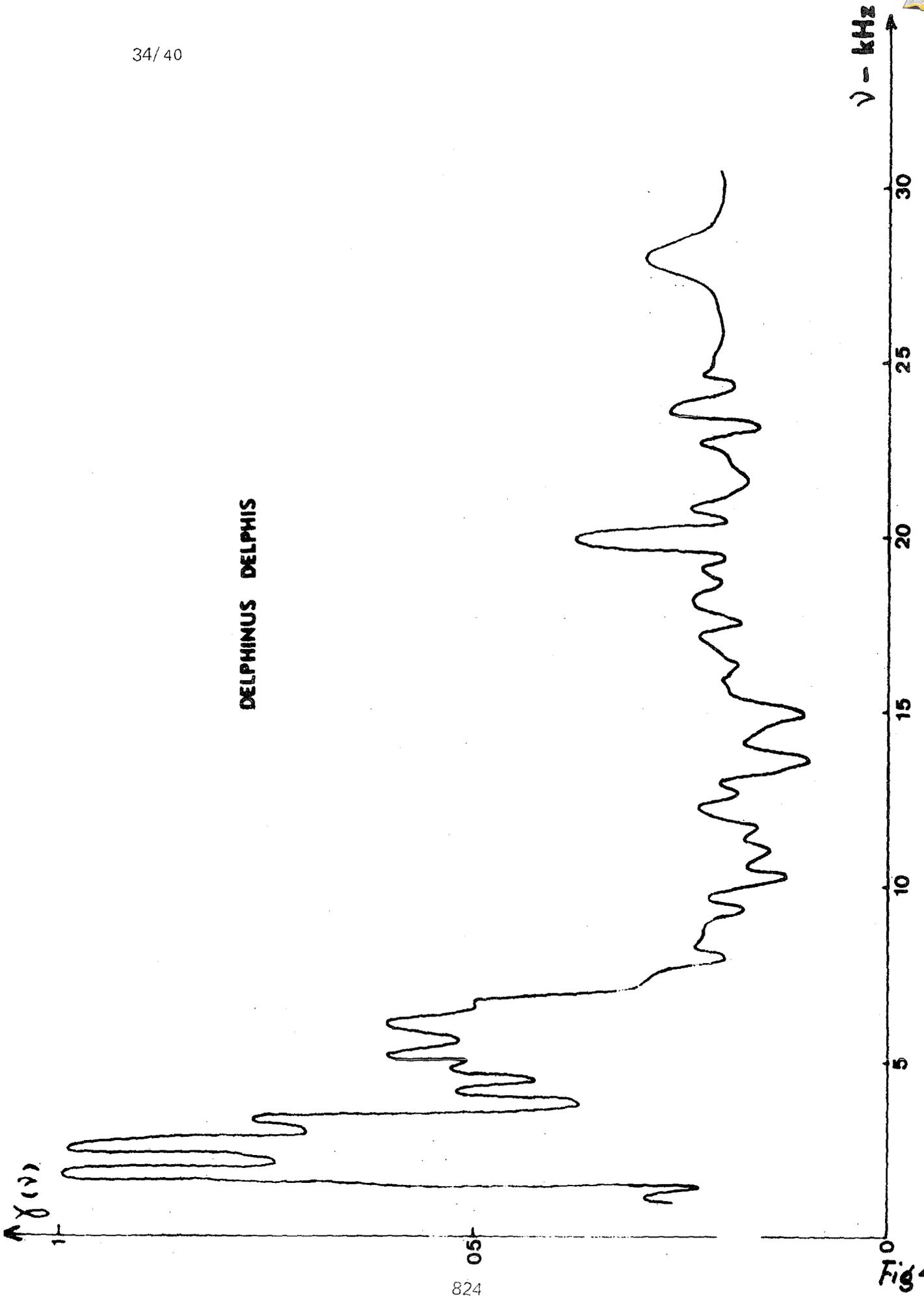


Fig 4

DELPHINUS DELPHIS



824

Fig 4^{bis}





TURSIOPS TRUNCATUS

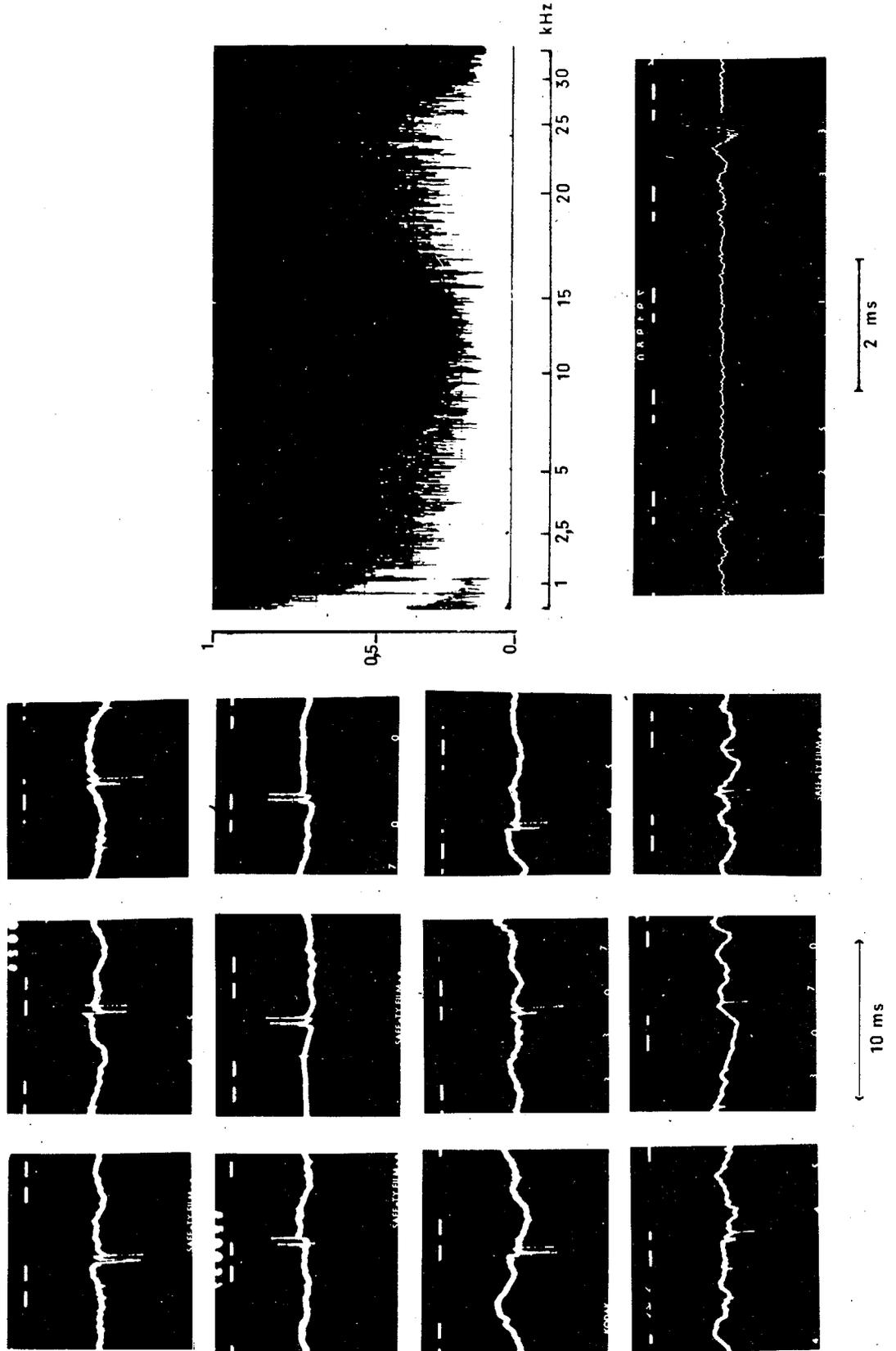
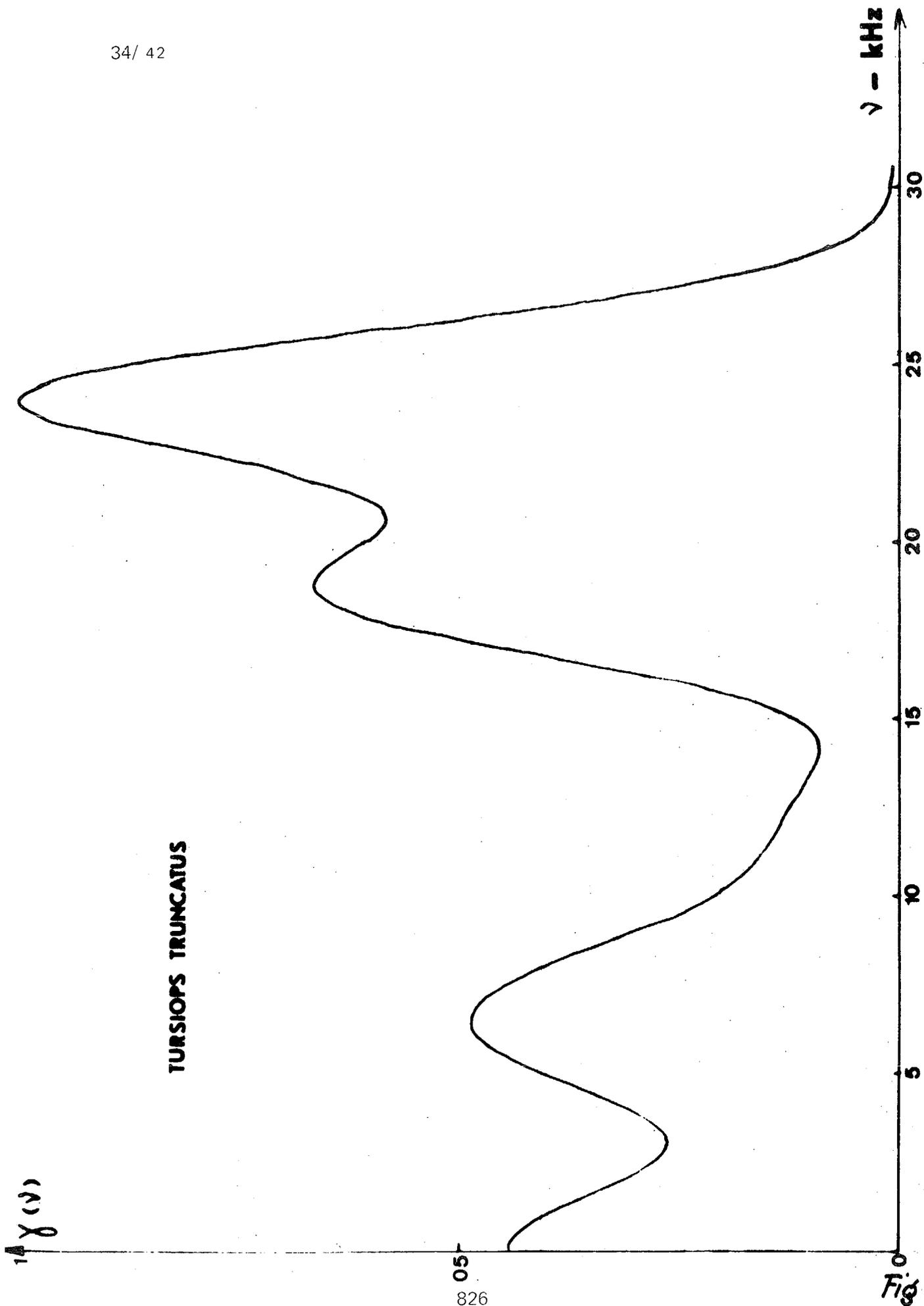


Fig 5



TURSIOPS TRUNCATUS



05
826

Fig 5^{bis}



GRAMPUS GRISEUS

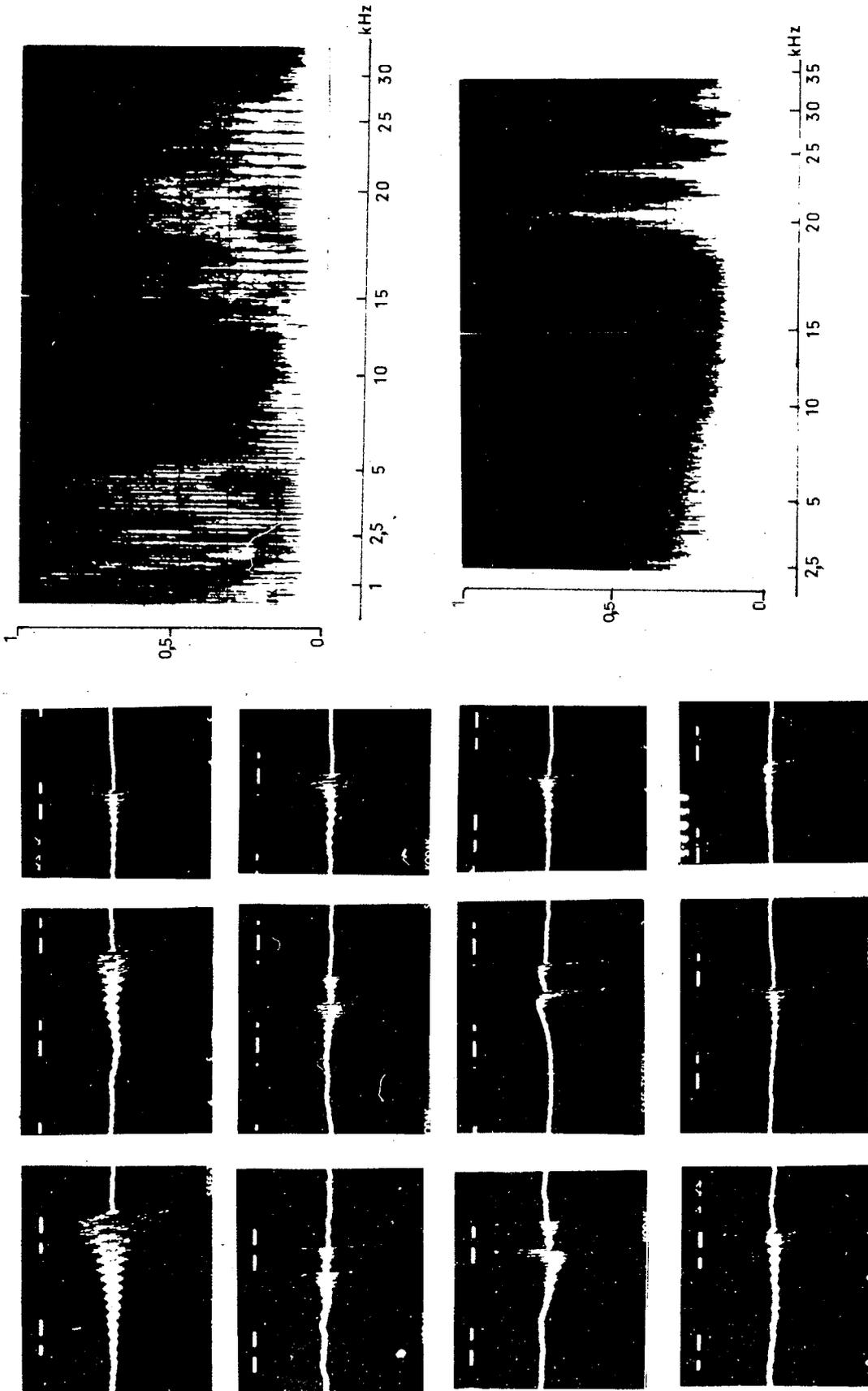
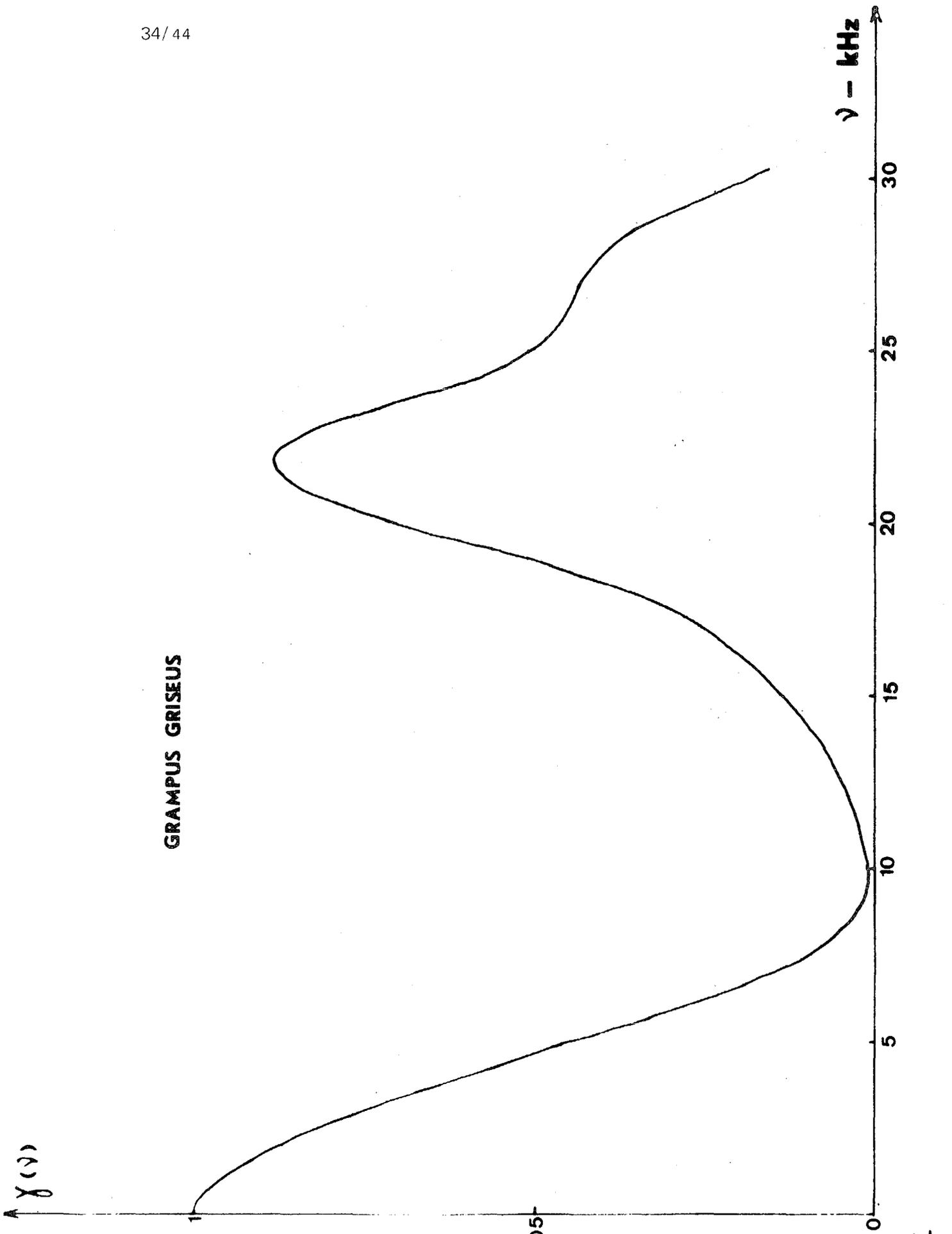


Fig 6



GRAMPUS GRISEUS



328

05

Fig 6 bis



GLOBICEPHALA MELAENA

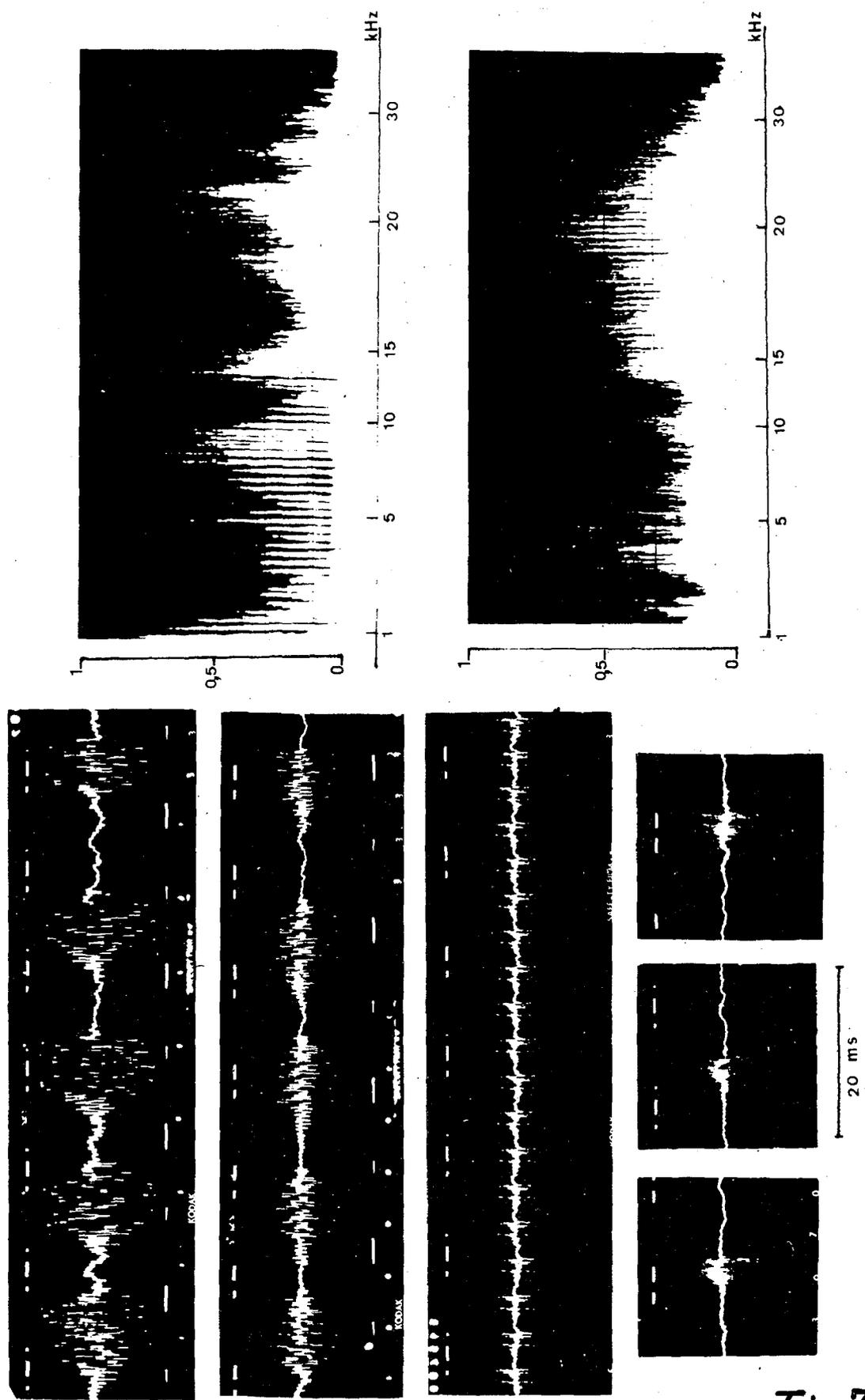
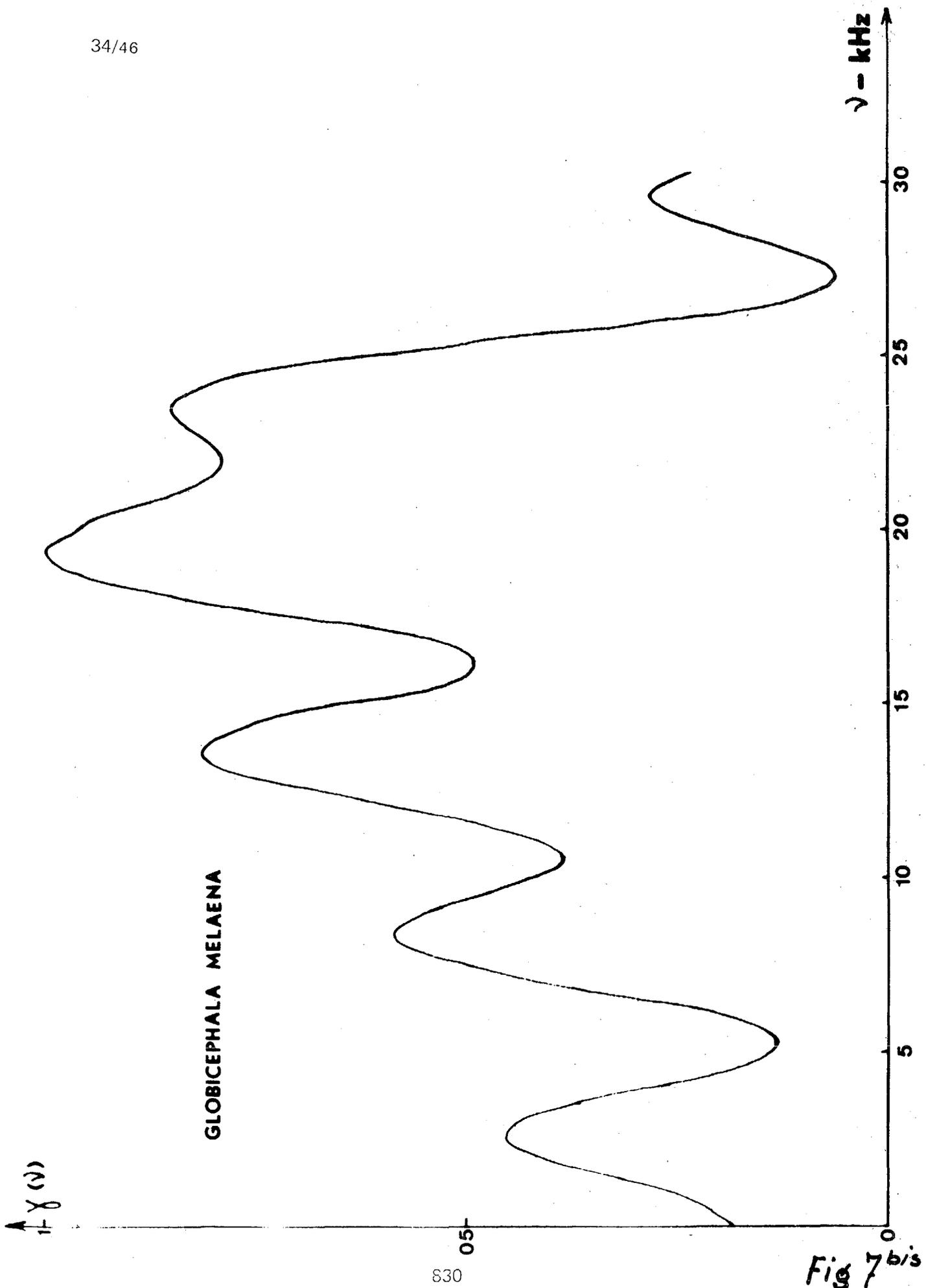


Fig 7





STENO BREDANENSIS

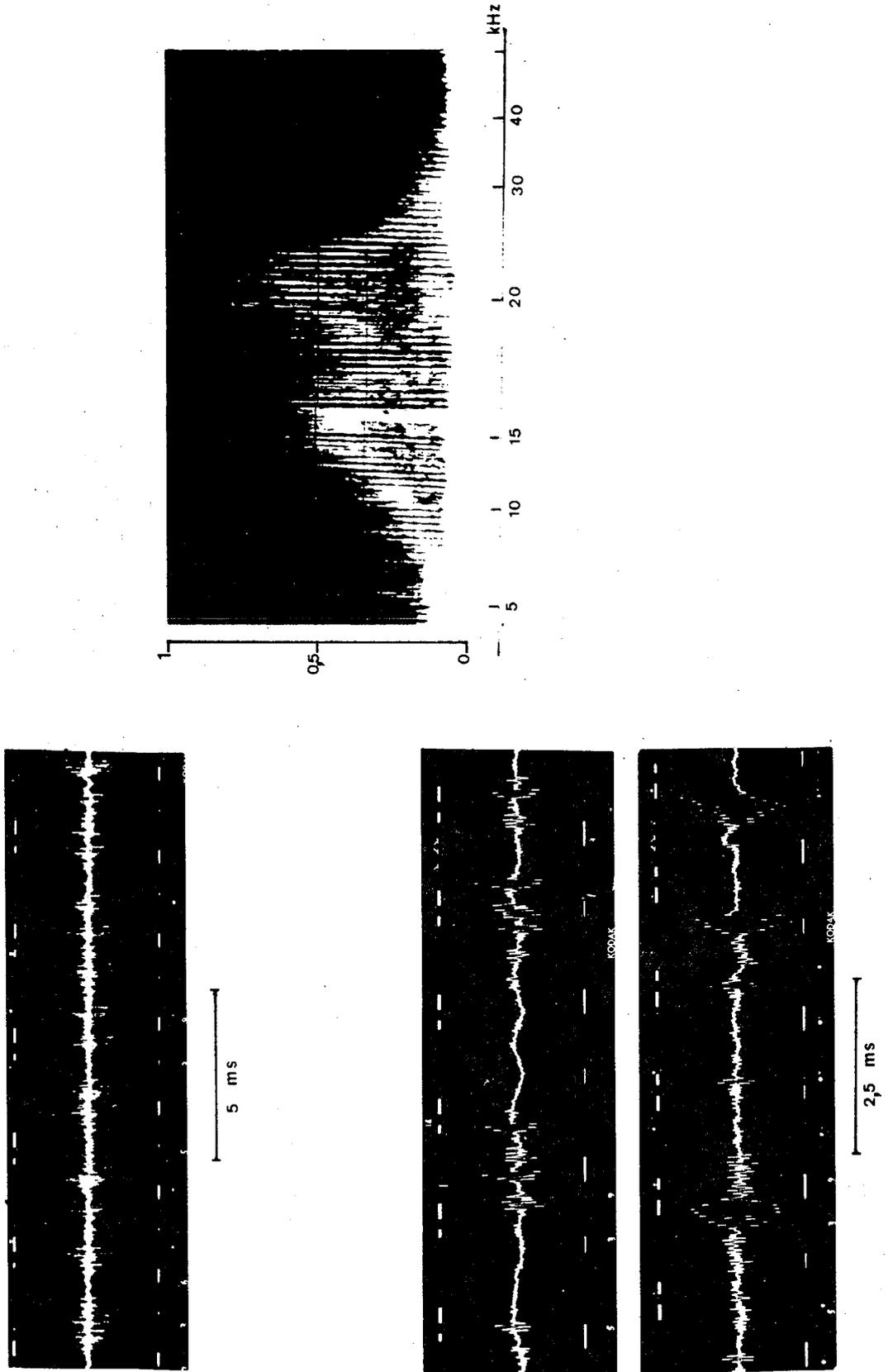


Fig 8

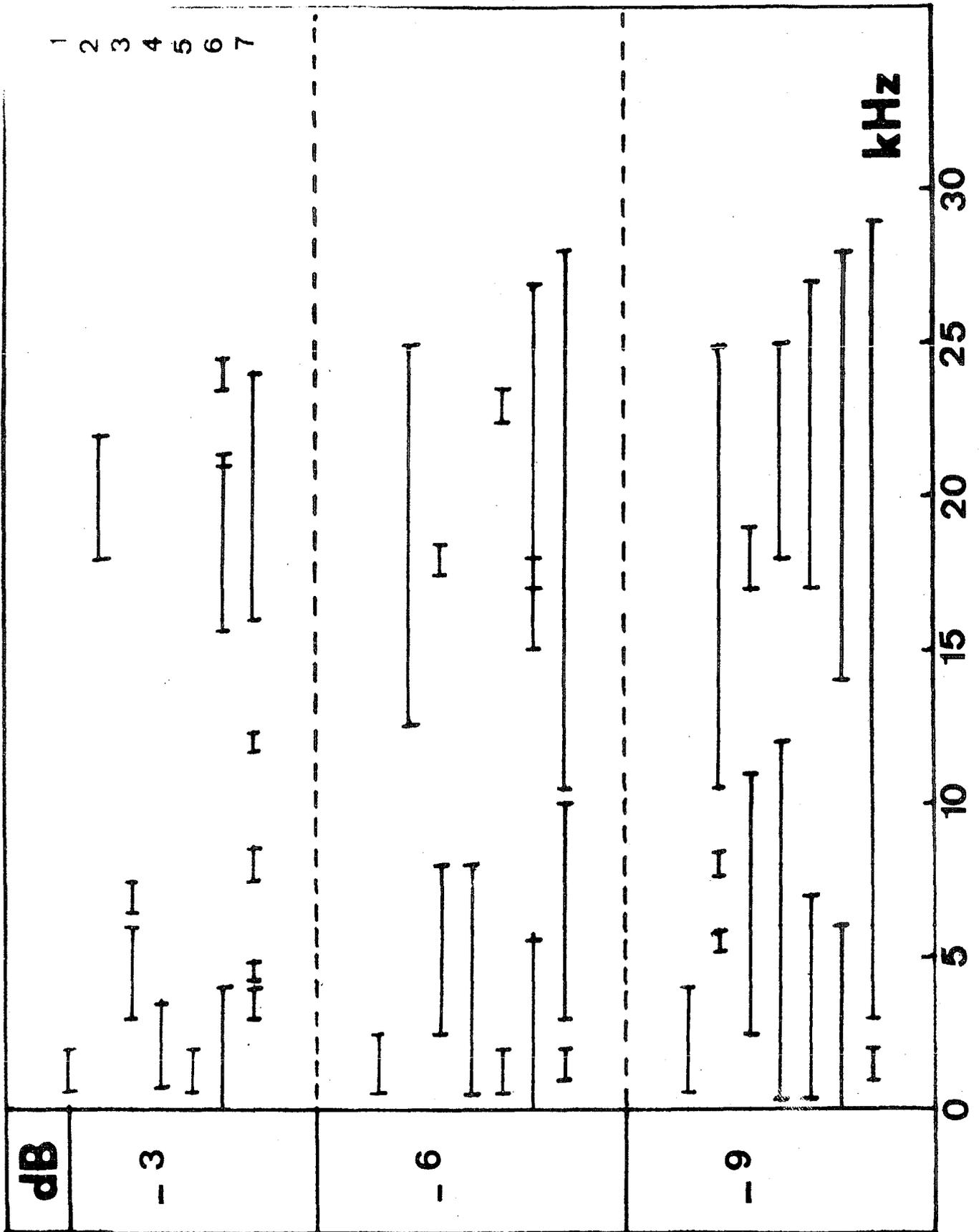


Fig 9