

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche sonar d'une cible.

A. DZIEDZIC+ M. JEANNY++ et J.C. LEVY+++

+ Laboratoire de Physiologie Acoustique. I.N.R.A. ERA n° 332 C.N.R.S. 78350 Jouy en Josas

++ Laboratoire de Théorie des systèmes. E.N.S.T. 46, rue Barrault 75013 PARIS

+++ Marine Nationale Psychologie Appliquée. 3, avenue Octave Gréard 75007 PARIS

RESUME

Les caractéristiques spatio-temporelles des signaux sonars d'un dauphin et leur évolution au cours d'une phase active d'acquisition, peuvent être déterminées si la position en distance et angle de l'animal par rapport aux récepteurs est connue. Un programme de traitement des signaux sonars d'animaux a été établi; il permet de déterminer avec précision la trajectographie de l'animal émetteur et d'obtenir l'évolution des caractéristiques analytiques des signaux utilisés. L'application de ce programme à des données réelles a fourni certains résultats d'ordre temporel et spectral portant sur les signaux utilisés par un T. truncatus au cours d'une phase active d'acquisition et de capture de proie, et de préciser les conditions expérimentales requises en vue de l'étude complète de leurs caractéristiques spatio-temporelles.

SUMMARY

The spatial and temporal characteristics of delphinid's sonar signals, and their variations during the localisation process, can be found, if the distance and angular position of the animal with respect to the receptors is known. A computer programme of analysis of the echolocation signals emitted by an animal, has been established. It gives the emitting animal's trajectography and the evolution of the analytical characteristics of the signals it used. Some temporal and spectral results related to the signals emitted by a T. truncatus during the echolocation process are given. The experimental need for a complete study of the spatio-temporal characteristics of the emitted signals are established.

Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche sonar d'une cible.

Introduction:

Chez les dauphins, les signaux acoustiques sont émis dans le milieu extérieur par la partie antérieure de la tête.

DIERCKS, TROCHTA, GREENLAW et EVANS ont montré (1), en plaçant des capteurs en différentes régions de cette surface rayonnante, qu'un signal sonar produit par l'animal, variait en forme, en amplitude, en durée et en phase, selon le point d'observation mettant ainsi en évidence la complexité de la fonction d'illumination du projecteur sonar du dauphin. A notre connaissance, les quelques résultats publiés se rapportant aux caractéristiques spatio-temporelles des émissions des dauphins sont fragmentaires et souvent qualitatifs. (2,3).

Pour notre part, nous avons montré la grande influence de la directivité à l'émission sur les paramètres analytiques des signaux des dauphins et souligné à plusieurs reprises l'importance de la connaissance précise de la position de l'animal par rapport au capteur, dans l'étude et l'interprétation des caractéristiques et des propriétés des signaux sonars de ces animaux (4,5,6).

Nous rapportons ici les résultats d'une étude entreprise en vue de déterminer l'évolution des caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des émissions d'un dauphin durant la phase active de recherche et d'acquisition sonar d'une cible.

Matériels et méthodes :

A- Initialement le problème consistait à réaliser une expérience qui devait permettre de déterminer: - la position (distance, azimuth et site). - la direction de l'émission. - et l'orientation angulaire instantanées d'un dauphin par rapport à chacun des capteurs d'une base de réception, qui recueillerait les signaux sonars émis par l'animal. D'après les données bibliographiques, on devait s'attendre à trouver une directivité assez prononcée à l'émission (environ 60° et 5° respectivement pour les composantes inférieures et supérieures du spectre chez le

Steno bredanensis (NORRIS (3)).

- aussi une base de réception relativement "serrée" s'imposait-elle.

Notre choix, s'est porté sur un ensemble composé de 4 hydrophones⁺, disposés suivant les points caractéristiques (sommets et orthocentre) d'un triangle équilatéral de 1m. de côté, immergé verticalement; cette disposition nous semblait compatible avec les nécessités de la triangulation envisagée pour le positionnement de l'animal à partir de ses émissions.

L'expérience a été réalisée de nuit sur un *T. truncatus* mâle adulte⁺⁺. Pratiquement, la rigidité de la base de réception était assurée par un grillage plastique, fortement lesté à sa partie inférieure, et attaché par son bord supérieur à un ponton situé au-dessus du bassin. Le bruit de chute d'un poisson à 50cm devant le dispositif de réception provoquait la recherche et l'acquisition sonar de cette proie par le dauphin. Les émissions étaient enregistrées sur magnétophone multipiste EPI-2

(bande passante : 120 kHz.). Dans tous les cas, la base triangulaire était disposée verticalement, un sommet orienté vers le fond et le côté horizontal immergé à 0.50m. Les déplacements de l'animal se faisant sur une distance maximum de 10m. devant le dispositif de réception, le balayage angulaire du diagramme d'émission, par le vecteur animal-hydrophone de $\pm 60^\circ$ était assuré. (fig.1).

B- La quantité de données acquises lors de chaque approche (quelques centaines de signaux sur chaque piste, nécessitait un traitement numérique. Il a été réalisé sur un ordinateur 10.070 C.I.I. (ENST) selon deux programmes distincts. Le premier s'articule autour du programme de triangulation et permet de déterminer les paramètres suivants:

- Trajectographie. - Direction du déplacement
- Orientation angulaire par rapport à chaque hydrophone. - Site, azimuth et distance par rapport au système orthonormé choisi.
- Ecart angulaire $\Delta\theta_{i,i'}$ entre l'hydrophone réel i et son image i prime.
- Interspectre entre signal et écho de surface.
- Surface de l'interspectre en fonction de $\Delta\theta_{i,i'}$
- Variation du centre de gravité de l'interspectre, pour les couples i, i' , au cours de l'approche en fonction de $\Delta\theta_{i,i'}$.

+ Ce dont nous disposons.

++ Expérience réalisée dans le bassin de démonstration du Marineland d'Antibes, sur un animal faisant partie du show.

Nous remercions la société responsable.



Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche d'une cible.

Le second permet de déterminer les caractéristiques temporelles et spectrales des signaux reçus sur chaque capteur, ainsi que les variations de ces paramètres au cours de l'approche. Il calcule notamment :

- La cadence d'émission, (les écarts entre signaux étant déterminés par intercorrélation).

Puis pour chaque capteur :

- La valeur à l'origine et le premier passage à zéro de la fonction d'autocorrélation, (c'est à dire l'énergie du signal à une constante près) et son pouvoir de résolution théorique en distance) - en donne une représentation graphique en fonction du temps et de la position angulaire de l'animal par rapport au capteur.

- La fréquence dominante et les coordonnées du centre de gravité de chaque signal, (représentation graphique comme précédemment)

- La densité spectrale et les fonctions d'ambiguïté (en vitesse et angle) des signaux choisis (par échantillonnage ou selon leurs caractères particuliers).

Les ordinogrammes généraux de ces deux traitements sont donnés en fin de texte.

Ces programmes ont été testés par simulation de l'émission et du déplacement de l'animal. La précision obtenue alors est meilleure que 1 cm suivant les trois axes, pour le dispositif de réception utilisé (base triangulaire de 1m de côté); la précision sur l'orientation angulaire en découle directement. Toutefois cette précision n'est obtenue que lorsque la période d'échantillonnage T_e qui détermine la précision sur les écarts de temps de parcours entre les couples de récepteurs, est $T_e \leq 1 \mu s$.

Cette valeur conduit à une erreur sur la géométrie de la base qui doit être $\leq 1,5 \text{ mm}$, ce qu'il est impossible d'obtenir dans les conditions expérimentales normales.

L'application du programme de positionnement aux données numériques réelles (fréquence d'échantillonnage 157,6 kHz soit $T_e = 3,88 \mu s$) conduit effectivement à des erreurs excessives, aussi ne pouvons-nous présenter ici que les résultats du programme n° 2, seuls exploitables. Il convient néanmoins de souligner que la précision requise sur le calcul des temps de parcours des ondes sonores peut

être obtenue avec l'ensemble de numérisation utilisé, après un ralentissement des bandes au $1/64^e$ de leur vitesse d'enregistrement, mais qu'il en va tout autrement en ce qui concerne la base de triangulation utilisée. En effet, les capteurs n'étant pas ponctuels, seule l'augmentation de la base de réception peut conduire à une réduction suffisante de l'erreur relative ϵ sur les temps de parcours ($\epsilon = 1,5 \cdot 10^{-3}$).

En pratique, la plus grande dimension des capteurs habituellement utilisés est de l'ordre de 5 cm, ce qui conduit, pour l'erreur mentionnée ci-dessus, à une distance entre capteurs $\geq 3,4 \text{ m}$.

Une telle base de réception est tout à fait réalisable en bassin, mais alors le balayage angulaire du diagramme de directivité de l'émission, par chaque capteur, lors de l'approche d'une cible par l'animal émetteur, est trop faible pour en permettre une étude complète. Ainsi ne pourra-t-on obtenir les résultats souhaités sur le diagramme de rayonnement que par l'utilisation d'un double ensemble de réception : l'un destiné à la localisation précise de l'animal, l'autre composé d'un faisceau serré de capteurs, fournissant les signaux destinés à l'étude du diagramme de rayonnement. Les programmes élaborés permettront alors une étude complète des caractéristiques spatio-temporelles des signaux de l'animal émetteur et de leur évolution durant l'approche sonar.

Résultats.

Ils ne se rapportent qu'à l'évolution temporelle des caractéristiques des signaux sonar du I. truncatus, et seuls certains d'entre eux sont présentés ici.

La figure 1 représente d'une part la configuration de la base de réception utilisée et d'autre part, la variation des intervalles de temps entre signaux successifs émis par le dauphin durant l'approche de la cible et sur lesquelles ont porté les analyses. Il convient de remarquer en particulier la décroissance importante des intervalles entre les émissions successives en fin d'approche, la fréquence de répétition correspondante, dépassant 200 émissions/seconde en fin de séquence. La figure 2 montre les variations du premier zéro des fonctions d'autocorrélation des



Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche d'une cible.

signaux successifs et de celles de leurs échos de surface reçus sur l'hydrophone 1. Il convient de noter: 1°) que jusqu'à la 80° émission, le pouvoir de résolution en distance de ces signaux est remarquablement constant, légèrement meilleur d'ailleurs pour les échos de surface $7,8 \mu$ (voie 1') que pour les signaux directs: 80μ (voie 1). 2°) que les variations deviennent extrêmement rapides et importantes d'un signal à l'autre sur la voie directe (voie 1) en fin d'approche, ce qui reflète l'accroissement à courte distance animal-hydrophone, de la vitesse de balayage du lobe d'émission de l'animal par l'hydrophone. Les résultats relatifs aux autres voies (non présentes ici) soulignent cette "sensibilité angulaire à courte distance", la meilleure valeur du pouvoir de résolution en distance étant obtenue sur la voie directe n°3 ($7,8 \mu$). Le tableau 1 représente les densités spectrales énergétiques des réponses des 3 hydrophones (1,3 et 4) à 6 signaux choisis arbitrairement (indice I=23;53;68;111;127; et 155) et aux échos de surface correspondants. Ces graphiques mettent en évidence l'extrême variabilité des caractéristiques spectrales des signaux suivant la position angulaire, capteur-émetteur. Ils permettent de constater par ailleurs qu'à grande distance (quelques mètres) le filtrage spatial est relativement moins prononcé (au moins sur les signaux directs) qu'à distance réduite et que l'allure générale des tracés obtenus s'apparente à ceux publiés par Diercks et al.(1). (voir I=23; V:4-4') mais qu'au contraire, à courte distance, il est extrêmement sévère, le signal se réduisant parfois à une étroite bande B.F. (signal 155; V=1-1'). Le tableau 2 représente les variations de l'énergie des signaux (voie 1,3 et 4) et de leurs échos de surface (voies 1'-3' et 4') reçus durant l'approche sur chacun des capteurs. Il convient de remarquer que sur les 3 voies réelles, la diminution des niveaux reçus correspond à la phase finale de l'approche durant laquelle les niveaux des échos de surfaces, reçus sur les voies 4' et surtout 3', augmentent, ce qui traduit une remontée de l'animal et un dépointage conséquent des hydrophones réels.

Conclusion

Les résultats obtenus, s'ils ne fournissent pas la trajectographie de l'animal au cours

de l'approche étudiée, précisent quantitativement le phénomène de filtrage spatial des signaux sonars des dauphins et soulignent les difficultés d'interprétation des résultats analytiques obtenus sur des données dont les conditions expérimentales ne sont pas parfaitement précisées. Les programmes de traitement élaborés permettent toutefois la détermination de l'ensemble des caractéristiques: temporelles-spectrales et spatiales des émissions acoustiques d'un animal reçues dans les conditions expérimentales qui ont été déterminées.

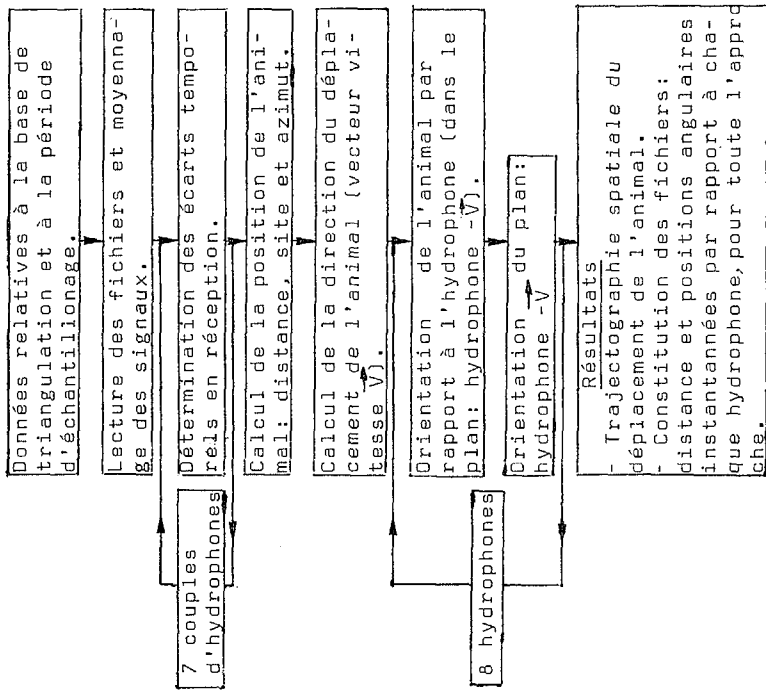
Bibliographie :

- 1° DIERCKS, K.T.; TROCHTA, R.T.; GREENLAW, C.F.; EVANS, W.E.;
"Recording and analysis of dolphin echolocation signals".
J. Acoust.Soc.Am., 49(6):1729-1732, 1971.
- 2° ROMANENKO, E.V.; TOMILIN, A.G.; ARTEMENKO, V.A.
"Vers le problème de la formation des sons de la direction des sons, chez les dauphins (en russe).
Bionika. M. 1965.
- 3° NORRIS, K.S.; EVANS, W.E.;
"Directionality of echolocation clicks in the Rough-Tooth Porpoise Steno bredanensis (Lesson)".
in "Marine-Bio-Acoustics", Vol.2.:305-316
Editeur: Tavolga, W.N.; Pergamon press 1967.
- 4° DZIEDZIC, A.; LEVY, J.C.;
"Description et mise en oeuvre d'une base de triangulation destinée à l'étude en mer des signaux acoustiques de dauphins".
- Quatrième colloque sur le traitement du signal et ses applications.
Nice 7 au 12 mai 1973: 585-609.
B.P. n°93- 06802 Cagnes-sur-Mer.
- 5° HELLION, A.; GUILLARD, P.; ESCUDIE, B.; DZIEDZIC, A.;
"Signaux impulsifs utilisés par les sonars biologiques".
Colloque sur les méthodes d'études et simulation des chocs.
Lyon 16, 17 et 18 octobre 1974.
Ecole Centrale de Lyon. 69130 Ecully.
- 6° BUSNEL, R.G.; DZIEDZIC, A.; ALCURI, G.;
"Etudes préliminaires des signaux acoustiques du Pontoporia, Blainvillei, Gervais et d'Orbigny, (cétacé Odontocète)" sous presse in Mammalia, 1975.



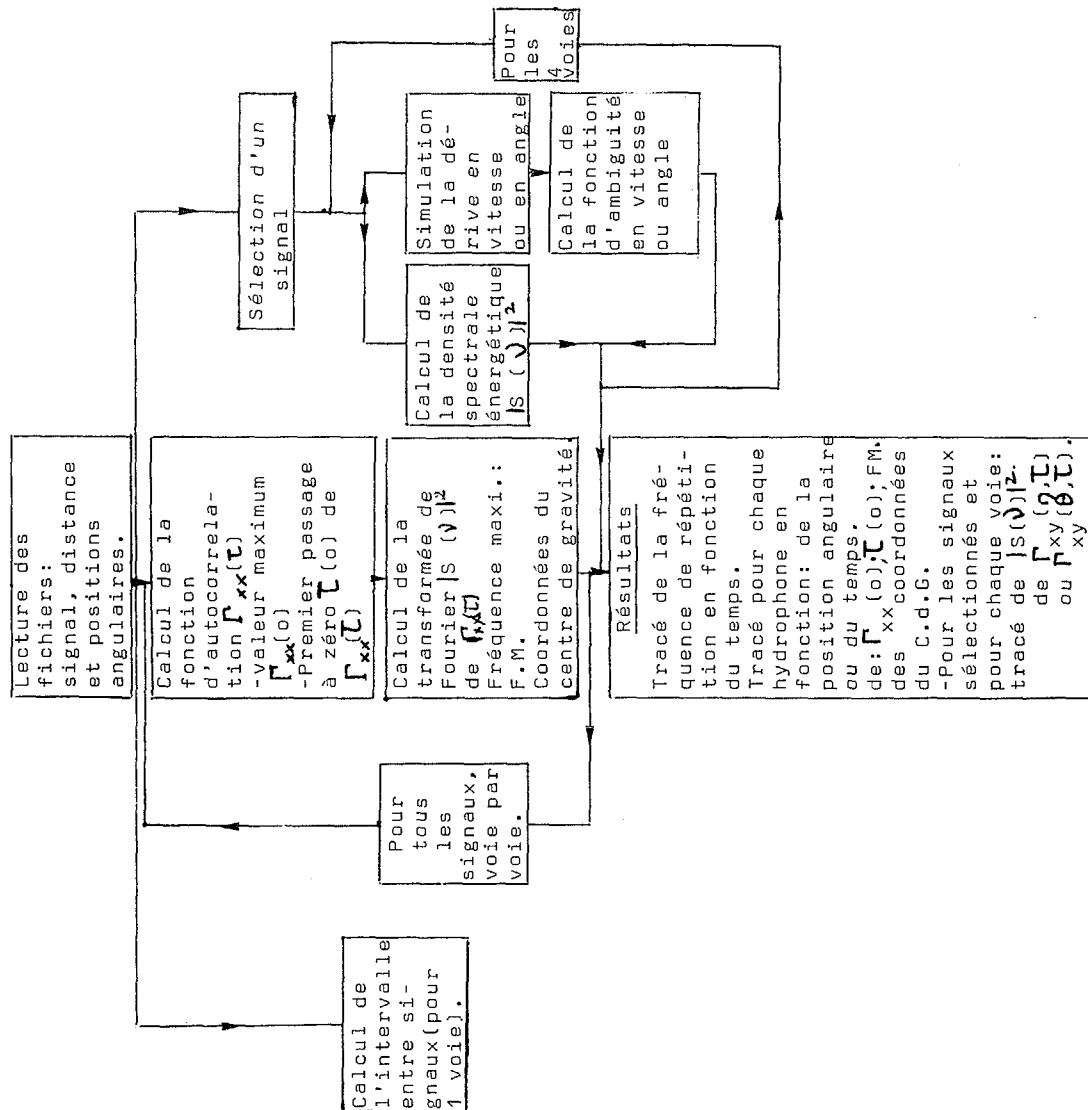
Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche d'une cible.

Traitement n° 1



- Les fichiers d'entrée ne contiennent que les signaux numérisés. (calculateur hybride EAI-PACER100-programme N. Moreau- ENST).
 - La triangulation est effectuée à partir des écarts temporels en réception (obtenus par intercorrélation) entre au moins 3 couples d'hydrophones.
 - Les échos de surface peuvent dans certains cas être utilisés; ils constituent alors les réponses de "récepteurs images" et doublent par conséquent la base réelle. Les 8 hydrophones indiqués ici se rapportent à ce cas (4 hydrophones réels + leurs images).
 - Les coordonnées relatives à la position de l'animal sont déterminées par rapport à un système d'axes rectangulaires associé à la base de réception. (Fig. 1).

Traitement n° 2





Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche sonar d'une cible.

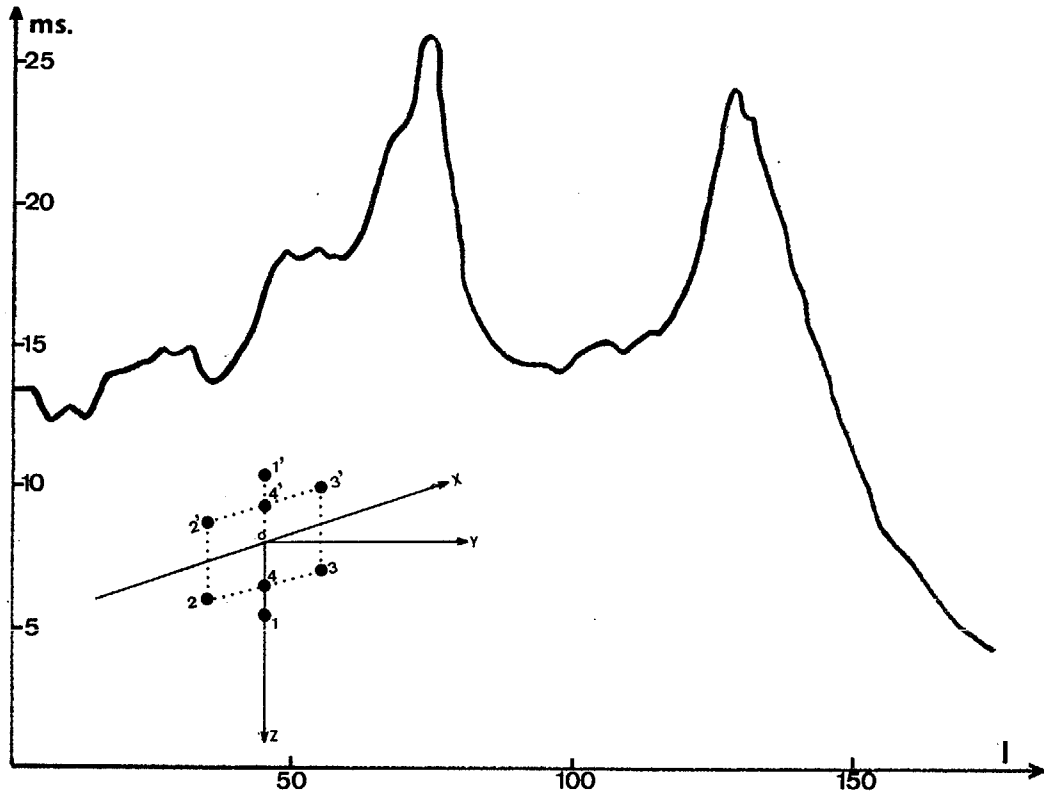


Figure 1. Variation des intervalles de temps (en ms.) entre signaux successifs (I en abscisses) par l'animal au cours de l'approche de la cible - et disposition des hydrophones. Plan xy: surface - distance entre hydrophones 2-3: 1 m. Profondeur des hydrophones 2-3-4: 0,50m. Profondeur de l'hydrophone 1: 0,79m.

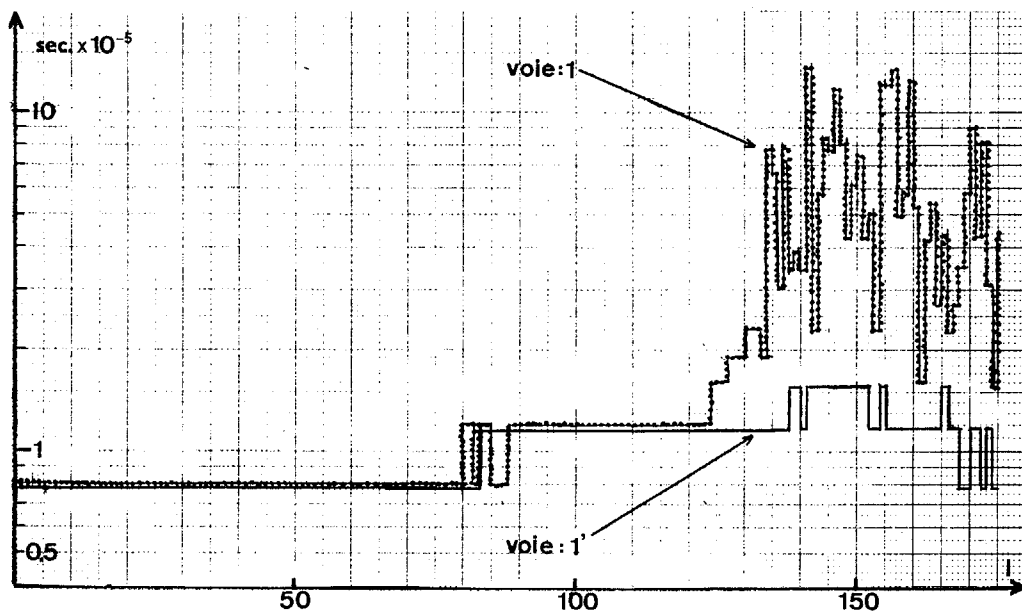


Figure 2. Premier passage à zéro des fonctions d'autocorrelation des signaux émis durant l'approche. Abscisse I: indice du signal. Ordonnées: temps en secondes $\times 10^{-5}$



Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche sonar d'une cible.

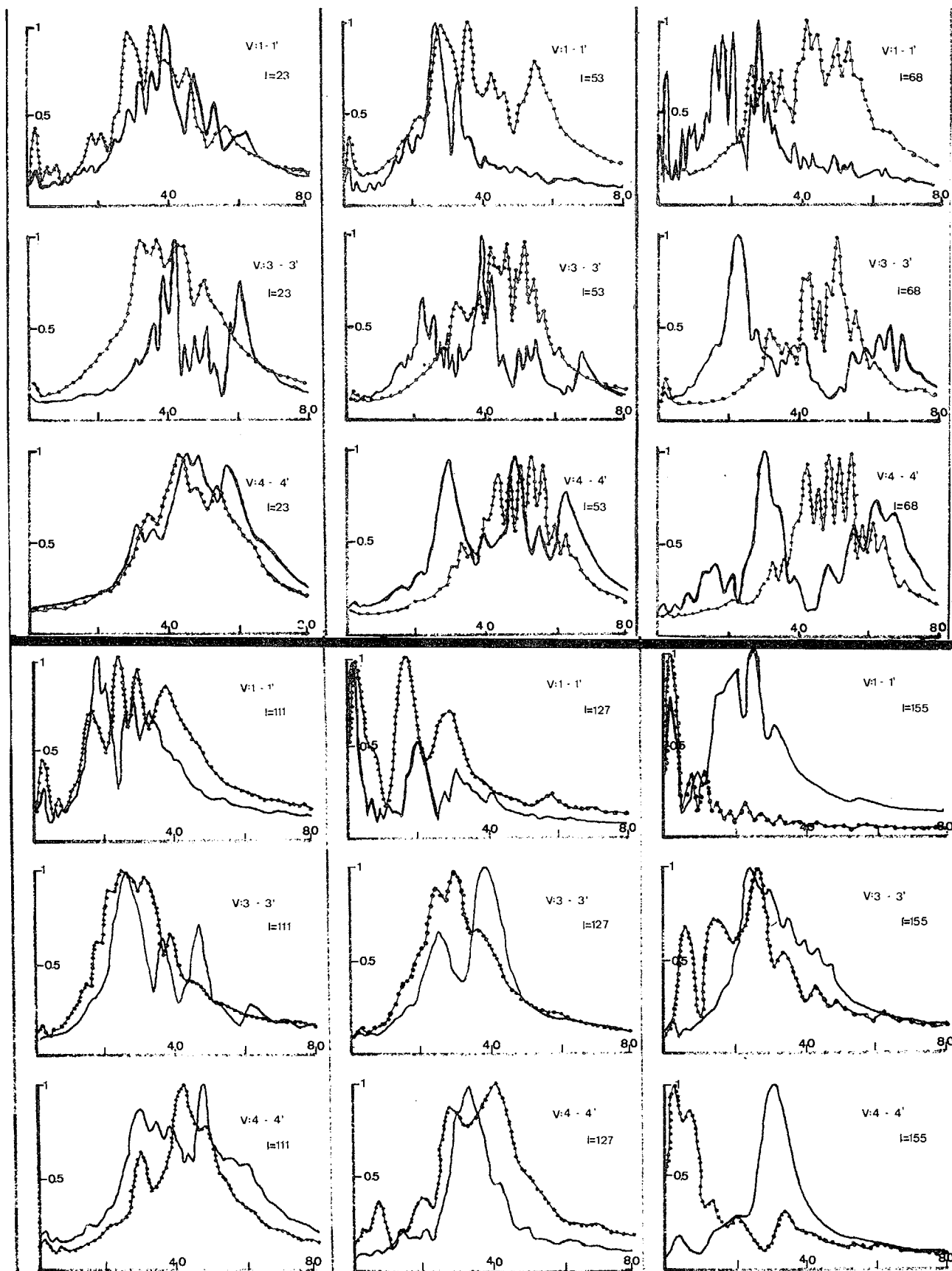


Tableau n° 1

Densités spectrales normalisées, des réponses de voies: V=1-1', 3-3' et 4-4' aux signaux d'indice I=23; 53; 68; 111; 127; 155.

- Abscisses en kHz. - Trait pointillé: réponse de l'hydrophone réel.

- Trait continu: réponses de l'hydrophone image correspondant.



Résultats d'une étude sur les caractéristiques spatio-temporelles et spectrales des signaux acoustiques émis par un dauphin durant l'approche sonar d'une cible.

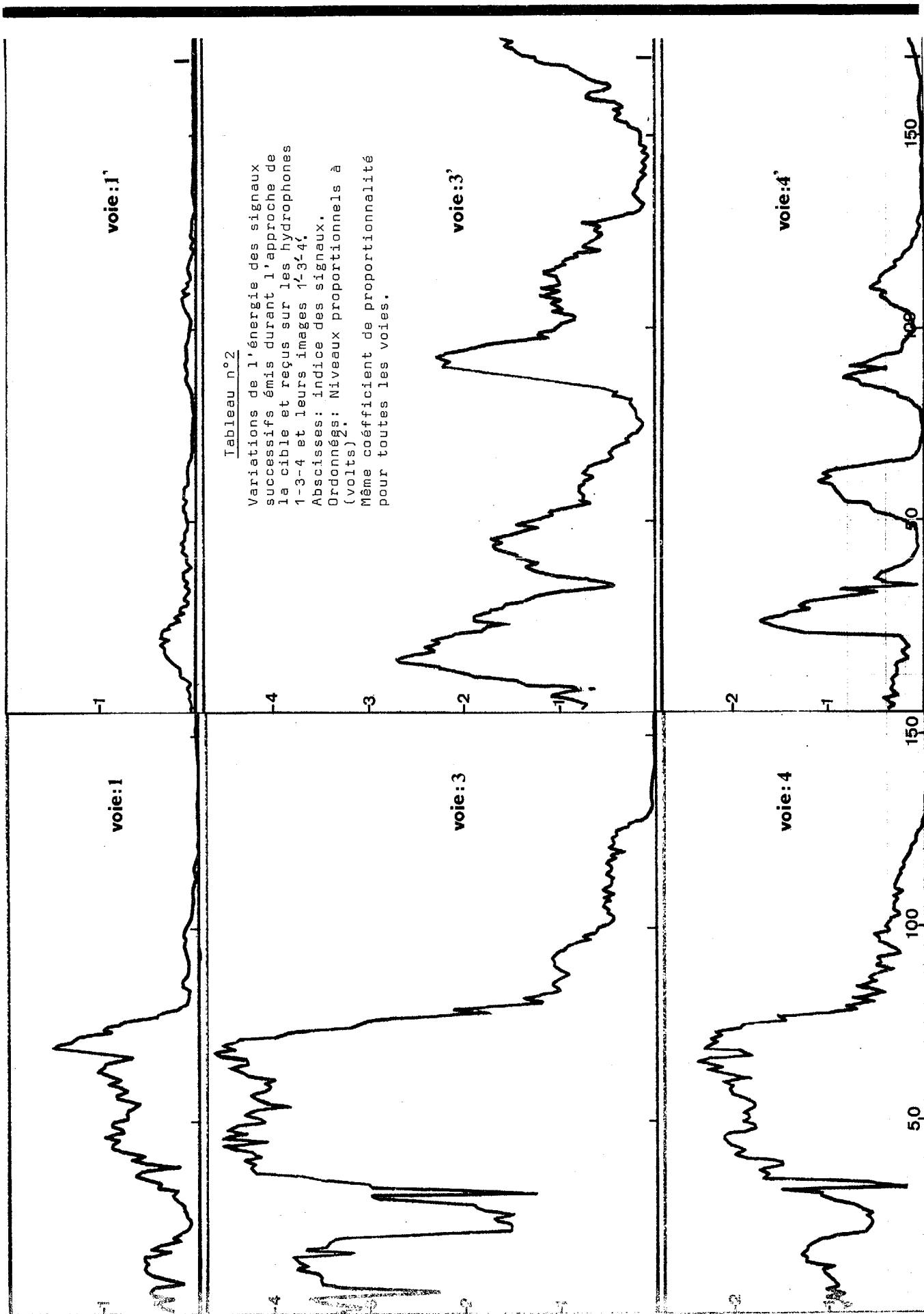


Tableau n°2

Variations de l'énergie des signaux successifs émis durant l'approche de la cible et reçus sur les hydrophones 1-3-4 et leurs images 1'-3'-4'.
 Abscisses: indice des signaux.
 Ordonnées: Niveaux proportionnels à (volts)².
 Même coefficient de proportionnalité pour toutes les voies.