

# HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

333



NICE du 1<sup>er</sup> au 5 JUIN 1981

---

DETECTION A L'AIDE DES MATRICES D'INTERCORRELATION

François VARLET et Jean-Paul PIGNON

SINTRA-ALCATEL, 1, avenue Aristide Briand, 94117 ARCUEIL

---

## RESUME

La détection d'échos sonar à l'aide d'une antenne linéaire verticale s'avère délicate avec les procédés classiques en présence de trajets multiples (cas de la détection par petits fonds). Il n'existe pas, dans ce cas, de site d'arrivée privilégié de l'écho, mais une répartition a priori inconnue de son énergie dans tout le plan vertical.

L'étude de la matrice interspectrale (ou de covariance pour des signaux à bande étroite) entre capteurs permet une nouvelle approche de ce problème. Cette matrice résume en effet les propriétés énergétiques de l'ensemble des signaux reçus par l'antenne. Elle contient donc, en particulier, toutes les informations nécessaires à la détection.

Nous présentons des résultats de simulations et d'expériences effectuées en mer sur signaux à bande étroite qui mettent en évidence l'intérêt de l'utilisation des valeurs propres de la matrice de covariance entre capteurs pour la détection.

Ces travaux ont été soutenus par la DRET.

## SUMMARY

Detection of sonar echoes with a linear vertical array may be critical using classical methods in multipath propagation conditions (detection in shallow water for example). In this case, there is not one particular arrival angle of the echo but an a priori unknown distribution of its energy in all the vertical plane.

The study of the cross-spectral matrix (or of the covariance matrix in the case of narrow-band signals) of the outputs of the sensors leads to a new approach of the problem. This matrix contains all the energetic properties of all the signals received by the array, and, by the fact, all the informations necessary for detection.

We present results from simulation and experiments in sea with narrow-band signals, which show the interest of using the eigen values of the covariance matrix between sensor outputs for detection.

This work was sponsored by DRET.



### INTRODUCTION

Les dispositifs de détection d'échos sonar à l'aide d'une antenne verticale (du type bouées actives) utilisent habituellement une formation de voies en site pour augmenter le gain de détection. Ceci sous-entend l'hypothèse que l'onde est plane et provient d'un site bien défini.

En réalité, et par petits fonds en particulier, le signal reçu ne provient pas d'une direction unique, du fait de la présence de trajets multiples, mais peut être considéré, en première approximation, comme une superposition d'ondes planes. L'énergie reçue est alors répartie dans un plan vertical, de manière inconnue, ce qui rend inefficace la formation de voies.

La matrice interspectrale des signaux issus des capteurs contient l'ensemble des caractéristiques énergétiques des signaux vus par l'antenne. Elle est fonction de ces signaux, des sources et des caractéristiques du milieu de propagation. De plus, sa décomposition en directions principales permet de regrouper les signaux corrélés quels que soient les sites d'arrivée.

Les énergies reçues se séparent alors selon les sources, et non selon la géométrie du champ au voisinage de l'antenne, sur les différentes valeurs propres. Il est donc possible d'améliorer la détection en présence de trajets multiples en utilisant cette propriété.

Nous rappelons ici brièvement, dans un premier temps, les principaux résultats théoriques que nous illustrons de résultats de manipulations en laboratoire. Nous présentons ensuite les résultats obtenus lors d'une expérience effectuée en mer sur des signaux à bande étroite, la matrice de covariance étant estimée en temps réel. Ceux-ci illustrent de manière qualitative le gain en détection obtenu par petits fonds à l'aide des valeurs propres de la matrice de covariance comparé à celui obtenu en sortie de voie préformée.

### POSITION DU PROBLEME

Le problème pratique que nous traitons est celui de la détection d'échos sonar à l'aide d'une antenne linéaire verticale composée d'un petit nombre de capteurs équidistants, par petits fonds, à l'aide des valeurs propres de la matrice de covariance des sorties des capteurs.

Ce problème a déjà fait l'objet de nombreux articles et nous ne rappelons ici que les principaux résultats applicables dans le cadre de notre étude.

La matrice de covariance, qui est ici équivalente à la matrice interspectrale du fait que les signaux traités sont à bande étroite (500 Hz autour de 10.1 kHz), est hermitienne et semi-définie non négative. En présence de bruit spatialement blanc et de même puissance sur les capteurs, et de  $p$  sources statistiquement indépendantes, elle s'écrit :

$$C = \sum_{i=1}^P S_i \cdot S_i^* + P_0 I$$

où :  $S_i$  est le "vecteur source" de la source  $i$

:  $P_0$  est la puissance du bruit

:  $I$  est la matrice unité.

Sous ces hypothèses, elle possède au plus  $p$  valeurs propres supérieures à  $P_0$ , les autres étant égales à  $P_0$ . De plus, si les sources sont linéairement indépendantes, elle devient strictement de rang  $p$ .

Dans ces conditions, il est théoriquement possible de déterminer, au seul vu des valeurs propres, le nombre de sources en présence.

D'autre part, on démontre que les vecteurs sources appartiennent au sous-espace engendré par les  $p$  vecteurs propres associés, mais ne sont pas colinéaires, en règle générale, à ces derniers. De ce fait, lorsque plusieurs sources sont en présence, le nombre de valeurs propres donne le nombre de sources, mais ne permet pas a priori de les séparer. Chaque valeur propre "contient" des informations concernant plusieurs sources. Il est en particulier impossible, dans le cas général, de déterminer leurs puissances.

En pratique, deux difficultés apparaissent :

- La matrice de covariance est une matrice estimée. Elle ne conduit donc pas à des valeurs numériques des valeurs propres vérifiant les propriétés théoriques énoncées plus haut. La démarche consiste alors à estimer la puissance du bruit en l'absence de signal et à effectuer la détection par comparaison à un seuil.

- Le bruit n'est en général pas spatialement blanc, mais peut se décomposer comme la somme de bruit indépendant et de bruits corrélés. Ces derniers sont vus par l'antenne comme autant de signaux, en règle générale, permanents (contrairement aux échos sonar). De ce fait, le signal recherché, lors de son arrivée, apparaîtra, non pas sur une valeur propre, mais sur plusieurs, d'autant plus nombreuses que les "sources de bruits", réelles ou virtuelles, seront nombreuses.

DETECTION A L'AIDE DES MATRICES D'INTERCORRELATION

Ces quelques propriétés et phénomènes ont été mis en évidence en simulations et lors des expérimentations in situ dont l'exposé fait l'objet de la suite de cette communication.

EXPERIMENTATION

Méthode de calcul

Le calcul des valeurs propres s'effectue en deux opérations :

- estimation en temps réel des coefficients de la matrice de covariance (cf. figure 1a),
- calcul et tracé des valeurs propres en temps différé (cf. figure 1b). Un coffret de mesure calcule les coefficients d'intercorrélacion par écrêtage des signaux issus des capteurs, la valeur efficace de ces signaux et leur somme détectée intégrée.

Ces informations sont échantillonnées, numérisées et enregistrées en temps réel par la baie d'enregistrement numérique.

Un programme de calcul permet, à l'aide du calculateur et du traceur de courbes, l'acquisition des coefficients d'intercorrélacion stockés par la baie d'enregistrement numérique, la formation de la matrice, le calcul des valeurs propres par la méthode de Jacobi et leur tracé en fonction du temps.

Les coefficients d'intercorrélacion  $C_{ij}$  mesurés par les corrélateurs à écrêtage sont normés et par conséquent la matrice de covariance est normée. Pour que les coefficients soient équivalents à des coefficients calculés de manière analogique, ils sont multipliés par la valeur efficace des capteurs correspondants. On obtient ainsi une matrice "corrigée" où les coefficients diagonaux représentent la puissance mesurée sur chaque capteur.

1	$C_{12}$	$C_{13}$
$C_{12}^*$	1	$C_{23}$
$C_{13}^*$	$C_{23}^*$	1

matrice normée

$H_1^2$	$H_1 \cdot H_2 \cdot C_{12}$	$H_1 \cdot H_3 \cdot C_{13}$
$H_1 \cdot H_2 \cdot C_{12}^*$	$H_2^2$	$H_2 \cdot H_3 \cdot C_{23}$
$H_1 \cdot H_3 \cdot C_{13}^*$	$H_2 \cdot H_3 \cdot C_{23}^*$	$H_3^2$

matrice corrigée

Les coefficients d'intercorrélacion sont intégrés sur une durée de 20 millisecondes avant d'être échantillonnés. Les valeurs propres sont intégrées après calcul sur une durée de 100 ms correspondant à la durée des signaux enregistrés à la mer. Le temps d'intégration des coefficients d'intercorrélacion a été choisi, parce qu'il a été constaté que la valeur de ces coefficients pouvait varier pendant la durée même du signal. En effet, l'amplitude et la phase des signaux reçus sur les capteurs ne sont pas constants pendant la durée des impulsions. On a donc intérêt à calculer les valeurs propres à partir de coefficients d'intercorrélacion intégrés pendant une faible durée et à effectuer une intégration supplémentaire après calcul.

RESULTATS SUR SIGNAUX SYNTHETIQUES

La figure 2 présente les résultats obtenus en simulant la réception d'une onde plane sinusoïdale impulsionnelle additionnée de bruits synthétiques indépendants, par une antenne composée de trois capteurs.

L'onde simulée se présente sous une incidence telle que le déphasage entre les tensions issues de capteurs voisins soit de  $120^\circ$ , c'est-à-dire que la somme des tensions sans bruit est nulle.

La figure montre, pour différents rapports signal sur bruit, la somme détectée intégrée des tensions issues des capteurs et les trois valeurs propres classées par ordre décroissant,  $V_1$  étant la plus grande.

En l'absence de signal les capteurs reçoivent des bruits indépendants, ce qui se traduit par trois valeurs propres sensiblement égales. A l'apparition du signal, la plus grande valeur propre augmente tandis que la somme reste constante.

La figure 3 montre les résultats obtenus en simulant la réception de deux ondes planes sinusoïdales de fréquences différentes se présentant sous une incidence symétrique par rapport à l'axe de l'antenne. Les deux ondes ont même amplitude. L'une est reçue en permanence, l'autre impulsionnelle.

Les résultats sont présentés pour différents déphasages électriques entre capteurs.

Lorsqu'il n'y a qu'un signal, on trouve une valeur propre non nulle et à l'apparition du second signal on obtient deux valeurs propres non nulles dont la somme est constante.

Quand les deux signaux se présentent avec un déphasage



électrique nul ou égal à  $180^\circ$ , il n'y a qu'une valeur propre non nulle et on ne peut détecter la présence de deux signaux.

Lorsque les deux signaux se présentent avec un déphasage de  $120^\circ$  la somme est nulle alors qu'on obtient deux valeurs propres non nulles, caractéristiques des deux signaux.

#### RESULTATS SUR SIGNAUX REELS

Les résultats présentés ici proviennent des signaux réels enregistrés en Atlantique dans les conditions précisées par la figure 4.

Le but répondeur est déclenché par réception d'un signal sonar à 10,1 kHz. Il émet alors une série de 7 impulsions de fréquence pure à 10,1 kHz, d'une durée de 100 ms et d'amplitude décroissante, chacune des impulsions étant affaiblie de 6 dB par rapport à la précédente.

La base de réception est une antenne verticale composée de 6 hydrophones espacés de  $\lambda/2$ , soit environ 7,5 cm.

Les signaux ont été enregistrés en bande étroite à 10,1 kHz  $\pm$  250 Hz. Les valeurs propres ont été calculées à partir des signaux recueillis sur trois capteurs espacés de  $\lambda$ .

Chaque séquence débute après l'impulsion sonar, d'émission commandant le déclenchement du but répondeur. La grande impulsion du début est un écho de fond ou de surface. Les quatre premières impulsions du but répondeur sont plus ou moins masquées par le phénomène de réverbération produit par l'émission sonar. La réverbération se présente comme un signal très corrélé provenant du site 0. Il est possible d'éliminer les effets de la réverbération et d'augmenter le rapport signal sur bruit dans cette zone à l'aide d'un dispositif actuellement en développement dans nos laboratoires.

La figure 5a montre, en 1, les signaux reçus sur les capteurs ainsi que leur somme après détection intégration, et en 2 les trois valeurs propres classées par ordre décroissant,  $V_1$  étant la plus grande.

Les enregistrements ont été effectués à proximité du rail maritime d'Ouessant. Le bruit de trafic y est très important. Le bruit recueilli sur les capteurs est d'amplitude élevée et est très corrélé. C'est pourquoi il n'y a pratiquement qu'une seule valeur propre non nulle, le bruit corrélé étant considéré par l'antenne comme un signal.

A l'apparition des impulsions, on se trouve donc en présence de deux signaux indépendants qui se répartissent entre les deux plus grandes valeurs propres.

Sur les capteurs, les impulsions se présentent de façon très inégale. L'impulsion 3, qui ressort bien sur  $H_2$  et  $H_4$  apparaît très mal sur  $H_6$ . L'impulsion 4 n'apparaît pratiquement pas sur  $H_4$ , tandis que l'impulsion 6, visible sur  $H_6$  et  $H_4$ , n'est pas détectable sur  $H_2$ .

Sur la somme, les impulsions 4, 5 et 6 ne sont pas détectables. L'impulsion 7 n'est visible ni sur la somme, ni sur les capteurs. La somme est donc loin d'apporter, dans ce cas, une amélioration pour la détection.

La valeur propre  $V_1$  ne présente pratiquement aucun gain par rapport à la somme. Mais les impulsions 4, 5, 6 et 7 sont visibles sur  $V_2$ . Pour mettre en évidence ce phénomène, les trois valeurs propres sont représentées ramenées à la même variance de bruit (figure 5a3).

On reconnaît ainsi les impulsions 4, 5, 6 et 7 sur  $V_2$  avec une très forte amplitude. On retrouve également ces impulsions sur  $V_3$ .

Les figures 5b présentent les mêmes résultats pour une séquence enregistrée lors du passage d'un cargo, dont le bruit, très corrélé, masque la plupart des impulsions. Le bruit de ce bateau se traduit par une modulation de forte amplitude sur les capteurs (fig. 5b1).

$V_1$  se présente de façon identique à la somme. La réverbération apparaît sur  $V_2$  et  $V_3$  (fig. 5b2).

Sur la figure 5b3, le fait de ramener les trois valeurs propres à la même variance permet de mettre en évidence la présence des impulsions 5, 6 et 7 sur  $V_2$  et 5 sur  $V_3$ . Le bruit du cargo n'apparaît ni sur  $V_2$  ni sur  $V_3$ .

#### COMBINAISON DES VALEURS PROPRES

Toutes les impulsions se trouvent réparties entre les trois valeurs propres. Afin de pouvoir effectuer la détection d'une manière identique à celle couramment employée (seuil sur la somme des sorties d'hydrophones détectée intégrée), il est nécessaire de condenser les informations "valeurs propres" en une seule sortie.

Deux essais de combinaisons des valeurs propres ont été effectués au bas de la figure 5 (5a4 et 5b4), d'une manière purement empirique :

- La plus grande des valeurs propres ramenées à même variance du bruit à chaque instant,

## DETECTION A L'AIDE DES MATRICES D'INTERCORRELATION

- la somme des trois valeurs propres ramenées à même variance du bruit.

On peut remarquer sur la figure 5a4 que la somme des valeurs propres permet la détection de toutes les impulsions, ce qui n'est possible ni sur quelque capteur que ce soit, ni sur la somme.

En présence du cargo, figure 5b4, la présence de la réverbération rend inefficace la détection par une de ces combinaisons. Par contre, hors réverbération, on peut remarquer l'amélioration du gain en détection, en particulier sur l'impulsion 7.

La recherche d'une combinaison optimale des valeurs propres afin d'exploiter au mieux les informations qu'elles contiennent au sens de la détection, fait actuellement l'objet d'une étude particulière.

#### CONCLUSION

Les investigations quant à l'utilisation des matrices interspectrales, tant à la détection qu'à la mesure, semblent se multiplier depuis quelques années. Cependant, les résultats issus de signaux réels restent peu nombreux dans la littérature.

Nous espérons à l'aide de ces quelques exemples, avoir montré l'intérêt de cette méthode dans le cas de la seule détection de cibles par petits fonds en présence de trajets multiples, et en présence de brouilleurs permanents, configurations particulièrement défavorables lors de la détection par les procédés classiques.

#### BIBLIOGRAPHIE

- H. MERMOZ - Imagerie, corrélation et modèles  
Ann. Télécom., 31, n° 1-2, 1976, pp. 17-36
- M. BOUIX - Principes de la détection passive  
Revue du Céthedec n° 55 2° trimestre 1978
- G. BIENVENU - Détection passive de sources ponctuelles dans un bruit isotrope  
5° colloque GRETSI (1975) - 60
- C. TURCAT - Problèmes liés à l'estimation d'une matrice de densité spectrale -  
6° colloque GRETSI (1977) - 16.



DETECTION A L'AIDE DES MATRICES D'INTERCORRELATION

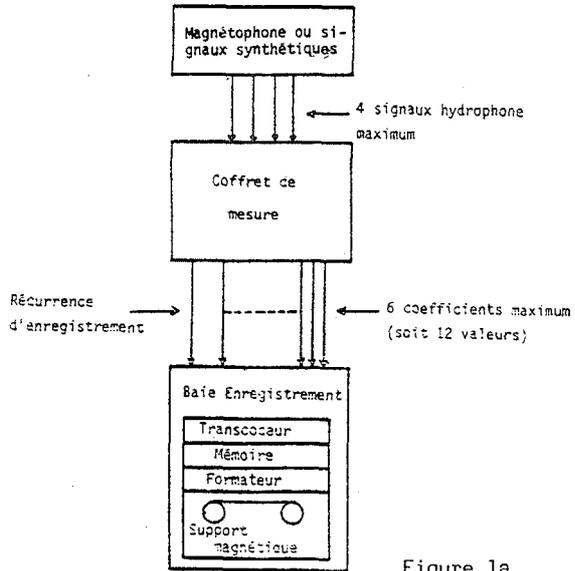


Figure 1a

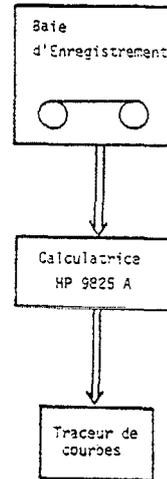


Figure 1b

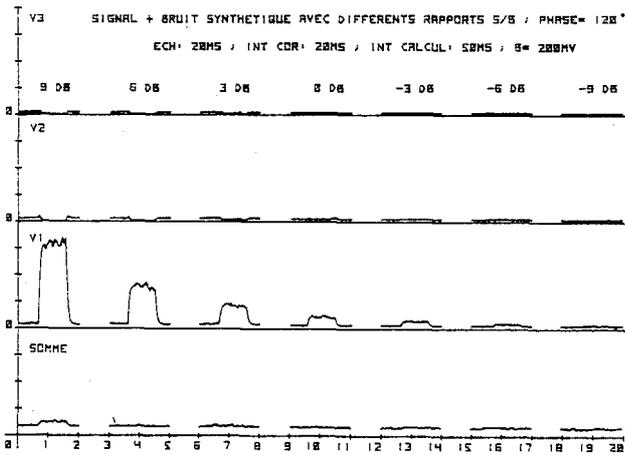


Figure 2

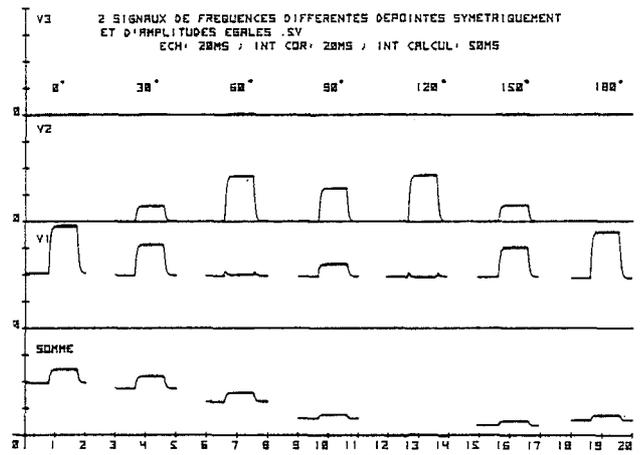


Figure 3

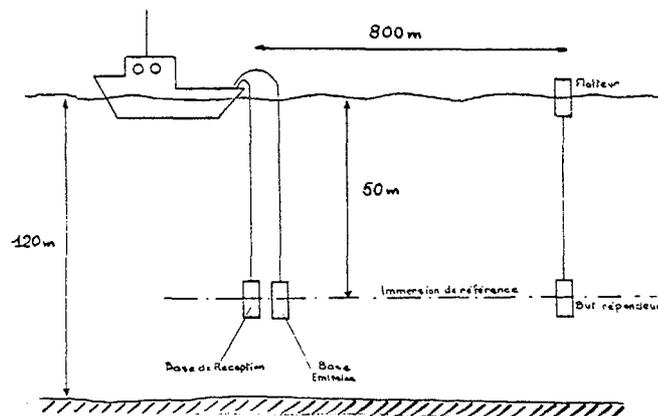
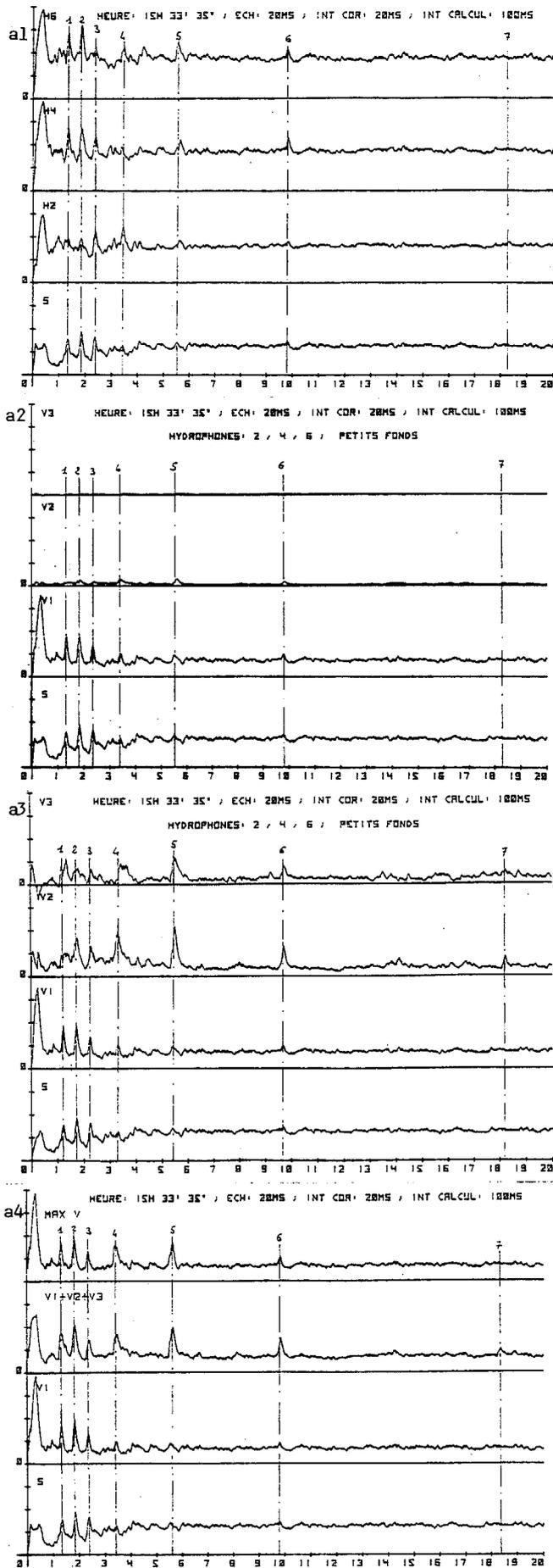
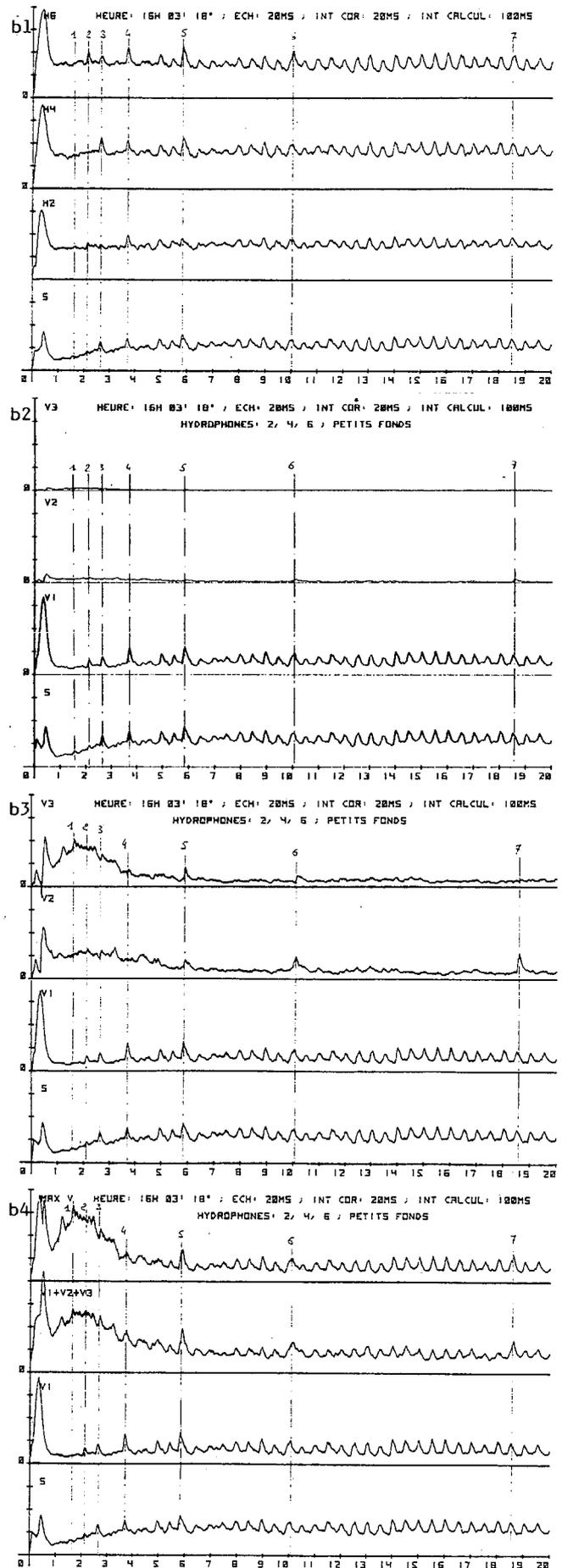


Figure 4

DETECTION A L'AIDE DES MATRICES D'INTERCORRELATION



Séquence a



Séquence b

Figure 5

