

NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LA RECHERCHE DES
MATRICES D'INTERSPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

M. BOUIX (1), C. GOUTELARD (2), A. NEHME (2), J. RANCHIN (3)

(1) Département de Mathématiques - Université de ROUEN (2) LETTI 9 avenue de la division Leclerc 94230 CACHAN
(3) CNAM 292 rue Saint Martin 75141 PARIS cedex 03

RESUME

On considère un signal formé par un ensemble d'ondes planes captées par un réseau d'un nombre fini de capteurs. Si on peut définir une durée de stationarité finie des signaux venant de cibles diverses, il est alors possible de séparer les signaux par la recherche de valeurs propres et de vecteurs propres de matrices hermitiennes d'interspectres.

Une étude expérimentale a été réalisée à partir d'un réseau de 10 capteurs. Les signaux obtenus ont été analysés et on a recherché les fenêtres spectrales significatives quant à la présence des cibles. Une étude de la durée de stationarité a permis d'en fixer les limites.

La recherche des valeurs propres de matrices d'interspectres a montré les possibilités de détection même en milieu perturbé. L'évolution des valeurs propres a été étudiée sur des cibles réelles pour affiner l'étude de la durée de stationarité et évaluer les possibilités de traitement en temps réel.

Les caractéristiques générales d'une machine de traitement en temps réel peuvent être déduites des résultats obtenus.

SUMMARY

The signal consist of a set of plane waves received by a detector array with a finite number of elements. If stationary duration of signals can be defined, it is possible to distinguish each target wave by the search of eigenvalues and eigenvectors of cross-spectrum Hermitian matrices.

An experimental study had been realized with a ten detectors array.

The eigenvalues research of cross-spectrum matrices had shown the possibility of detection even in a disturbed media. The eigenvalues variations had been studied with actual targets to define stationary duration of signals and to estimate the real time treatment possibilities.

General characteristics of a real time treatment machine can be deduced of these results.



METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LA RECHERCHE DES
MATRICES D'INTERSPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

I. INTRODUCTION

La détection passive sous-marine se fait à travers un canal de transmission bruyant, aléatoire et à trajets multiples. Le signal utile est constitué par les ondes produites par les sources utiles telles que bateaux et en particulier par les bruits d'hélices qui localement peuvent être considérées comme quasi périodiques. Les bruits proviennent de toutes les autres sources sonores.

A priori, l'observateur ignore s'il existe des sources utiles. Le problème de la détection consiste à rechercher l'existence d'une ou plusieurs sources de signal utile. En détection passive il sera possible de déterminer, dans une certaine mesure, les directions de propagation des signaux utiles et de localiser la source, dans un secteur angulaire s'il s'agit d'une seule base d'observation, dans un volume d'incertitude géométrique s'il s'agit de plusieurs bases d'observation.

L'utilisation d'un réseau de capteurs par base est nécessaire pour déterminer les directions de propagation des signaux utiles. Les signaux reçus peuvent être traités de différentes manières. La méthode utilisée repose sur un calcul matriciel réalisant la détection et capable de déterminer les directions de propagation des signaux utiles.

La méthode a été expérimentée à partir d'une base constituée par 10 capteurs et de sources sonores utiles constituées par des navires de surface. Les signaux utiles et le bruit ont été enregistrés sur support magnétique et traités en temps différé. Dans une première phase une identification spectrale des signaux utiles a été faite puis le traitement de détection a été réalisé sur le domaine spectral utile.

Les résultats obtenus permettent de fixer les caractéristiques principales d'une machine de traitement en temps réel.

II. PRINCIPE DE LA METHODE

L'origine de cette méthode est l'article de M. BOUIX "Principes de la détection passive" paru dans la Revue du CETHEDC n° 55 2ème trimestre 1978, auquel on pourra se reporter utilement.

On supposera les conditions suivantes satisfaites :

- les ondes émises par une source sont supposées localement planes dans une région finie située à grande distance de la source.
- Le réseau de capteurs est fini et les sources sont situées à grande distance de ce réseau. Dans un certain domaine contenant le réseau de capteurs le signal total qui arrive, provenant des sources utiles et des sources parasites, est formé par la superposition d'ondes planes.
- Une onde plane de pression acoustique sera notée sous sa forme complexe au point \vec{x} de l'espace ordinaire rapporté à un repère cartésien autonomé de dimension 3 :

$$p(t, \vec{x}) = A \exp \left[2\pi i f \left(t - \frac{\vec{k} \cdot \vec{x}}{c} \right) \right]$$

où

- . A est l'amplitude complexe de l'onde de pression.
- . c est la célérité des ondes acoustiques supposée constante dans un domaine contenant le réseau des capteurs.
- . t est le temps qui varie sur $]-\infty, \infty[$
- . f est la fréquence de l'onde.
- . \vec{k} est le vecteur unité de la direction vers laquelle se propage l'onde plane.

Le signal total qui arrive à un point x contenu dans la région des capteurs peut s'écrire sous la forme :

$$(1) s(t, \vec{x}, \omega) = \sum_{j=1}^n s_j(t, \vec{x}, \omega_j) + b(t, \vec{x}, \omega)$$

expression dans laquelle

$$(2) s_j(t, \vec{x}, \omega) = \int_0^{\infty} A_j(f, \omega_j) \exp \left[2\pi i f \left(t - \frac{\vec{k}_j \cdot \vec{x}}{c} \right) \right] df$$

représente le signal utile de la jème cible et

$$(3) b(t, \vec{x}, \omega) = \int_S \int_0^{\infty} A(f, \vec{k}, \omega) \exp \left[2\pi i f \left(t - \frac{\vec{k} \cdot \vec{x}}{c} \right) \right] df d\Omega$$

représente le bruit, et où :

- . j désigne la jème cible.
- . ω_j est l'élément de l'espace de probabilité P_j de la jème cible.

METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LA RECHERCHE DES MATRICES D'INTERSPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

- . \vec{k}_j donne la direction de la jème cible.
- . $d\Omega$ représente l'élément d'angle solide dans la direction du vecteur unitaire k .
- . ω est une variable aléatoire sans relation, à priori, avec ω_j .
- . S est la sphère unité dans R^3 .

Une base étant constituée par m capteurs numérotés $p = 1, 2, \dots, m$ le p ème capteur centré au point x fournit un signal $\sigma_p(t, \omega)$ qui est une fonctionnelle linéaire \mathcal{F} - ou supposée telle - de $s(t, \vec{x}, \omega)$ en \vec{x}_p de telle sorte que :

$$(4) \quad \sigma_p(t, \omega) = \mathcal{F}_p [s(t, \vec{x}_p, \omega)]$$

où \mathcal{F}_p est la fonction de transfert. Elle est reliée à la réponse impulsionnelle $\Gamma_p(t, \vec{k})$ du p ème capteur par la relation

$$(5) \quad \sigma_p(t, k) = \mathcal{F}_p [\delta(t - [k x_p/c])]$$

où $\delta(t - [k x_p/c])$ représente l'impulsion unité.

Si les signaux qui arrivent sur le réseau de capteurs sont déterministes, ω est fixé et on peut supprimer cette variable aléatoire des expressions. On montre alors [1] qu'on peut représenter le signal $\sigma_p(t)$ par une somme d'ondes planes telles que pour une direction de propagation \vec{k} il existe plusieurs fréquences f et que pour une fréquence f il existe plusieurs directions \vec{k} . On note les amplitudes complexes A_{uv} de sorte que les k soient indicés \vec{k}_u ($u = 1, 2, \dots, U$) et les f soient indicés f_v ($v = 1, 2, \dots, V$) alors

$$(6) \quad \sigma_p(t) = \sum_{u=1}^U \sum_{v=1}^V A_{uv} \exp 2\pi i f_v (t - \frac{\vec{k}_u \cdot \vec{x}_p}{c})$$

$$\boxtimes \Gamma_p(t, k_u)$$

où $p = 1, 2, \dots, m$

\boxtimes indique une convolution prise sur la variable t .

La transformée de Fourier $\mathcal{F}\sigma_p$ de $\sigma_p(t)$ qui fait passer de la variable t à la variable ν s'écrit sous la forme

$$(7) \quad (\mathcal{F}\sigma_p)(\nu) = \sum_{v=1}^V B_p(f_v) \delta(\nu - f_v)$$

où

$$(8) \quad B_p(f_v) = \sum_{u=1}^U A_{uv} \exp(-2\pi i f_v \frac{\vec{k}_u \cdot \vec{x}_p}{c}) \cdot \gamma_p(\frac{\vec{k}_u \cdot f_v}{c})$$

et $\gamma_p(f, \vec{k}) = (\mathcal{F}\Gamma_p)(f, \vec{k})$ est la transformée de Fourier qui fait passer de la variable t vers la variable f .

En pratique $(\mathcal{F}\Gamma_p)(\nu)$ n'est pas un spectre de raies mais il peut être échantillonné convenablement. Si on fixe les k_u et les f_v , le procédé de détection est la méthode classique du filtre adapté.

Si on forme la matrice hermitienne des auto et interspectres des capteurs pris deux à deux

$$(9) \quad \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B}_1 & \bar{B}_2 & \dots & \bar{B}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \bar{B}_1 & B_1 \bar{B}_2 & \dots & B_1 \bar{B}_m \\ B_2 \bar{B}_1 & B_2 \bar{B}_2 & \dots & B_2 \bar{B}_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_m \bar{B}_1 & B_m \bar{B}_2 & \dots & B_m \bar{B}_m \end{bmatrix}$$

On peut voir que cette matrice a une valeur propre unique $\sum_{p=1}^m B_p \bar{B}_p$ où \bar{B}_p est le conjugué de B_p et un vecteur propre unique, le vecteur colonne B_p .

Dans le cas de signaux sonores la valeur propre a les dimensions d'une puissance. En pratique à cause de l'existence de bruit, l'existence d'un signal utile sera caractérisé par l'apparition d'une valeur propre unique et réelle de la matrice qui dépassera un certain seuil. Il est alors possible de résoudre le système (8) si $U = mV$. Il suffit de choisir dans les N échantillons des spectres les V échantillons les plus significatifs et de prendre V pour avoir un système déterminé bien conditionné.

Cette méthode permet de caractériser la présence d'un signal utile et la direction de la source peut être trouvée seulement si cette source est ponctuelle.

Dans le cas de signaux aléatoires le signal qui arrive sur le réseau de capteurs, relation (3), donne pour le p ème capteur un signal de sortie :

$$\sigma_p(t, \omega) = \iint_S A(f, \vec{k}, \omega) \exp 2\pi i f (t - \frac{\vec{k} \cdot \vec{x}_p}{c})$$

$$\boxtimes \Gamma_p(k, t) df d\Omega$$

dont la transformée de Fourier temps-fréquence

$$\hat{\sigma}_p(\nu, \omega) = [\mathcal{F}\sigma_p(t, \omega)](\nu, \omega) \text{ s'écrit :}$$



$$\hat{\sigma}_p(\nu, \omega) = \int_S A(\vec{k}, \nu, \omega) \exp \left[- 2\pi i \frac{\vec{k} \cdot \vec{x}_p}{c} \right] \times \gamma_p(\vec{k}, \omega) d\Omega$$

S'il existe n sources décorréélées numérotées $j = 1, 2, \dots, n$, on obtient alors

$$\hat{\sigma}_p(\nu, \omega) = \sum_{j=1}^n \int A_j(\frac{\nu k}{c}, \omega_j) \exp \left[- 2\pi i \frac{kx}{c} \right] \times \frac{1}{c^3} \gamma_p(\nu, \frac{\nu k}{c}) d$$

On montre alors que la matrice des interspectres S des signaux issus des m capteurs est la somme de n matrices hermitiennes non nulles S_j qui ont pour éléments $S_{pqj} = E(\hat{\sigma}_{pj} \cdot \hat{\sigma}_{qj}^*)$

où

- . E représente l'espérance mathématique.
- . σ_{pj} est la valeur prise par $\sigma_p(\nu, \vec{x}, \omega)$ si la source j est seule.
- . $\hat{\sigma}_{pj}^*$ est le conjugué de σ_{pj} .

Si les n sources sont décorréélées deux à deux $n \ll m$, on montre que la matrice d'interspectre possède alors n valeurs propres et n vecteurs propres associés.

Ainsi, dans la détection, si aucune source intéressante n'est présente, le signal reçu par le réseau est constitué par le bruit et on trouve une ou plusieurs valeurs propres dont le niveau caractérise la puissance de bruit. L'existence de une ou plusieurs sources utiles est révélée si une ou plusieurs valeurs propres dépassent ce seuil. Le nombre de sources que l'on peut séparer est au plus égal au nombre de capteurs.

L'estimation pratique des matrices d'interspectres se fait sur une durée d'observation finie du signal. Le choix du temps convenable T résulte du compromis que l'on doit établir entre un temps suffisamment long pour que les valeurs ω_j dans l'espace de probabilité P_j ait été parcouru un assez grand nombre de fois pour une estimation convenable des espérances et un temps suffisamment court pour qu'on puisse estimer que les caractéristiques des sources (nature, position, vitesse...) n'ont pas évoluées.

Dans la phase expérimentale de cette étude on s'est efforcé de fixer les limites d'application de la méthode dans le cas de la détection passive sous-marine.

III. PHASE EXPERIMENTALE

III.1. Identification des signaux

L'expérimentation a été effectuée à partir d'un réseau composé de 10 capteurs alignés constituant une base de 45 mètres. Les signaux issus des capteurs ont été numérisés sur 11 bits et stockés sur bande magnétique. L'échantillonnage a été effectué avec une fréquence de 8kHz.

Une étude préliminaire a été nécessaire pour identifier les signaux. On a procédé dans un premier temps à une analyse spectrale afin de limiter convenablement la bande à traiter.

La bande de fréquence maximum 0 - 4kHz, compatible avec le théorème d'échantillonnage bien connu, a été dans un premier temps analysée avec une transformée de Fourier numérique de 4096 pts donnant ainsi une résolution de 2Hz. Les résultats ont fait apparaître avec la sensibilité disponible que :

- les composantes significatives du spectre s'étendent jusqu'à 150Hz environ.
- Il apparaît des composantes basses fréquences qui forment un continuum jusqu'à une trentaine de hertz.
- Il existe des raies parasites du secteur, harmoniques impaires de 50Hz jusqu'à l'harmonique 9.

Il a donc été décidé de réduire la bande de fréquence analysée. Dans un premier temps on a affiné l'analyse dans la bande 0 - 500Hz.

L'analyse spectrale a été appliquée aux enregistrements contenant des signaux utiles et n'en contenant pas.

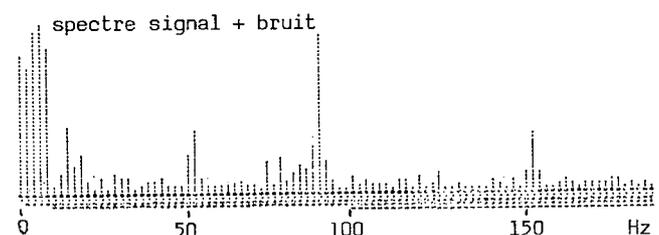
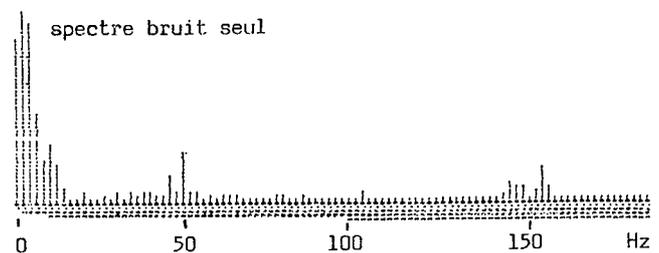


Figure 1 : Spectre des signaux reçus.

Echelle verticale normalisée.

La figure 1 est un exemple des résultats qui ont mis en évidence l'apparition de raies spectrales dues aux

METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LA RECHERCHE DES
MATRICES D'INTER-SPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

cibles utiles. Dans les enregistrements contenant des cibles on voit apparaître un spectre important centré vers 90Hz et deux spectres de moindre intensité dans les bandes 14 - 25Hz et 110 - 130Hz. On note également un continuum en deçà de 12Hz qui est un spectre de bruit et les composantes harmoniques du secteur à 50Hz et 150Hz.

On a finalement adopté, pour le traitement, la bande 0 - 200Hz avec une fréquence d'échantillonnage de 400Hz. Le spectre significatif étant situé en deçà de 150Hz, les règles d'échantillonnage sont respectées. Les composantes harmoniques du secteur se trouvent sous échantillonnées et donc rejetées dans l'intervalle 0 - 200Hz. Une étude élémentaire montre qu'elles se placent aux fréquences 0, 50, 100 et 150Hz qui n'ont donc pas été prises en compte dans la suite du traitement.

III.3. Traitement des signaux

Le traitement des signaux a été effectué en calculant, pour les fréquences ν significatives, les valeurs propres des matrices hermitiennes d'interspectres sur des blocs de données successifs de durée T_B séparés par des temps T_D pris comme paramètres.

- Si $T_D = T_B$ les blocs successifs sont contigus
- Si $T_D > T_B$ les blocs successifs sont disjoints
- Si $T_D < T_B$ les blocs successifs se chevauchent.

Une première étude a conduit à fixer deux types de paramètres :

- les bandes de fréquence à analyser.
- La valeur du paramètre T_D .

Le premier calcul, le calcul des spectres des signaux issus de chaque capteur, a été effectué avec les paramètres suivants :

- fréquence d'échantillonnage : 400Hz.
- Transformée de Fourier numérique : 1024 points.
- Résolution spectrale : 0,390625Hz.
- Longueur des blocs traités 2,56s.

La première étude a conduit à prendre :

- $T_D = 0,56s$ qui assure un recouvrement aux 4/5 de deux blocs consécutifs et un échantillonnage correct de l'évolution des valeurs propres.
- Les bandes de fréquence (14-33Hz), (82-96Hz) et (105-130Hz) qui ont été détectées sur les enregistrements comme fréquences significatives et qui correspondent aux bruits d'hélices attendus pour les cibles tests.

A partir des spectres des signaux issus de chaque capteur on a pu former les matrices hermitiennes d'interspectres et suivre les évolutions des valeurs propres. On a retenu pour chaque fréquence ν la valeur propre maximale et on a tracé les évolutions de ces valeurs à l'aide d'histogrammes dont la figure 2 donne un exemple sur 4 blocs consécutifs.

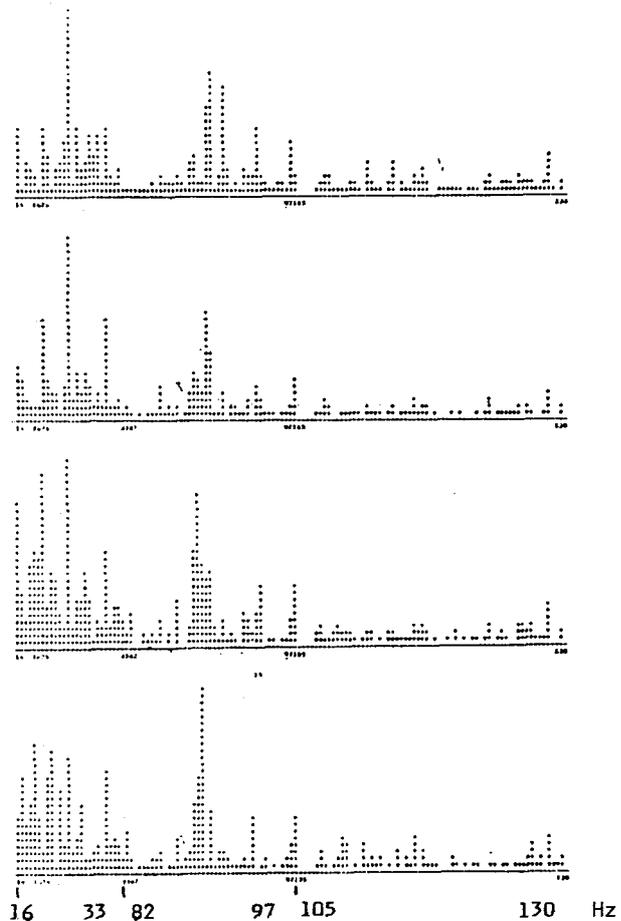


Figure 2 : Histogramme des valeurs propres maximales de blocs successifs.
Echelle verticale normalisée.

En comparant les différentes valeurs propres obtenues pour chaque fréquence, il apparaît que la bande (14-33Hz) est la plus perturbée par le bruit alors que la bande (82-97Hz) l'est relativement peu. Il apparaît une déformation progressive des histogrammes due notamment aux fluctuations des raies de la source qui contiennent l'énergie. Ce fait est particulièrement visible dans la bande (82-97Hz) pour laquelle on peut constater d'un bloc à l'autre, sur l'exemple de la figure 2, des reports d'énergie d'une raie aux raies adjacentes.

Sur l'ensemble des enregistrements on constate que pour cette cible les variations de fréquence varient sur la plage (82-95Hz). Pour les signatures dans la



METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LE RECHERCHE DES
MATRICES D'INTERSPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

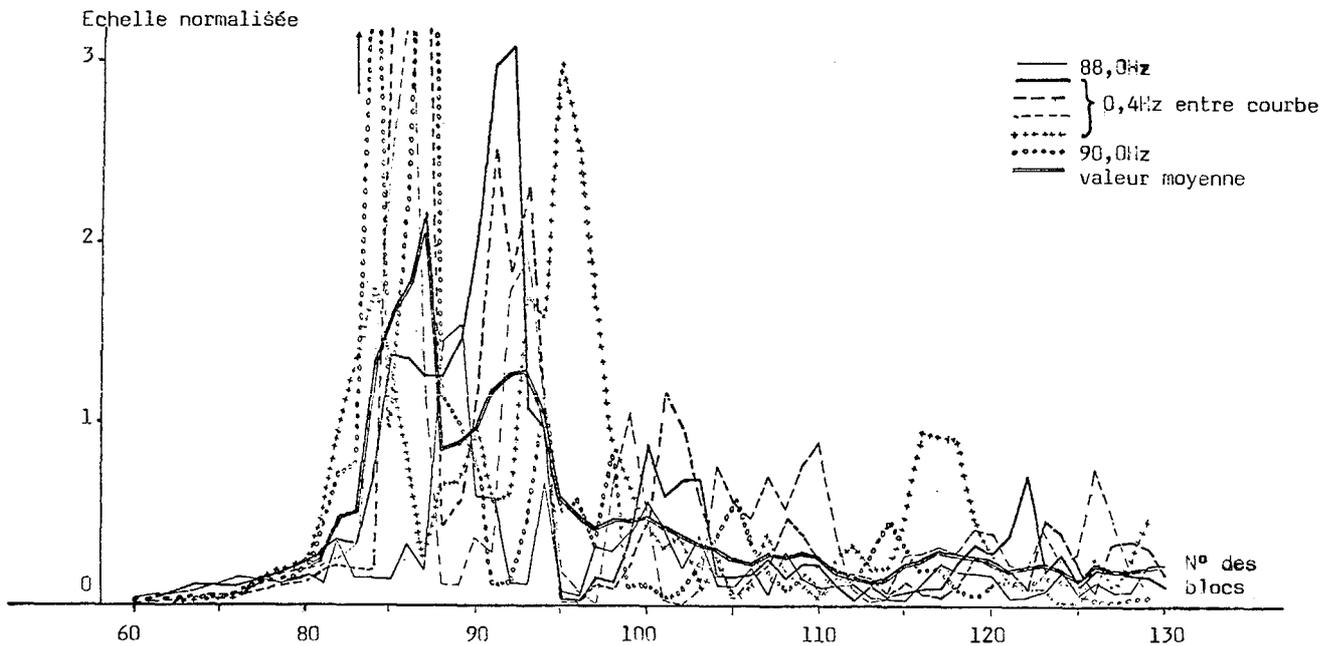


Figure 3 : Evolution des valeurs propres maximales.

bande (14-33Hz) on note des fluctuations moins importantes, ce qui semble en bon accord avec le fait que la cible est constituée par un bâtiment plus important.

Une deuxième cause possible des fluctuations peut venir de phénomènes d'interférence dus aux trajets multiples dont les effets risquent d'être accentués par la présence de hauts fonds marins.

Pour étudier la stationarité des valeurs propres on a tracé les variations des valeurs propres maximales pour les fréquences étudiées. La figure 3 donne un exemple des variations observées pour des fréquences de la bande (82-97Hz). Les fluctuations de fréquences dues aux glissements y sont très visibles. On a tracé la valeur moyenne sur les 6 composantes représentées. Cette valeur moyenne donne une mesure de l'énergie dans la bande (88-90Hz), donc une mesure de la valeur propre de la matrice d'interspectre pour une fréquence $y = 89$ Hz si l'on choisissait une définition de 2Hz. On constate que les fluctuations sont beaucoup plus faibles.

Une estimation faite sur l'ensemble des résultats montre que la stationarité des valeurs propres mesurées est suffisante pour se prêter au traitement sur des intervalles de temps pouvant atteindre plusieurs centaines de millisecondes. Cependant, ce

résultat est fonction de la définition même de l'échantillonnage du spectre des signaux. Un compromis doit alors être défini entre la stationarité admise et la résolution dont dépend la puissance de bruit pour chaque fréquence y analysée.

IV. CONCLUSION

La détection passive sous-marine par la recherche des valeurs propres et des vecteurs propres des matrices hermitiennes d'interspectres constitue une voie d'exploration intéressante.

La méthode est attrayante sur le plan théorique mais la phase expérimentale a révélé des difficultés auxquelles on peut apporter des solutions qu'il convient d'étudier soigneusement pour aboutir à un système opérationnel.

La première difficulté vient de la grande diversité des cibles et de leur non stationarité. La solution doit passer par l'étude du compromis à choisir entre la résolution adoptée pour la transformée de Fourier numérique - ou pour tout traitement équivalent - et la protection qu'on désire sur le bruit et/ou les probabilités de détection et de fausse alarme souhaitées. La seconde difficulté est liée à la réalisation de la machine de traitement. Le nombre de capteurs m limite le nombre de sources décorrélatées discernables et il

METHODE DE DETECTION PASSIVE SOUS-MARINE PAR LA RECHERCHE DES
MATRICES D'INTERSPECTRES DES SIGNAUX ISSUS D'UN RESEAU DE CAPTEURS FINI

est intéressant d'en augmenter le nombre pour accroître la puissance du système et dans une certaine mesure se protéger du bruit. La machine doit calculer les valeurs propres des matrices d'interspectre de dimension $m \times m$. Pour chaque bloc de traitement le calcul doit être fait sur les N fréquences d'échantillonnage du spectre. Ainsi dans l'hypothèse d'un réseau de 50 capteurs, d'un échantillonnage du spectre 0 - 200Hz avec une résolution de 1Hz le calculateur doit donc rechercher les valeurs propres et les vecteurs propres de 200 matrices hermitiennes de dimension 50 x 50 par bloc traité. Le calcul doit être fait sur le temps de rafraîchissement des données dont on a signalé qu'il devrait être de l'ordre de 100ms. Ces résultats montrent que la solution ne peut venir que par un calculateur spécialisé. Ces problèmes devraient recevoir leur solution.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) M. BOUIX
Principes de la détection passive
Revue du CETHEDC n° 55 - 2ème trimestre 1978

