

**LUTTE ANTI REVERBERATION EN SONAR ACTIF :  
MISE EN OEUVRE ET COMPARAISON  
DE TECHNIQUES DE NORMALISATION**

**F. Ywanne, F. Martinerie\***

Thomson Sintra Activités Sous-Marines  
1, av. Aristide Briand 94117 Arcueil Cedex

**Résumé :**

Les chaînes classiques de sonar actif sont adaptées à la détection de signaux déterministes de forme supposée connue, dans un bruit gaussien, blanc et stationnaire (au moins localement). Dans des contextes de réverbération dominante, caractérisés par une structure complexe et non stationnaire du bruit, ces mêmes chaînes peuvent conduire à des résultats médiocres et des techniques spécifiques doivent être développées. Nous envisageons dans cet article la mise en oeuvre individuelle ou conjointe de plusieurs techniques contribuant à normaliser la réverbération et comparons les résultats obtenus sur signaux réels FP et FM, enregistrés en mer par petits fonds.

**1. Introduction**

En sonar actif, le traitement classique consiste à effectuer un filtrage adapté avec une copie complexe conjuguée du signal émis, suivi d'une quadrature. Ce traitement est optimal, au sens des courbes C.O.R, lorsque le signal à détecter est d'amplitude déterministe et de phase inconnue, et lorsque le bruit est gaussien, blanc, stationnaire et de puissance connue. Pour obtenir un taux de fausse alarme constant (CFAR), la sortie de traitement est normalisée en utilisant une estimation de la puissance du bruit. Cette estimation est classiquement réalisée au voisinage du point à normaliser, en supposant que le bruit de fond est localement stationnaire (normalisation temporelle) et/ou blanc (normalisation fréquentielle). En pratique, en présence de réverbération dominante, les hypothèses de stationnarité locale et de blancheur ne sont généralement pas respectées, ce qui peut conduire à des dégradations importantes des performances des chaînes de sonar classiques. Dans la littérature récente, différentes approches ont été proposées pour traiter le cas particulier de la réverbération. Nous nous sommes ici intéressés plus particulièrement à deux approches. L'une est basée sur une prise en compte de la spécificité du spectre de la réverbération dans l'étape d'estimation de la puissance du bruit de fond [1]. La seconde repose sur le principe d'un blanchiment préalable du signal, en utilisant une analyse paramétrique [2]. Nous avons adapté les techniques classiques et ces nouvelles techniques, en les couplant éventuellement, et les avons appliquées à des signaux réels enregistrés en mer par très petits fonds afin de tester et comparer leur efficacité. Les signaux traités sont de type fréquence pure (FP) et fréquence modulée (FM). Après une présentation générale des traitements implémentés, nous décrivons dans les cas FP et FM les techniques utilisées et les résultats obtenus.

**Abstract :**

Classic active sonar detection processings address the case of deterministic signals imbedded in white and (at least locally) stationary gaussian noise. In contexts where reverberation is dominant, these processings may lead to degraded results, due to the complex and nonstationary nature of the perturbations. Specific techniques must then be developed. We here consider, jointly or independently, different techniques which contribute to normalize the reverberation. These techniques are tested on FP and FM signals, recorded at sea in shallow water.

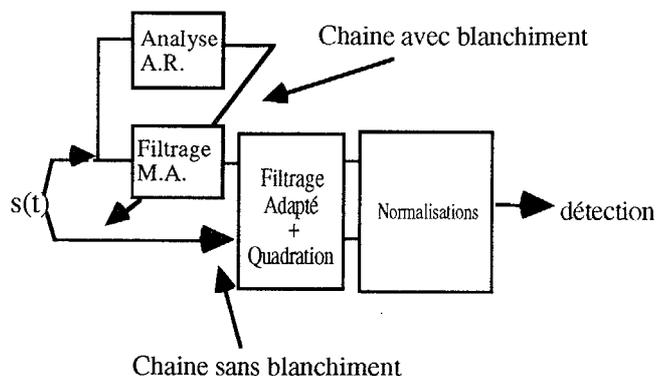
**2. Traitements implémentés**

Dans tous les cas, les signaux ont été démodulés et filtrés passe-bas au préalable. Les traitements implémentés à l'issue de ces pré-traitements s'organisent suivant le synoptique représenté en figure 1.

Le signal à traiter est, en tête de chaîne, découpé en séquences temporelles adaptées à la durée du signal et se recouvrant éventuellement. Une seconde étape de blanchiment est, suivant les cas, considérée ou non : il s'agit d'estimer et de compenser la coloration spectrale de la réverbération seule.

Lorsque qu'il est appliqué, ce blanchiment du signal est réalisé en effectuant une modélisation auto-régressive (AR) du signal sur une séquence représentative du bruit seul aussi proche que possible de la tranche courante, suivie d'un filtrage inverse (MA). Lorsque le signal est de type FM, le filtrage adapté est réalisé avec une copie éventuellement filtrée MA du signal émis, ce point étant discuté plus en détails ultérieurement.

Pour les signaux FP, la normalisation est effectuée dans le domaine temporel et fréquentiel (normalisation "2D"). Dans le cas des signaux FM, la normalisation est uniquement temporelle.



**Figure 1**

\* Nouvelles coordonnées : Altran Technologies, 1 Place Alphonse Jourdain, 31000 Toulouse



### 3. Signaux FP

#### 3.1 Description des techniques utilisées

Dans le cas FP, le traitement consiste en une FFT suivie d'une quadrature, la détection étant ensuite effectuée dans chaque canal fréquentiel. Les tranches d'analyse sont adaptées à la durée du signal et se recouvrent dans notre cas par 4.

Dans les cas où un blanchiment par modélisation AR et filtrage MA a été utilisé, l'ordre du modèle AR a été choisi égal à 15, après analyse du signal, et l'algorithme utilisé est celui de Levinson.

Le filtrage inverse MA d'une tranche donnée est effectué en utilisant les paramètres AR de la première tranche la précédant et n'ayant pas de recouvrement avec elle, afin de ne pas blanchir le signal utile par rapport à lui-même.

Trois types de normalisations ont été comparés :

##### A. Norme "classique 2D"

Si  $y_{kl}$  représente la sortie après FFT + quadrature dans le  $l$ ème canal et pour la  $k$ ème tranche, la sortie normalisée est définie par :

$$T_A(k,l) = \frac{y_{k,l}}{\hat{\mu}(k,l)} \quad (1)$$

L'estimation de la puissance du bruit  $\mu$  est effectuée par un moyennage non pondéré en fréquence puis en temps dans une fenêtre rectangulaire symétrique autour de l'échantillon  $y_{kl}$  à normaliser. Ce moyennage est géométrique (logarithmique) de façon à réduire l'influence des grands échantillons. En outre, un trou temporel de  $2T+1$  échantillons est introduit en raison du recouvrement effectué. Le recouvrement étant de  $N/4$ , on utilise  $T=4$ . En pratique, le choix de la taille des fenêtres résulte d'un compromis entre la qualité de l'estimation et la stationnarité de la puissance du bruit sur la fenêtre.

De par sa structure, cette normalisation repose sur une hypothèse de stationnarité et de blancheur du bruit de fond dans la fenêtre d'estimation.

##### B. Normes 2D fines [1]

Ces techniques se distinguent principalement des normes classiques par le fait que le spectre du bruit peut être coloré et que son niveau absolu peut varier. Elles reposent sur deux hypothèses principales :

- les caractéristiques (temps, fréquence) du bruit sont localement séparables (i.e  $B(t,f)=F(t).G(f)$ ),
- la forme du spectre du bruit est localement stationnaire.

La sortie normalisée s'écrit toujours selon [1] mais la puissance du bruit  $\mu(k,l)$  est cette fois estimée en calculant une moyenne pondérée dans une fenêtre autour du point courant  $y_{k,l}$ .

Nous avons implémenté les normalisations "2-D pondérée" et "2D en deux étapes" (cf [1]), en les adaptant afin de tenir compte du recouvrement (utilisation d'un trou temporel).

##### C. Test du Rapport de Vraisemblance Généralisé (RVG) sur le signal blanchi [2].

Le troisième type de normalisation considéré consiste à appliquer le test de rapport de vraisemblance généralisé décrit dans [2]. Ce test repose sur l'hypothèse que le bruit de fond est gaussien, complexe, stationnaire et blanc dans chaque tranche temporelle traitée. Il se justifie donc en particulier à l'issue d'un blanchiment préalable réalisé par un filtrage MA, les

coefficients (AR) du filtre blanchisseur devant être estimés sur une tranche temporelle disjointe de la tranche traitée. La valeur du test correspondant au TRVG s'écrit, selon [2] :

$$T_C(k,l) = 2N \ln \left[ \frac{\sum_{i=1}^N |x_i|^2}{\sum_{i=1}^N |x_i|^2 - y_{k,l}} \right] \quad (2)$$

où  $x_i$  désigne le  $i$ ème échantillon temporel avant FFT de la  $k$ ème tranche temporelle traitée.

On peut noter que, comme pour les normalisations de type B, l'hypothèse sous-jacente est que la forme du spectre du réverbéré reste localement stationnaire. La différence entre les deux techniques est que, pour les normes B, cette hypothèse est utilisée pour le calcul de la puissance du réverbéré après FFT et quadrature, alors que, pour la technique C, cette même hypothèse se traduit par un blanchiment préalable du spectre du bruit. On peut enfin remarquer que cette dernière approche, sous l'hypothèse de stationnarité de la forme du spectre du réverbéré et d'une estimation parfaite des coefficients AR, correspond au filtrage optimal au sens de Wiener pour la détection d'un signal en présence d'un bruit coloré (cf.[3]).

Remarque : dans [2], l'auteur indique sans le démontrer que la loi de la sortie sous l'hypothèse bruit seul ( $H_0$ ) est un  $\chi^2(2)$ , ce résultat étant vérifié sur simulations synthétiques. Un calcul plus rigoureux peut être effectué. En effet, on peut montrer que sous l'hypothèse d'un bruit blanc et sous  $H_0$ ,  $T_C(k,l)$  suit une loi Beta II de paramètres  $(1, (N-1))$  (autrement dit  $(N-1)T_{k,l}$  suit une loi de Fisher de paramètres  $(2, 2(N-1))$ , d'où on déduit facilement que  $[(N-1)/N y_{k,l}]$  suit une loi du  $\chi^2(2)$ . On retrouve alors l'hypothèse "N grand" de l'auteur qui revient à supposer que  $N-1/N = 1$ . Cette hypothèse permet de calculer une Pfa ne dépendant que du seuil de détection alors que la prise en compte de la loi exacte donne une Pfa dépendant en plus du nombre d'échantillons N.

#### 3.2 Résultats obtenus

Les enregistrements traités mettent en présence un sonar trempé et une cible dans différentes situations représentatives (rapprochement, éloignement, dopplers forts ou faibles). Le milieu environnant, correspondant à de très petits fonds, est caractérisé par la présence d'échos fixes et de réverbération.

Les sorties de traitement sont des images temps-fréquence normalisées par rapport au maximum de l'image.

En l'absence de blanchiment préalable et de normalisation, l'écho du signal est peu visible sur les images, du fait de la présence de pics de fort niveau, à doppler nul. Après application d'une normalisation classique (figure 2), l'écho reste peu visible pour les séquences correspondant à une cible à très faible doppler.

En revanche, l'application des normes fines 2D, et plus particulièrement de la norme 2D pondérée (figure 3), permet de gommer les pics de réverbération et de mieux mettre en évidence l'écho de la cible. Les résultats obtenus sur signaux réels confirment ainsi l'intérêt de ces techniques de normalisation, qui n'avaient été testées dans [1] que sur signaux synthétiques.

Après blanchiment par filtrage inverse MA, une visualisation des spectres des sorties avant normalisation fait déjà apparaître assez clairement l'écho utile, y compris pour des cibles à faible doppler (figures 4 et 5). Après normalisation, l'écho est généralement très visible pour les différentes normes testées, et

plus particulièrement pour la norme TRVG pour laquelle le bruit de fond semble mieux régularisé (cf figure 6). On note l'amélioration manifeste par rapport au cas de la norme classique en l'absence de blanchiment (figure 2).

#### 4. Signaux FM

Dans le cas des signaux FM, nous avons en particulier cherché à évaluer l'intérêt d'un blanchiment préalable du signal par filtrage MA. En effet, une analyse préalable de signaux réels a montré que l'hypothèse de blancheur de la réverbération, généralement faite dans le cas de signaux FM, n'est pas toujours vérifiée.

##### 4.1 Description de la technique utilisée

Pour des signaux de type FM, le traitement consiste à effectuer une corrélation avec une copie (éventuellement modifiée) du signal émis, suivie d'une quadrature. En pratique, la corrélation est effectuée dans le domaine spectral, en suivant un schéma classique du type "overlapp save"[4], avec un recouvrement des tranches à 50%. Pour tenir compte de la longueur de l'écho, une post-intégration sur  $p$  échantillons est généralement effectuée, la valeur de  $p$  dépendant de la longueur de l'écho attendu.

La normalisation envisagée ici est un norme temporelle classique éventuellement couplée à un blanchiment (référé au réverbéré seul) du signal traité. La sortie de traitement  $T$  à l'instant  $t$  s'écrit :

$$T(t) = \frac{|S^* \cdot X|^2}{\mu(t)} \quad (3)$$

où  $X$  contient les échantillons d'une tranche et  $S$  est une copie (éventuellement filtrée MA) du signal émis. En pratique, la puissance du bruit à l'instant  $t$  ( $\mu(t)$ ) est estimée par un moyennage temporel effectué après filtrage adapté et quadrature sur  $2Nt$  échantillons situés de part et d'autre de l'échantillon à normaliser, avec un "trou" central correspondant à la longueur de l'écho.

Dans le cas où un filtrage MA est effectué, un problème particulier réside dans le fait que la copie du signal émis n'est plus exactement adaptée au signal attendu. Une solution rigoureuse consisterait à filtrer MA la copie en la décalant échantillon par échantillon et en réalisant la corrélation dans le domaine temporel.

La lourdeur de cette démarche a imposé des implémentations différentes et sous-optimales :

- utilisation d'une copie du signal émis filtrée au préalable par les différents filtres MA utilisés pour blanchir le signal pour chaque tranche de FFT traitée,
- utilisation d'une copie du signal émis filtrée par un filtre MA dont les coefficients sont obtenus par moyennage des différents filtres MA utilisés.

##### 4.2 Résultats obtenus

Une analyse préalable des signaux a mis en évidence une structure colorée des spectres reçus, rendant a priori intéressantes les démarches mettant en oeuvre un blanchiment. Par ailleurs, cette analyse a conduit à retenir un ordre 15 pour les modèles AR.

Les résultats obtenus sont plus nuancés qu'en FP, et dépendent fortement des séquences dépouillées et de paramètres de réglage comme la durée de post-intégration. Dans certains cas, la mise en oeuvre d'un filtre blanchisseur permet d'améliorer le rapport signal à bruit en sortie, en particulier lorsqu'on utilise une

copie filtrée par un filtre MA de coefficients moyennés. Ce résultat est illustré par les figures 7 et 8 représentant les sorties de traitement obtenues après normalisation classique et post intégration sur 4 échantillons, respectivement en l'absence et avec blanchiment préalable et utilisation d'une copie ainsi filtrée. Pour d'autres séquences, comportant notamment des bouffées de bruit, le blanchiment ne permet pas d'améliorer le rapport signal à bruit quelle que soit la copie utilisée, car l'application du filtre réduit à la fois le niveau du bruit et celui du signal.

Les résultats sont donc peu probants, mais il convient de rester prudent compte tenu du faible nombre de séquences dépouillées et de la sous-optimalité des solutions testées (copies non parfaitement adaptées au signal blanchi).

#### 5. Conclusion

En FP et à faible doppler, les résultats ont confirmé l'intérêt d'une chaîne mettant en oeuvre un blanchiment préalable du signal par filtrage MA, notamment lorsque le test en sortie est un TRVG. Une difficulté éventuelle réside alors dans le choix de l'ordre du modèle AR. L'alternative constituée par la mise en oeuvre d'une norme fine 2D conduit également à de bons résultats, la difficulté étant cette fois liée au choix des tailles de fenêtres d'estimation de la puissance du bruit. En FM, la disparité des résultats obtenus ne permet pas de conclure quant à l'efficacité d'un blanchiment préalable par filtrage MA. Il semble toutefois que le blanchiment ne permet pas d'améliorer la détection dans des contextes fortement non stationnaires ("bouffées" de bruit).

Des voies complémentaires de recherche (utilisation d'ARs adaptatifs, ...) restent dans les deux cas ouvertes.

#### 6. Bibliographie

- [1]-"Two dimensional normalization techniques". D.R. Morgan. IEEE Journ. of Oceanic Engineering, vol12 n° 1 Jan. 1987
- [2]-Improved active sonar detection using autoregressive prewhiteners. S. Kay, J. Salisbury, JASA 87 (4), April 90
- [3]-"Optimum SNR enhancement of narrow band signals in surface reverberation. F.W. Symons, JASA 74 (3) Sept 83
- [4]-"Digital Signal Processing". Oppenheim and Shafer, Ed. Prentice hall

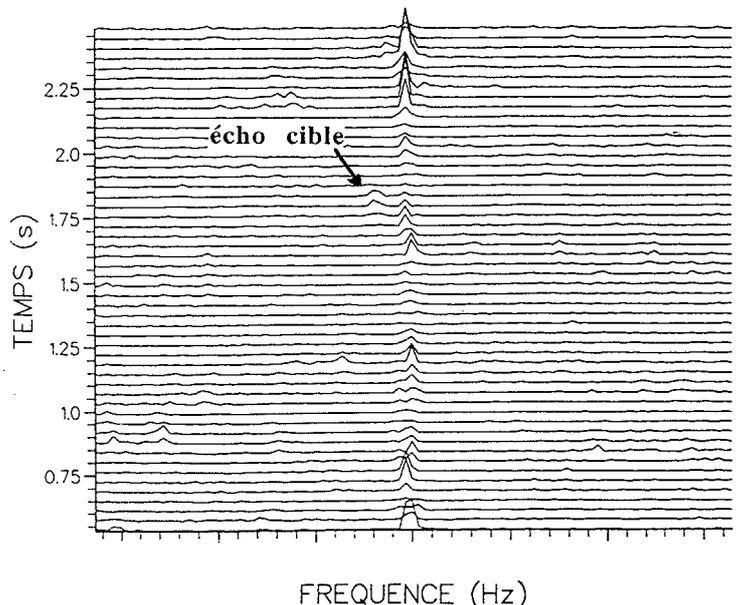


Figure 2 : cas FP, norme classique

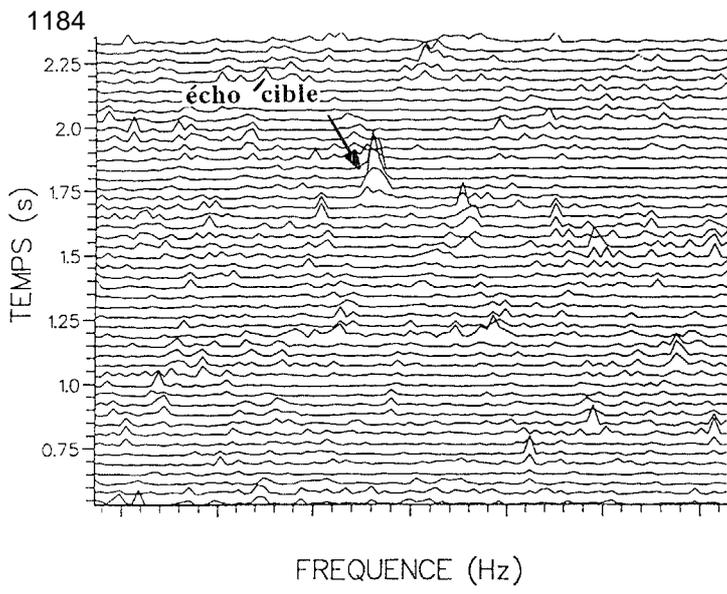


Figure 3 : cas FP, norme 2D pondérée

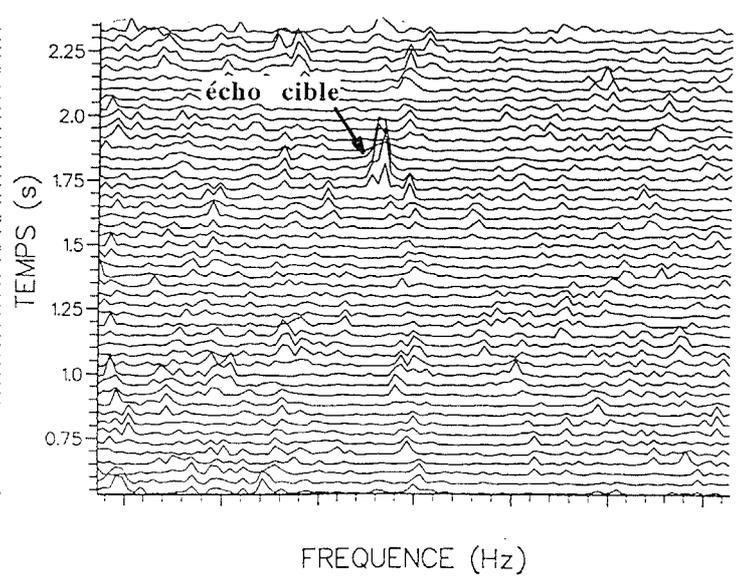


Figure 6 : cas FP, signal filtré MA + TRVG

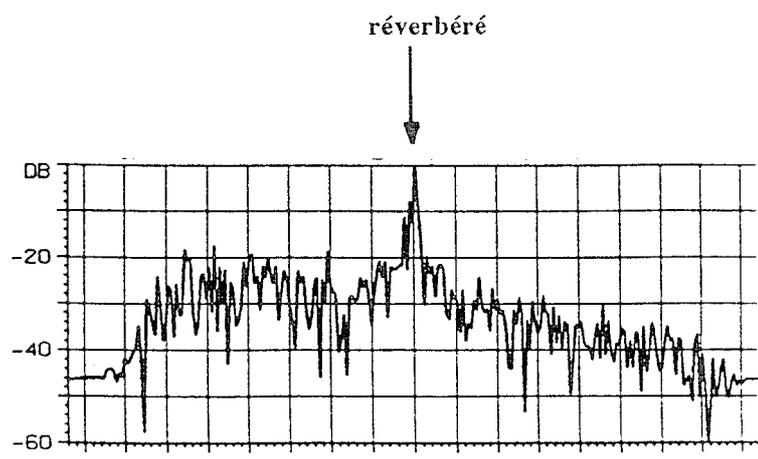


Figure 4 : FP, spectre du signal avant filtrage MA

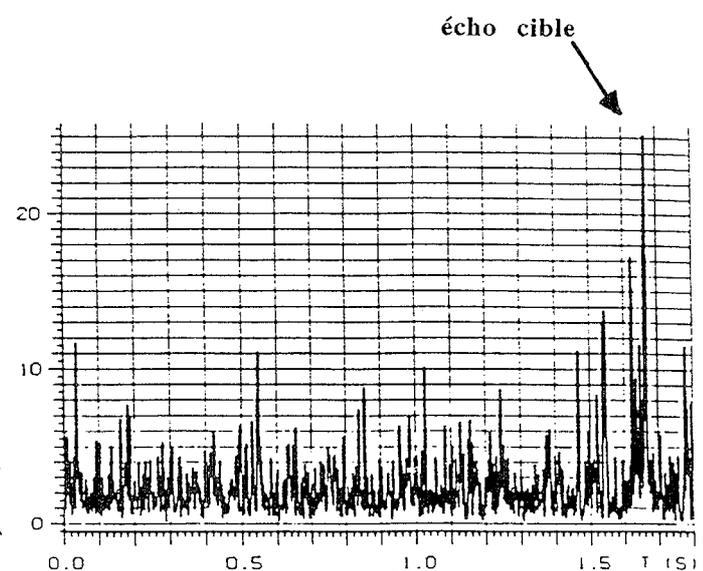


Figure 7 : cas FM, norme classique

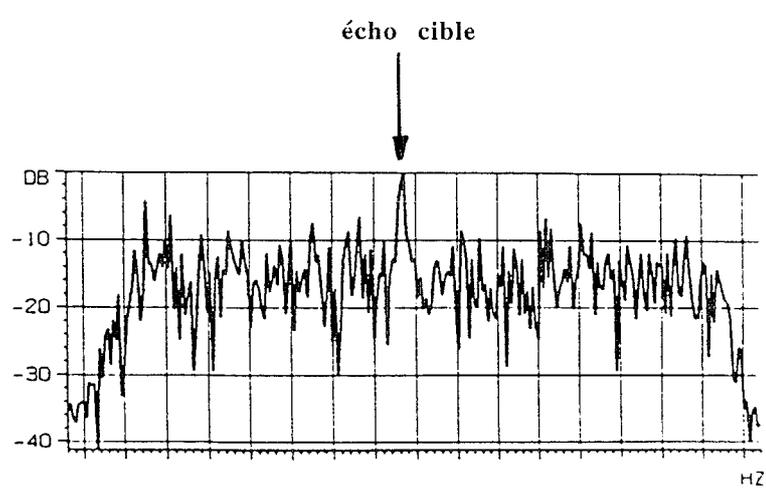


Figure 5 : FP, spectre du signal après filtrage MA

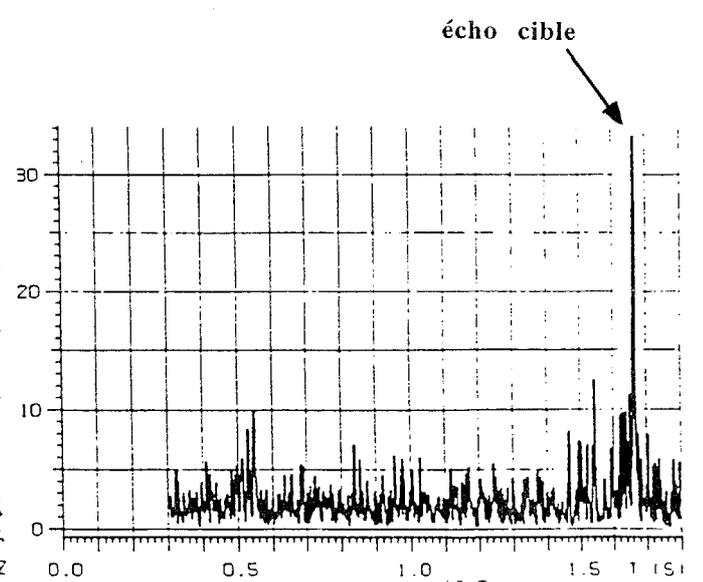


Figure 8 : cas FM, signal filtré MA