

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 20 MAI 1983

ANALYSE SPECTRALE OPTIQUE MULTICANAUX.

APPLICATION AU SONAR PASSIF

Guy LEBRETON

GESSY Université de TOULON 83130 LA GARDE FRANCE

## RESUME

En vue d'une application en Sonar Passif, on étudie les possibilités offertes en Analyse Spectrale par le Traitement Optique utilisant un imageur cohérent à balayage de type Télévision.

Une première expérimentation, avec des signaux simulés et réels, effectue la Transformation de Fourier unidimensionnelle multicanaux des N lignes de l'imageur correspondant à N tranches temporelles successives du signal, soit 300 lignes de BT 340. Une comparaison avec l'analyse numérique par FFT montre une qualité au moins égale des résultats.

L'analyse théorique de la "fonction de balayage" de l'imageur montre que celui-ci peut être décrit comme une ligne à retards multiples, à partir de laquelle le filtrage transverse optique produit une véritable représentation temps-fréquence.

Pour accroître la résolution fréquentielle en Transformation de Fourier unidimensionnelle, un multiplexage de l'image d'entrée est réalisé par holographie, permettant de tripler le produit durée-bande traité sur chaque canal.

Les résultats expérimentaux sont comparés avec ceux d'une Transformation de Fourier optique bidimensionnelle, dont on montre que la détectivité est meilleure si la durée de stationnarité des signaux est supérieure au produit de la durée d'une ligne par la racine carrée du nombre de lignes du balayage.

Enfin, à partir de l'analyse théorique de la fonction de balayage de l'imageur, on décrit la réalisation d'un nouveau type de processeur optique permettant l'obtention en temps réel de Fonctions d'Ambiguïté ou de Distributions de Wigner propres ou croisées avec un produit BT supérieur à  $10^5$ .

## SUMMARY

For Passive Sonar applications, the capability is investigated of an optical spectrum analysis using coherent light-valves with TV-raster scanned signals.

First experiments are performed with a one-dimension optical Fourier transform on 300 lines having time-bandwidth products of 340, yielding good results as compared to the FFT performed on the same simulated or real Passive Sonar signals.

From a theoretical analysis of the raster-scanning, the light-valve is shown to operate as a multipath delay line, allowing the optical transverse filtering to perform a true time-frequency representation of the signal.

An optical multiplexing of the input image is then performed by holographic filtering, yielding for the 1-D Fourier transform a resolution extended to three times or more the time-bandwidth capability of the raster lines on the light-valve.

The results are also compared with a 2-D optical Fourier transform, that is shown more efficient for signals with a time stationnarity exceeding the product between the line duration and the square-root of the number of lines on the input image.

Endly, from the theoretical analysis of the raster scanning on the light-valve, a new optical processing is derived, yielding self- or crossed- Ambiguity functions and Wigner distributions in real time with a time-bandwidth product over  $10^5$ .



### Introduction

L'analyse spectrale de signaux en Sonar Passif, même en utilisant des systèmes câblés pour effectuer la transformation de Fourier rapide (FFT) ou son module, représente un volume important de calcul en temps réel, en raison du débit élevé des données fournies par les antennes-réseaux modernes. En outre, c'est en fonction des possibilités du traitement numérique qu'on limite en pratique le nombre et la cadence des échantillons sur lesquels sont effectuées ces FFT. Pour la même raison, ce nombre est choisi constant quelle que soit la stationnarité des signaux utilisés.

L'étude présente examine certaines possibilités d'utilisation d'un traitement optique en amont du traitement informatique, pour lui fournir directement en temps réel la distribution spectrale énergétique des signaux reçus. On a choisi, parmi les diverses techniques optiques permettant d'effectuer une transformation de Fourier, celle qui paraît la mieux adaptée aux basses fréquences et à la longue durée d'analyse des signaux traités en Sonar Passif: la transformation de Fourier optique cohérente à partir d'un imageur bidimensionnel à balayage de type Télévision.

Après une analyse de la transformation effectuée sur le signal temporel, introduit dans le processeur optique sous forme d'une image bidimensionnelle, trois types de traitement font l'objet d'une étude comparative théorique et expérimentale: transformation de Fourier unidimensionnelle multicanaux (TF 1-D); transformation de Fourier bidimensionnelle du signal visualisé par balayage (TF 2-D); TF 1-D à résolution fréquentielle accrue par une anamorphose optique de l'image (périodisation holographique). Enfin, on décrira les principes d'une nouvelle technique de traitement optique bidimensionnel permettant d'envisager soit une analyse temps-fréquence à haute résolution (représentation de Wigner) pour des signaux de stationnarité variable, soit une corrélation interférométrique pour mesurer les paramètres retard et doppler entre des signaux reçus par deux capteurs éloignés.

#### 1. Imagerie cohérente de signaux temporels par balayage TV et Filtrage transverse optique.

Pour effectuer des traitements optiques spatiaux sur un signal temporel à très grand produit durée-bande, il est nécessaire de transformer ce signal en image à deux dimensions par un balayage de type Télévision. Dans le cas où l'on effectue ensuite un filtrage adapté de cette image par holographie, on réalise par la même opération la déconvolution de cette transformation temps-espace dont on peut alors négliger l'influence sur le signal (Réf.1). C'est dans ce cas particulier que nous avons pu antérieurement présenter la transformation effectuée par le balayage comme un simple codage spatial à deux dimensions du signal temporel (Réf.2). S'agissant ici d'analyse spectrale, nous sommes conduits à une analyse plus complète de ce type d'image.

Les N lignes de balayage peuvent être considérées comme une batterie de N lignes à retard, permettant au processeur optique d'effectuer un filtrage transverse des signaux ainsi retardés.

Horizontalement, le long d'une ligne de balayage, on a simplement une projection du signal temporel  $s(t)$  sur l'espace Euclidien:

$$s(x,y) = s(vt) * \text{Rect}\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{a}\right) \quad (1)$$

où la vitesse de balayage  $v$  représente l'échelle de projection, et la fonction Rectangle de largeur  $a$  est une expression simplifiée de la dimension du point d'

écriture sur l'imageur que nous appellerons "fonction point". Si  $S(f)$  représente la transformée de Fourier (TF) du signal temporel, celle du signal spatial, résultant de la propriété d'homothétie de la TF, est:

$$S(f_x) = \frac{1}{v} S\left(\frac{f}{v}\right) \quad (2)$$

On introduit ainsi la notion de fréquence spatiale  $f_x$ , qui a la dimension inverse d'une longueur. La TF optique cohérente, réalisée en ramenant dans le plan focal d'une lentille convergente la diffraction à l'infini, sera codée par la focale  $F$  de la lentille et la longueur d'onde optique  $\lambda$ , donnant le spectre

$$S(u) = S(\lambda F f_x) = S\left(\frac{\lambda F}{v} f\right) \quad (3)$$

où le paramètre  $u$ , bien qu'ayant la dimension d'une longueur, est directement proportionnel à la fréquence  $f$  du signal temporel. La photodétection (quadratique) en donnera en sortie le module carré, c'est à dire le spectre de puissance du signal analysé.

Verticalement, le phénomène est plus complexe, en raison des retours à l'origine du balayage horizontal qui ramènent synchrones les fenêtres temporelles successives correspondant à chaque ligne. Le signal écrit sur la ligne  $n$  est ainsi le signal temporel retardé de  $n\tau$  pour une fréquence de balayage horizontal  $f_h$  égale à  $1/\tau$ . Si l'on fait dans un premier temps abstraction du produit de la fonction Rectangle qui limite la surface de l'imageur, on obtient donc la somme de  $N$  copies retardées du signal. Ces copies, au lieu d'être superposées dans un espace à une dimension, sont spatialement séparées dans la deuxième dimension  $y$ . Pourtant, il s'agit bien d'une somme et non d'un vecteur à  $N$  composantes, car la TF optique bidimensionnelle a comme résultat la somme cohérente des TF des  $N$  lignes. Cette remarque est fondamentale pour la suite de l'analyse.

A partir du signal spatial unidimensionnel (1), l'image complète s'écrit:

$$g(x,y) = \text{Rect}\frac{x}{L} * \left\{ s(x,y) * \sum_{n=0}^{N-1} \delta(x+nL, y-n\ell) \right\} \quad (4)$$

où  $L$  est la longueur des lignes de balayage et  $\ell$  leur espacement vertical, et la fonction Rectangle est égale à 1 dans l'intervalle  $(0,L)$ , nulle à l'extérieur. Ce signal peut s'exprimer directement en fonction des variables temps  $(t)$  et retard  $(t')$ :

$$g(x,y) = \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}, \frac{t'}{N\tau}\right) * \left\{ \text{Rect}\left(\frac{t}{\tau}, \frac{t'}{\tau}\right) * s[v(t+t')] \right\} * \prod_{\tau} (t') * \delta\left(t - \frac{x}{v}\right) * \delta\left(y - \frac{\ell}{\tau} t'\right) \quad (5)$$

où l'on a exprimé le nombre fini de lignes  $N$  par le produit d'une fonction peigne de pas  $\tau$  sur la variable  $t'$  avec une fonction Rectangle nulle pour  $t'$  extérieur à l'intervalle  $(0, N\tau)$ , et la "fonction point" est devenue une résolution temporelle  $dt$ . Cette expression (5) implique l'ensemble des relations spatio-temporelles suivantes:

$$\begin{aligned} x &= vt & ; & & y &= \frac{\ell}{\tau} vt' = \ell \frac{t'}{\tau} \\ a &= v \cdot dt & ; & & f_x &= \frac{f}{v} & ; & & f_y &= \frac{\tau}{\ell} f = \lambda^{-1} \frac{f}{F_h} \\ f_x x &= ft & ; & & f_y y &= ft' \end{aligned} \quad (6)$$

#### 2. Transformation de Fourier unidimensionnelle et représentation temps-fréquence

En associant une lentille sphérique avec une lentille cylindrique de génératrice parallèle aux lignes du balayage, on peut effectuer optiquement une transformation de Fourier horizontale sur la variable  $x$  (donc  $t$ ) et une imagerie verticale selon  $y$  (donc  $t'$ ). Dans l'écriture de cette transformation on peut, d'après (5), remplacer l'élément d'intégration spatial

dx par  $v \cdot dt$ . En utilisant les relations (6) et en négligeant la fonction point, on obtient:

$$G(f_x, y) = \delta(f_x - \frac{f}{v}) \cdot \delta(y - \frac{h}{v} t') \cdot \text{Rect} \frac{t'}{N\tau} \cdot \prod_{\tau} \tau(t') \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \text{Rect}(\frac{t}{\tau}) s(v[t+t']) e^{i2\pi ft} dt \quad (7)$$

Le produit par la fonction peigne équivaut à une intégration sur la variable  $t'$  échantillonnée au pas  $\tau$ . La relation (7) exprime donc une véritable représentation temps-fréquence, avec une résolution temporelle  $\tau$  et fréquentielle  $1/\tau$ . La détection quadratique donne en effet une représentation conjointe énergétique, résultant de la double convolution sur les variables temps et fréquence des fonctions d'Ambiguïté de type Wigner-Ville du signal  $s(t)$  et d'une fonction rectangle de largeur  $\tau$ , selon le théorème (Réf.3):

$$|\int H(t-u) Z(u) e^{i2\pi v(t-u)} du|^2 \iff \chi_H^*(\theta, \phi) \cdot \chi_H^*(\theta, \phi) \quad (8)$$

La relation (7) prend la forme (8) en remplaçant la variable muette d'intégration  $t$  par  $u$  égal à  $(t+t')$ .

Une autre réalisation optique de représentation temps-fréquence du type (8) a déjà été proposée pour l'obtention de sonagrammes (Réf.4). Elle utilisait un signal spatialement modulé selon  $x$  et verticalement élargi à toute l'image selon  $y$ , multiplié par une fenêtre gaussienne  $g(y-x / \Delta x)$ , suivi d'une TF 1-D en  $x$  avec imagerie en  $y$ . Par rapport à un tel dispositif, l'avantage de la présente "ligne à retards multiples" réalisée par le balayage TV est de permettre le même résultat en introduisant un signal  $N$  fois plus long sur l'imageur.

Les Fig.1 à 6 montrent une comparaison entre la représentation ainsi obtenue, par imageur à balayage et TF 1-D, et la représentation graphique en lignes parallèles des spectres de puissance calculés par FFT numérique avec des fenêtres temporelles successives de largeur  $\tau$  correspondant aux lignes du balayage optique. Les trois signaux utilisés ont une durée de 320 s. correspondant à 300 lignes ( $\tau=1,067$  s.). Le signal 1 est un peigne d'impulsions de fréquence 20 Hz, avec un bruit additif. Le signal 2 est formé de deux modulations de fréquence sinusoïdales en opposition de phase de bandes respectives 379-399 et 507-527 Hz, avec une période de modulation de 29,55s., additionnées d'un bruit blanc. Le signal 3 est l'enregistrement Sonar d'un bruit acoustique sous-marin filtré passe-bande entre 320 et 640 Hz.

Ayant ainsi montré la capacité de l'optique à fournir un résultat de qualité au moins égale à celui obtenu par traitement numérique, nous allons maintenant rechercher les possibilités spécifiques du filtrage optique transverse ainsi introduit, pour accroître la résolution et la détectivité, en particulier dans le cas typique en Sonar de signaux de stationnarité variable.

3. Transformation de Fourier bidimensionnelle du signal visualisé par balayage TV

A parti de la représentation temps-fréquence (7), une seconde transformation de Fourier sur la variable  $y$  produit une représentation bidimensionnelle de la fréquence. Horizontalement, nous avons déjà le spectre du signal codé en  $f/v$  avec une résolution  $1/\tau$  égale à la fréquence de balayage  $f_h$ . La TF verticale sur  $t'$  à  $t$  constant, portant sur le signal temporel échantillonné au pas  $\tau$  pendant une durée  $N\tau$ , produit aussi une représentation du spectre du signal, périodisée au pas  $f_h$ , avec une résolution  $1/N\tau = f_h/N$ . En limitant verticalement la pupille à  $\pm 1/2\lambda$  dans le plan de la TF 2-D (obtenue bien sûr directement par une seule lentille sphérique), le rôle de la périodisation verticale sera simplement de ramener dans la pupille une valeur fine

modulo  $f_h$ . Ainsi, un signal de fréquence pure  $f$  égale à  $(p+\epsilon)f_h$  se traduira dans le plan spectral par les coordonnées:  $f_x = (p+\epsilon) f_h$  ;  $f_y = \epsilon f_h$ ,  $\epsilon \leq 0,5$   
 $= (1-\epsilon)f_h, \epsilon > 0,5$

La Figure 7 montre le spectre de puissance ainsi obtenu par TF 2-D du signal 1 (peigne) qui permet, grâce à la résolution verticale de  $3.10^{-3}$ Hz ( $1/N\tau$ ), de mesurer la largeur des raies (environ 0,05 Hz). La présentation tridimensionnelle est réalisée par un traitement analogique électronique du signal Vidéo. Comme le montre la comparaison des Fig.4 et 7, chaque raie fréquentielle de durée  $T$  est étalée verticalement sur une même durée par la TF 1-D, alors qu'elle est concentrée en un point par la TF 2-D. Le gain en détectivité apporté par la TF 2-D dépend donc de la stationnarité du signal. En prenant l'hypothèse d'un bruit blanc additif et d'une raie fine de durée  $T'$ , tous deux à puissance constante, on vérifie aisément que le gain en rapport signal/bruit (qui est ici la puissance par unité de surface) est défini par

$$g_i = A_{OS} / A_{OB} \cdot A_{IB} / A_{IS}$$

en notant  $A_{OS}$  et  $A_{OB}$  les surfaces occupées par le signal et le bruit, et avec l'indice  $I$  au lieu de  $O$  celles de leur TF spatiale à  $I$  dimensions. On obtient ainsi les gains respectifs:

$$g_{1-D} = \frac{B}{F_h} = B\tau \quad ; \quad g_{2-D} = B \frac{T'^2}{N\tau}$$

Le choix de la TF 2-D apportera donc un gain en détectivité si la durée  $T'$  de stationnarité du signal est supérieure à  $\tau/\sqrt{N}$ . Cette condition correspond par exemple à 18,5s. de signal effectif sur une durée d'analyse de 320 s., soit une présence pendant 6% du temps, en prenant les paramètres que nous avons utilisés pour l'expérimentation. La Figure 11 montre le spectre obtenu par TF 2-D du signal 3 (bruit sous-marin), que l'on peut comparer aux Fig.3 et 6 pour juger du gain par rapport à la FFT numérique et à la TF 1-D optique (présentée aussi en relief Fig.12 et 13).

Il faut toutefois signaler, comme nous l'avons analysé dans une précédente étude (Réf.5), que cette TF 2-D peut provoquer des interférences parasites au niveau du spectre de puissance dans le cas où il existe une cohérence partielle entre les tranches temporelles de signal retardées par le balayage. Rarement gênants en Sonar Passif, où l'on traite des bruits à corrélation microscopique ou des raies fréquentielles très fines, ce phénomène peut être éliminé en effectuant une détection complexe du spectre (amplitude et phase). Ceci est possible en utilisant les techniques optiques classiques de détection hétérodyne spatiale ou temporelle.

4. Accroissement de la résolution fréquentielle en TF 1-D par triplage holographique de l'image d'entrée

La géométrie des dispositifs d'imagerie cohérente à balayage permet typiquement l'écriture d'environ 400 lignes de signal avec un BT de 300 à 400 par ligne. Ceci convient mal à l'analyse spectrale par TF 1-D en Sonar Passif, où la résolution fréquentielle cherchée conduit habituellement à réaliser les FFT sur 1024 échantillons. C'est ce problème que permet de résoudre un multiplexage optique de l'image d'entrée, dont nous allons maintenant décrire le principe et présenter un exemple de réalisation par triplage holographique d'image. La périodisation d'images peut être réalisée optiquement de deux façons. La première méthode consiste à effectuer la TF 2-D de l'image et à interposer dans le plan correspondant un réseau optique (peigne 1-D ou 2-D) de pas  $p$  assez fin pour échantillonner correctement le spectre spatial; une nouvelle TF 2-D donne une image périodisée au pas  $\lambda F/p$  (Réf.6). Le second procédé consiste à remplacer le réseau précédent par un



hologramme où l'on enregistre la TF de N points; la deuxième TF donne ainsi la convolution entre l'image et les N points choisis d'espacement approprié à sa dimension (Réf.7). C'est ce deuxième procédé qui a été retenu pour une première expérimentation, car il suffisait dans notre cas de tripler la longueur des lignes.

Le principe du traitement recherché est de reproduire en p exemplaires l'image d'entrée, de largeur L et interligne  $\lambda$ , pour obtenir N lignes de longueur pL correspondant à des fenêtres temporelles continues de durée  $p\tau$  décalées au pas de  $\tau$ . On améliore ainsi par un facteur p la résolution fréquentielle en TF 1-D. La convolution effectuée s'écrit, d'après (4) :

$$g(x,y) = \sum_{-p/2}^{p/2} \text{Rect} \frac{x-rL}{L} \left\{ s(x,y) *_{\tau} \delta(x+nL-rL, y-n\lambda+r\lambda) \right\} \\ = \text{Rect} \frac{x}{3L} \sum_{q=-p}^{N+p} s(x+qL) \text{Rect} \frac{y-q\lambda}{a} \quad (9)$$

La redondance due au recouvrement des fenêtres temporelles peut être éliminée en détectant seulement une ligne sur p dans le plan de la TF 1-D. Par exemple, dans le cas  $p=3$  qui a été expérimenté, on détectera en sortie le module carré de :

$$G\left(\frac{f}{V}, y\right) = \sum_{q=0}^{N/3-3} \text{Rect} \frac{y-(1+3q)\lambda}{a} \int \text{Rect} \frac{t}{3\tau} s(t+|1+3q\tau|) dt \quad (10)$$

avec la résolution fréquentielle cherchée  $1/3\tau$ . Le hologramme a été enregistré en réalisant physiquement non les trois points-sources, mais leur TF se propageant en sens inverse, soit trois ondes planes inclinées convergeant sur le hologramme et focalisant par TF dans le plan de l'image. On a ainsi pu ajuster les positions par rapport à l'image elle-même. Sur la Figure 8, qui présente le montage d'expérimentation, un écran interposé visualise ces trois faisceaux. Une étude complète des problèmes optiques posés par cette réalisation a été récemment publiée (Réf.8). La Fig.9, vue partielle très agrandie de l'image triplée du signal 1, montre (malgré les défauts basse fréquence de l'imagerie cohérente, filtrés en TF) que les images juxtaposées sont de résolution et intensité sensiblement égales. La superposition apparente due à une pupille d'éclairement trop grande est sans influence sur la TF (focalisation sur la fréquence 0).

Les Figures 11 à 14 permettent une comparaison qualitative des résultats obtenus pour le signal 3 (bruit sous-marin) par les trois traitements optiques: TF 2-D et TF 1-D sans ou avec triplage de l'image. Pour une comparaison quantitative avec la FFT, un dispositif de détection est en cours de réalisation avec une barrette de photodiodes translatée par moteur pas à pas et reliée à une chaîne d'acquisition numérique. Ceci permettra également de conserver la dynamique du traitement optique, actuellement limitée par la caméra Vidéo utilisée en sortie.

##### 5. Fonction d'Ambiguïté et Représentation de Wigner propres ou croisées par filtrage holographique.

Des chercheurs du Naval Research Laboratory ont récemment montré l'intérêt, en Sonar Passif, de la Fonction d'Ambiguïté et de la Représentation de Wigner propres ou croisées (Réf.9). En particulier, l'une étant la TF 2-D de l'autre, l'une réalise une bonne compression d'information (donc un gain en détectivité) quand la surface de l'autre est large. Ces chercheurs ont proposé l'emploi d'un processeur optique avec introduction du signal par deux cuves acoustooptiques orthogonales, ce qui nécessite une transposition de fréquence à plus de 50 MHz. Un autre dispositif optique (Réf.10) effectue la TF 1-D du produit du signal par

N copies retardées; cette solution, réalisable avec un imageur cohérent, est peu performante (BT d'une seule ligne) et demande un pré-traitement lourd.

Une nouvelle solution beaucoup plus performante (BT de N lignes), que nous envisageons d'expérimenter prochainement, découle directement des propriétés de "ligne à retards multiples" de la fonction de balayage telle que nous l'avons analysée, en effectuant les quatre opérations suivantes:

- Enregistrement holographique instantanément utilisable (sur un cristal de BSO) de la TF 1-D du signal.
- Produit de ce hologramme par la TF 1-D du même signal si l'on veut la Fonction d'Ambiguïté propre, ou d'un autre si l'on veut leur Ambiguïté croisée.
- TF 2-D de ce produit, donnant directement la Fonction d'Ambiguïté continue sur l'axe fréquence (horizontal) et échantillonnée au pas  $\tau$  sur l'axe retard.
- TF 2-D supplémentaire pour obtenir la Représentation de Wigner.

Le produit effectué sur le hologramme s'écrit, d'après (4), après les TF 1-D sur y :

$$s_1^*(x, f_y) \cdot s_2(x, f_y) = \text{Rect} \frac{x}{L} s_1^*(x+nL) s_2(x-pL) e^{i2\pi(p-n)\lambda f_y}$$

D'où par TF 2-D, en remplaçant les variables spatiales par leur équivalent temporel (5,6) :

$$s\left(\frac{f}{V}, y\right) = \delta\left(y - \frac{t}{\tau} \lambda\right) \cdot X_{12}\left(t', \frac{f}{V}\right) \sum_{q=-N}^N \delta(t' - q\tau)$$

qui est bien la Fonction d'Ambiguïté cherchée.

Avec une lame séparatrice on peut sortir simultanément les deux fonctions. On peut aussi obtenir directement la Représentation de Wigner à la place de la Fonction d'Ambiguïté en inversant le sens du balayage horizontal pour le signal 2.

### Conclusion

L'expérimentation a permis de vérifier la qualité de l'analyse spectrale optique. Grâce au multiplexage d'image on a pu également accroître la capacité de traitement à partir des imageurs cohérents en augmentant le BT par canal pour une transformation de Fourier multicanaux. L'analyse de la mise à deux dimensions spatiales d'un signal temporel par balayage type TV a permis de donner sa pleine signification au traitement optique bidimensionnel, et d'élargir son application au traitement temps-fréquence à haute résolution sur un ou deux canaux.

### Références

1. G.LEBRETON, E.DE BAZELAIRE, OPTICAL ENGIN. 19, 5, 1980, p.739-747
2. E.DE BAZELAIRE, G.LEBRETON, C.PLUMEJEAUD, 7e Col1. GRETSI, Nice, 1979, p.79/1à6
3. B.ESCUIDIE, P.FLANDRIN, J.GREA, 7e Col1. GRETSI, Nice, 1979, p.2/1à7
4. H.BARTELT, K.BRENNER, A.LOHMANN, OPTICS COMM. 32, 1, Jan.1980, p.32-38
5. G.LEBRETON, OPTICA ACTA 29, 4, Avril 1982, p.413-418
6. A.KALESTYNSKI, B.SMOLINSKA, OPTICA ACTA 24, 11, Nov.1977, p.1115-1124
7. P.C.MEHTA, OPTICS COMM. 13, 1, Jan.1975, p.40-42
8. G.LEBRETON, Proceedings of the IOCC Conf., Boston, U.S.A., Avril 1983, à paraître, IEEE Editor
9. H.H.SZU, OPTICAL ENGIN. 21, 5, Sept.1982, p.804-813
10. D.CASASSENT, B.VIJAYA KUMAR, APPL.OPTICS 18, 10, Mai 1979, p.1673-1678

Analyse spectrale optique multicanaux. Application au Sonar Passif.

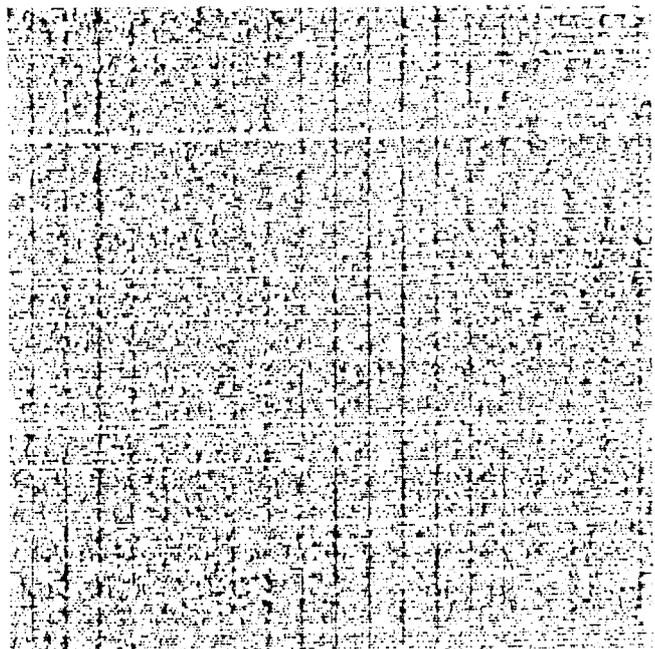


Figure 1 - Analyse spectrale numérique par TFR (FFT) du signal 1 : peigne de raies au pas de 20 Hz avec bruit blanc .

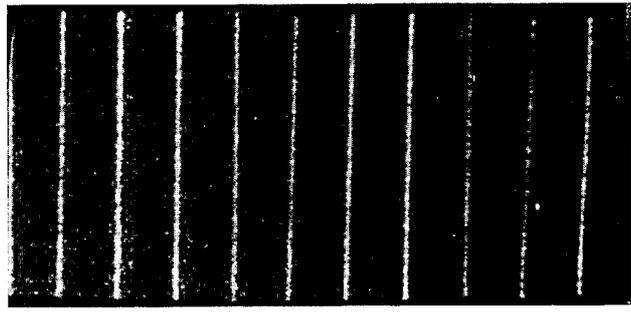


Figure 4 - Transformation de Fourier optique uni-dimensionnelle (TF 1-D) du signal 1 .

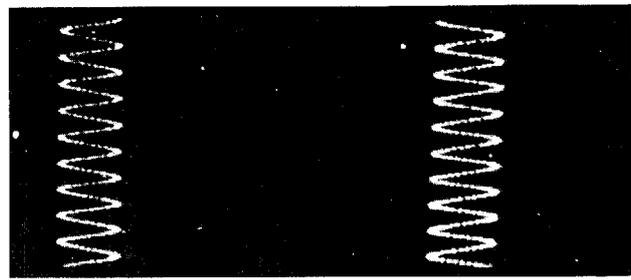


Figure 5 - TF 1-D du signal 2 .

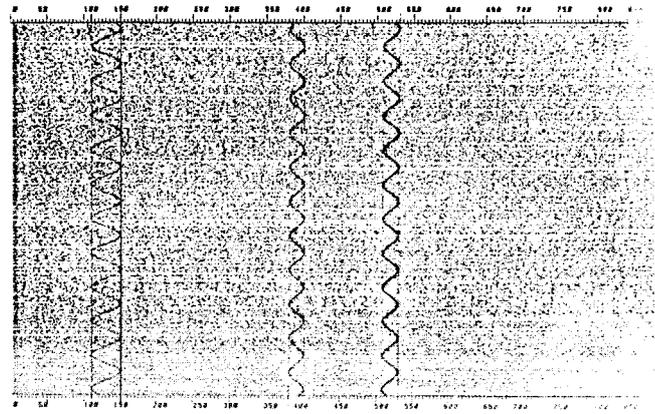


Figure 2 - FFT du signal 2 : bruit + 2 modulations de fréquence sinusoïdales en opposition de phase (période de modulation 30 s.) .

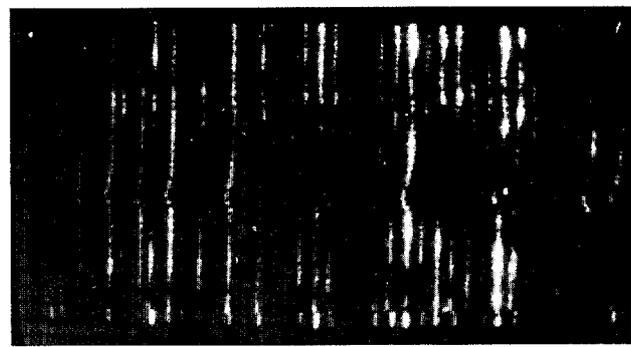


Figure 6 - TF 1-D du signal 3 .

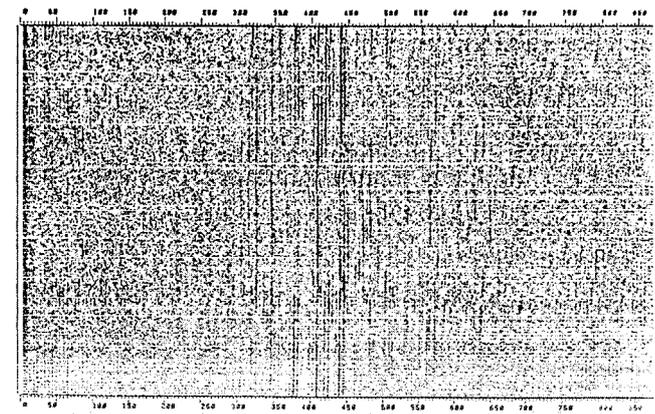


Figure 3 - FFT du signal 3 : bruit réel acoustique .

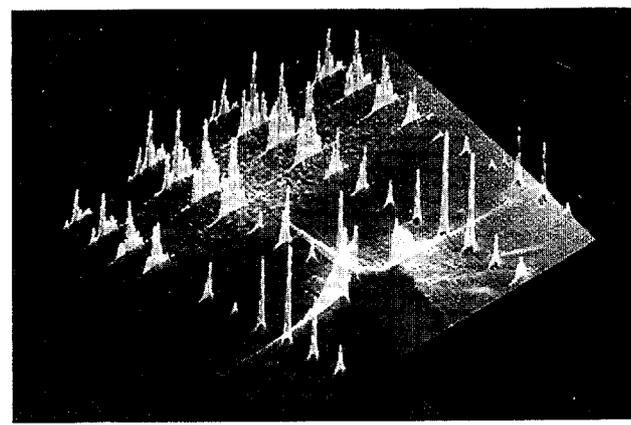


Figure 7 - TF optique bidimensionnelle du signal 1 .

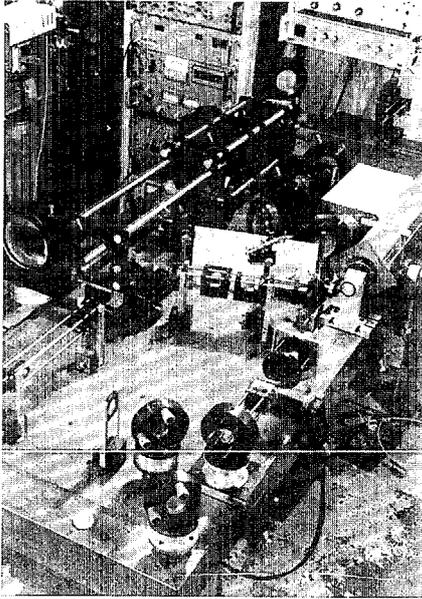


Figure 8 - Montage optique d'expérimentation du triplage d'image par hologramme .

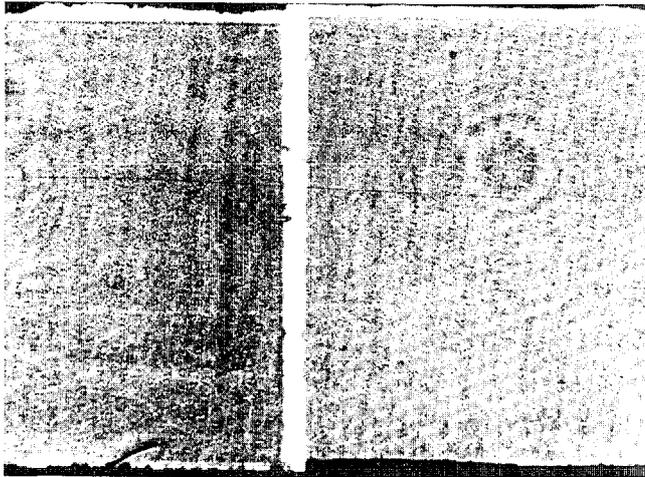


Figure 9 - Vue partielle agrandie de l'image triplée du signal 1 (peigne à 20 Hz bruité) .

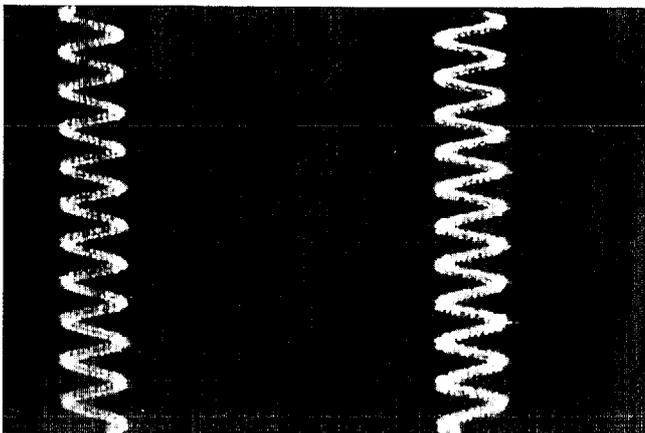


Figure 10 - TF 1-D du signal 2 à partir de son image triplée .

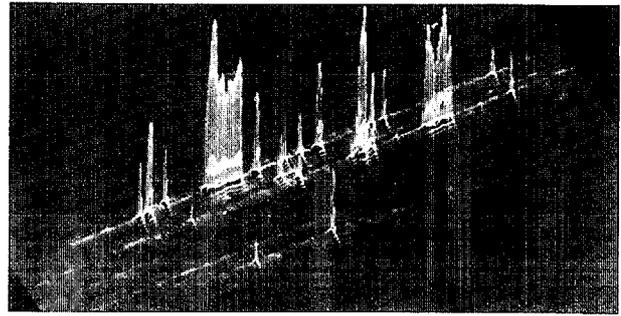


Figure 11 - TF bidimensionnelle du signal 3, bruit acoustique (présentation Vidéo 3-D) .

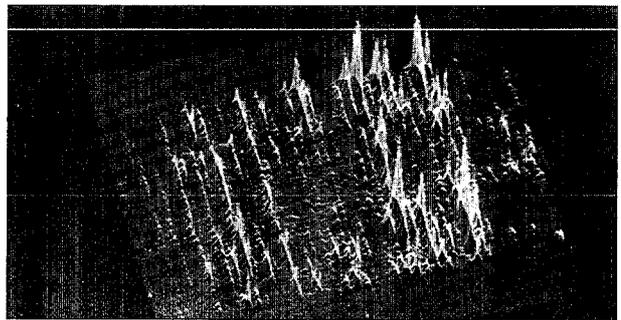


Figure 12 - TF 1-D du signal 3 .

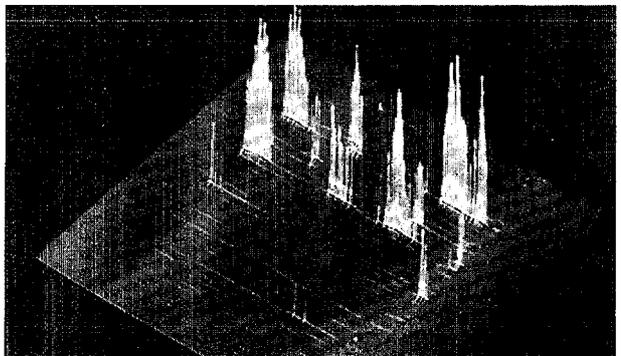


Figure 13 - TF 1-D du signal 3, avec seuil de détection du signal Vidéo .



Figure 14 - Même image que Fig.13, mais à partir d'une image triplée du signal 3 .