

# NEUVIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

791



NICE du 16 au 20 MAI 1983

COMPRESSION D'IMPULSION UTILISANT DES CIRCUITS A TRANSFERT DE CHARGE  
DANS LES SONARS D'IMAGERIE\*

PULSE COMPRESSION USING CHARGE COUPLED DEVICES IN IMAGING SONARS

P. GUTHMANN - J. LE GALL

THOMSON-CSF, Division ASM, 29283 - BREST CEDEX  
(France)

THOMSON-CSF, ASM Division, 29283 - BREST CEDEX  
(France)

## RESUME

L'utilisation de la compression d'impulsion dans les sonars d'imagerie du fond marin permet de gagner en portée du fait du gain en énergie, lié à l'allongement de l'impulsion émise, pour un niveau sonore émis et une résolution en distance identiques.

Une expérimentation a été réalisée en mer. On présente ici la maquette réalisant la compression d'impulsion, les résultats obtenus en laboratoire et au cours d'essais en mer.

L'originalité de la maquette vient du fait que le filtre adapté est réalisé autour d'un circuit à transfert de charges (C.C.D.). Le signal émis est une impulsion modulée linéairement en fréquence de produit BT (bande X durée de l'impulsion) supérieur à 100. Une pondération du type "Dolph Tcheycheff" est utilisée pour atténuer les secondaires de l'impulsion comprimée.

Les mesures en laboratoire ont permis de vérifier l'efficacité attendue de la compression d'impulsion pour lutter contre le bruit (gain en S/B = 10 log BT).

Les essais en mer ont mis en évidence des gains en portée de l'ordre de 40 %, par rapport à un sonar sans compression d'impulsion, pour des niveaux sonores émis et des résolutions identiques. On a observé un gain en contraste "Echo sur bruit", utile pour la détection d'objets posés sur le fond marin et un gain en contraste "réverbération sur bruit" utile pour la classification sur ombre de ces mêmes objets.

## SUMMARY

The use of pulse compression in sonar systems for sea bottom imagery makes it possible to increase range thanks to the energy gain, resulting from the longer duration of the emitted pulse, for identical emitted sound levels and range resolution.

An experiment at sea was carried out. The pulse compression equipment, the results obtained in laboratory and at sea are presented in this paper.

The equipment originality is that the matched filter uses a charge coupled device (C.C.D.). The emitted signal is a rectangular linear - FM pulse whose BT product (time - bandwidth) exceeds 100. A "Dolph Chebyshev" weighting is used in order to reduce the compressed pulse side lobes.

Laboratory measures have enabled to check the expected efficiency of pulse compression (gain in S/N ratio = 10 log BT).

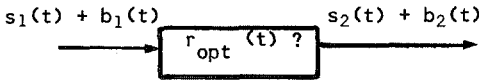
Experiment at sea have shown range gains of about 40 % in comparison with a sonar without pulse compression, for identical emitted sound levels and range resolutions. An "echo to noise" contrast gain, useful for detecting objects on the sea bottom and a "reverberation to noise" contrast gain, useful for shadow classification of the before mentioned objects have been measured.

\* Etude soutenue par la Direction des Recherches, Etudes et Techniques, Paris (France)



## 1 - INTRODUCTION

Le but du filtrage adapté est de maximiser le rapport signal sur bruit en un instant  $t = t_m$ .



$s_i(t)$  est le signal utile,  $b_i(t)$  le bruit.

Dans le cas où  $b_1(t)$  est blanc et gaussien, la réponse impulsionnelle  $r_{opt}(t)$  s'écrit :

$$r_{opt}(t) = k \cdot s_1(t_m - t)$$

Le signal utile en sortie,  $s_2(t)$  est la fonction d'autocorrélation de  $s_1(t)$

$$s_2(t) = k \int_{-\infty}^{+\infty} s_1(v) \cdot s_1(v + t_m - t) dv$$

Le rapport signal sur bruit maximum est alors :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_{\max} = \frac{2E}{N_0}$$

où  $E$  est l'énergie de  $s_1(t)$   
et

$\frac{N_0}{2}$  la densité spectrale de puissance moyenne.

Dans le cas où le signal  $s_1(t)$  est modulé linéairement en fréquence (durée  $T$ , bande  $B$ ), le gain en rapport signal sur bruit du fait de l'utilisation du filtre adapté est :  $10 \log BT$ .

On présente ici les résultats obtenus en utilisant un filtrage adapté (ou compression d'impulsion) dans un sonar expérimental d'imagerie. On compare en particulier des cas " avec et sans filtrage adapté " pour lesquels les résolutions temporelles attendues sont voisines.

La compression d'impulsion sur chacune des voies du sonar est réalisée à l'aide d'une maquette utilisant des circuits à transfert de charge (C.C.D.), que l'on vient insérer dans la chaîne de réception du sonar expérimental, après les préamplificateurs de voies.

## 2 - MAQUETTE REALISANT LA COMPRESSION D'IMPULSION

### 2.1 Présentation

#### 2.1.1. Signal émis

Le signal émis est modulé linéairement en fréquence et de durée  $T$  :

$$s(t) = A \sin \left( 2\pi f_0 t + \frac{\mu t^2}{2} \right) \quad t \in [0, T]$$

$$\mu = 6,733 \cdot 10^6 \text{ (rd/s)/s}$$

$$T = 11,197 \text{ ms}$$

L'excursion en fréquence est  $B = \frac{\mu T}{2\pi} = 12 \text{ kHz}$

$$BT = 134$$

Ce signal est généré en utilisant l'algorithme

$$\sin(a+b) = \sin a \cos b + \cos a \sin b$$

$$\text{où } a = 2\pi f_1 t + \frac{\mu t^2}{2}$$

$$b = 2\pi f_{0L} t$$

$\sin a$  et  $\cos a$  sont programmés en mémoire morte puis on transpose le signal autour de la fréquence centrale  $f_c$ , grâce à la fréquence intermédiaire  $f_{0L}$ .

En fait,  $a$  comporte un déphasage supplémentaire  $\vartheta_c(f)$  qui tient compte des différents déphasages introduits en fonction de la fréquence le long de la chaîne de réception et qui permet d'adapter le signal à la réception et non pas à l'émission.

#### 2.1.2. Filtrage adapté

La chaîne électronique effectuant le filtrage adapté comporte un mélangeur d'entrée, un premier filtre passe-bas, un filtre transversal, un deuxième filtre passe-bas, un mélangeur de sortie et un filtre passe-bande de sortie (Fig. 1) et traite les signaux issus des préamplificateurs de voies dont la bande passante est de 12 kHz.

##### 2.1.2.1. Mélangeur d'entrée - filtre passe-bas

La fréquence  $f_H$  de l'horloge du CCD est directement liée au nombre d'étages  $N$  du CCD et à la durée  $T$  de l'impulsion émise :  $N = f_H \cdot T$

Comme le dispositif CCD utilisé comporte 512 étages, que  $T = 11,197 \text{ ms}$ , on a :  $f_H = 45,72 \text{ kHz}$ .

Pour respecter le théorème de Shannon, la fréquence maximale significative du spectre du signal à traiter par le CCD doit être inférieure à  $\frac{f_H}{2}$ , soit environ 22 kHz. Il est donc nécessaire de changer la fréquence centrale du signal en réception.

Ceci est réalisé à l'aide du mélangeur d'entrée et du premier filtre passe-bas ; on mélange le signal en réception à une fréquence locale  $f_{0L}$  et on filtre passe-bas.

Ainsi le spectre du signal ne comporte plus que des fréquences dans la bande 6 kHz - 16 kHz.

##### 2.1.2.2. Filtre transversal

Ce filtre est réalisé à l'aide du dispositif à transfert de charge THX 1120B.

Si  $e(t)$  est le signal temporel à l'entrée du CCD et  $a_i$  la réponse impulsionnelle du filtre, on calcule :

$$s\left(\frac{n}{f_H}\right) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot e\left(\frac{n-i}{f_H}\right)$$

Le même composant CCD réalise à la fois la lecture non destructive des charges  $\left(e\left(\frac{n-i}{f_H}\right)\right)$ , la pondération  $(a_i)$ ,

puis la sommation  $\left(\sum_{i=1}^N\right)$  à l'aide de la technique des électrodes coupées.

Le filtre comporte  $N = 512$  étages et est adapté à un signal modulé linéairement en fréquence ; on a :

$$a_i = w_i \cdot \cos \left[ 2\pi f_1 \cdot i \cdot t_0 + \frac{\mu}{2} (i \cdot t_0)^2 \right]$$

$$\text{où : } - i = 1, \dots, N$$

$$- f_1 = 5,427 \text{ kHz}$$

$$- t_0 = \frac{1}{f_H} = 21,87 \text{ } \mu\text{s}$$

$$- \mu = 6,733 \cdot 10^6 \text{ rd/s/s}$$

$$- w_i = \text{coefficient de pondération de Dolph Tchebycheff.}$$

La pondération est destinée à réduire l'amplitude des oscillations secondaires de l'impulsion comprimée vis-à-vis de l'oscillation principale (-30 dB).

##### 2.1.2.3. Filtre passe-bas, mélangeur, filtre passe-bande

Afin que le filtrage adapté soit "transparent" pour le traitement ultérieur de réception (détection-intégration) et puisse être ainsi embarqué sur un sonar existant, on réalise une nouvelle transposition de fréquence de manière à ce que la porteuse du signal soit  $f_c$ .



COMPRESSION D'IMPULSION UTILISANT DES CIRCUITS A TRANSFERT DE CHARGE  
DANS LES SONARS D'IMAGERIE

D'abord, on filtre passe-bas pour éliminer les composantes hautes fréquences. Ensuite on mélange le signal ainsi obtenu à un signal de fréquence  $f_{0L}$ , puis on filtre passe-bande autour de  $f_c$ .

## 2.2. Résultats obtenus en laboratoire

Avant d'effectuer des essais en mer, la maquette a été testée en laboratoire. On s'est particulièrement intéressé à la forme de l'impulsion comprimée, à son spectre et au gain de traitement obtenu contre le bruit.

### 2.2.1. Forme de l'impulsion comprimée (Fig. 2)

La largeur à 3 dB de l'impulsion comprimée est égale en moyenne à 80  $\mu$ s contre 100  $\mu$ s en théorie avec la pondération. Cependant la largeur à la base de l'impulsion est plus importante que celle de l'impulsion théorique. Le niveau moyen du premier lobe secondaire de l'impulsion comprimée est de l'ordre de -20 dB ; les niveaux des lobes suivants sont généralement inférieurs à -30 dB.

### 2.2.2. Spectre de l'impulsion comprimée (Fig. 3)

La bande à 3 dB est de l'ordre de 4,5 kHz expérimentalement.

Sur la figure 4, on compare le spectre expérimental et le spectre obtenu à partir de la méthode de la phase stationnaire

$$S(f) = w^2 \left( \frac{2\pi(f-f_c)}{\mu} \right)$$

Le modèle approche le spectre expérimental ; l'écart cependant observé peut s'expliquer par la présence du préamplificateur et d'autres filtres dans la chaîne de réception du sonar.

### 2.2.3. Gain du traitement

Le gain en rapport signal sur bruit que permet le filtre adapté quand il n'y a pas de pondération de la réponse impulsionnelle du filtre, est :

$$G(S/B)_{s.p.} = 10 \log BT$$

où B = excursion en fréquence  
T = durée de l'impulsion émise.

Du fait de la pondération, le gain devient :

$$G(S/B)_{a.p.} = 10 \log BT \cdot \frac{1}{N} \frac{(\sum w_i)^2}{\sum w_i^2}$$

On obtient :

$$G(S/B)_{s.p.} = 21,3 \text{ dB}$$

$$G(S/B)_{a.p.} = 20,7 \text{ dB}$$

Le gain en S/B a été évalué expérimentalement en comparant le gain de la chaîne pour un signal adapté et le gain de la chaîne pour un bruit dans la bande 12 kHz. On a pratiquement retrouvé le gain théorique.

## 3 - EXPERIMENTATION EN MER - RESULTATS

### 3.1. Présentation

On désire comparer, à partir d'expérimentations réalisées en mer, les performances d'un sonar de détection d'objets posés sur le fond marin, avec ou sans compression d'impulsion.

Dans un cas (a), le signal émis est à fréquence pure  $f_c$ , de durée  $T_1 = 120 \mu$ s et d'amplitude A ; la bande du bruit est celle des préamplificateurs  $B_1 = 12 \text{ kHz}$ .

Dans l'autre cas (b), le signal émis est modulé linéairement en fréquence  $f_c$ ,  $B_2 = 12 \text{ kHz}$ , de durée  $T_2 = 11,197 \text{ ms}$  et d'amplitude A.

Dans ce cas, on intercale à la réception, entre le préamplificateur et le détecteur-intégrateur, le filtre adapté décrit précédemment.

La résolution temporelle attendue est sensiblement la même dans les deux cas et voisine de  $\tau = 100 \mu$ s. Le niveau sonore émis est identique.

Le signal reçu est en fait le résultat de la convolution du signal émis par la réponse impulsionnelle du fond marin et des cibles. On admettra cependant que le filtre adapté à l'émission est également le filtre adapté à la réception.

On a comparé successivement les résolutions temporelles, la portée sur réverbération de fond, la portée sur écho, le contraste écho sur signal parasite.

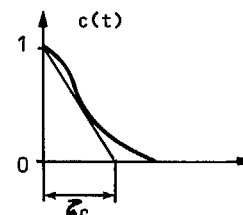
### 3.2. Résolution temporelle

Que l'on ait filtrage adapté ou non, la fin de la chaîne de réception est constituée d'une détection linéaire suivie d'une intégration RC dont la constante de temps est faible vis-à-vis de l'impulsion comprimée ou non ; on peut ainsi admettre que la résolution temporelle est déterminée par la durée effective de l'impulsion à l'entrée de la détection. Cette durée effective est égale à la durée T de l'impulsion émise quand il n'y a pas de filtrage adapté et voisine de l'inverse de la bande émise quand il y a filtrage adapté et que le produit BT est très grand devant 1.

En fait, compte tenu de la pondération de Dolph Tchebyscheff utilisée, et des divers filtrages, on peut s'attendre à obtenir une résolution temporelle moins fine.

On a déjà noté la largeur relativement importante de l'impulsion comprimée. De plus l'examen des signaux reçus (Fig. 5 et 6) montre à l'oeil que les signaux b issus du filtrage adapté sont plus corrélés.

Afin d'évaluer quantitativement les résolutions, on a calculé sur ordinateur des fonctions d'autocorrélation  $c(t)$  à partir de signaux enregistrés et numérisés, puis déterminé des temps de corrélation  $\tau_c$ , comme indiqué ci-dessous :



On a obtenu en moyenne :

$\tau_c$  (sans filtrage adapté)  $\approx 130 \mu$ s

$\tau_c$  (avec filtrage adapté)  $\approx 180 \mu$ s

Comme, dans le cas a, le temps moyen de corrélation (130  $\mu$ s) est voisin de la largeur de l'impulsion émise (120  $\mu$ s), on admet que la largeur "efficace" b est de l'ordre de 180  $\mu$ s, soit bien plus élevée que la largeur à 3 dB de l'impulsion comprimée théorique et expérimentale. La largeur "efficace" ainsi obtenue est cependant voisine de l'inverse de la bande mesurée expérimentalement en laboratoire.

Ainsi la largeur "efficace" déduite du temps d'autocorrélation  $\tau_c$  rend mieux compte de la résolution en distance effective du sonar.

On peut noter, du fait des similitudes entre les mesures en laboratoire et en mer, que le milieu de propagation ne semble pas affecter le signal émis et le code utilisé.



### 3.3. Portée sur réverbération de fond

La portée sur réverbération de fond est la distance à partir de laquelle le niveau de réverbération de fond devient inférieur au niveau de bruit de la chaîne sonar.

On la détermine à partir de la tension de la commande automatique de gain des préamplificateurs. L'instant à partir duquel la dérivée par rapport au temps de cette tension s'annule indique que la régulation de la valeur moyenne s'effectue sur le bruit de la chaîne.

On a observé dans le cas b un gain de portée de l'ordre de 35 % par rapport au cas a, pour un même niveau sonore à l'émission.

Cette augmentation de la portée sur réverbération de fond est due au fait que l'énergie émise et ainsi le niveau de la réverbération de fond, a augmenté dans le cas b. Le gain est directement égal au rapport des impulsions émises  $\frac{T_2}{T_1}$ , soit environ 20 dB et on a pu vérifier que ce gain en énergie permettait de compenser l'augmentation des pertes de propagation due à l'augmentation de portée.

### 3.4. Portée sur échos

Les cibles sont posées sur le fond marin. En effectuant plusieurs passes, il a été possible de déterminer des portées moyennes sur écho pour les cas a et b.

On a observé un gain moyen en portée dans le cas b (avec compression d'impulsion) de l'ordre de 40 %, pour un même niveau sonore à l'émission.

Dans un cas (a), le rapport signal sur bruit est :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_a = \frac{A^2}{N_0 \cdot B_1}$$

La puissance moyenne du bruit est :  $N_1 = N_0 \cdot B_1$

Dans l'autre cas (b), du fait du filtre adapté, on obtient, en négligeant la pondération :

$$\left(\frac{S}{B}\right)_b = \frac{A^2 \cdot T_2}{N_0}$$

La puissance moyenne du bruit est :  $N_2 = N_0 \cdot B_2$

Le gain en rapport signal sur bruit est ainsi :

$$G_{b/a} = \left(\frac{S}{B}\right)_b / \left(\frac{S}{B}\right)_a = B_1 \cdot T_2$$

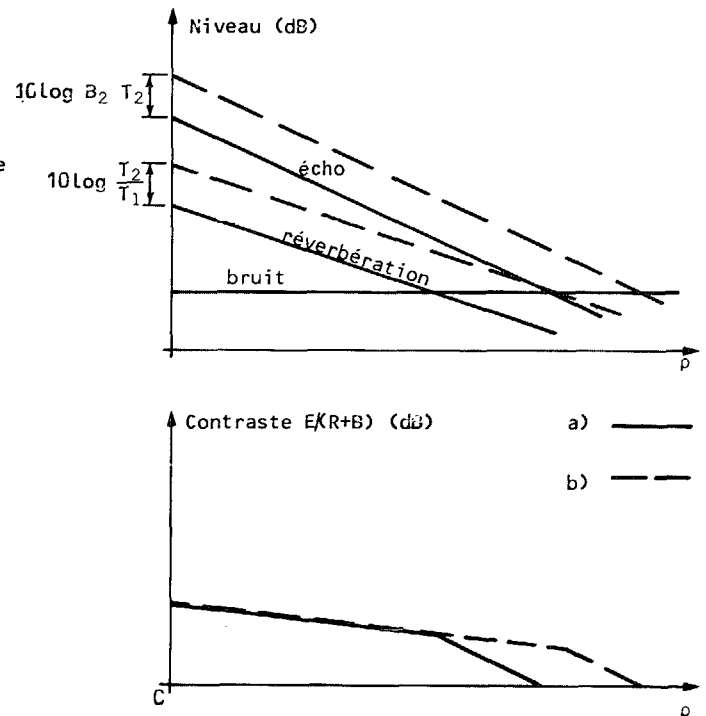
Le gain sur le niveau de l'écho est  $S_b / S_a = B_2 \cdot T_2$

On a représenté schématiquement ci-dessous les niveaux de l'écho, de la réverbération de fond et du bruit, et le contraste "Echo sur réverbération + bruit" en fonction de la distance dans les cas a et b.

On a supposé que les niveaux des bruits sont les mêmes en a et b, d'où  $B_1 = B_2$ ; on ignore de plus les effets de la pondération.

Comme les résolutions sont voisines  $\left(B_2 \approx \frac{1}{T_1}\right)$ , on a  $10 \log B_2 \cdot T_2 \approx 10 \log \frac{T_2}{T_1}$

A courte distance, on observe que les contrastes sont du même ordre. Le gain en contraste et donc en portée sur écho, se manifeste à partir du moment où, dans le cas a, le niveau de bruit devient supérieur au niveau de réverbération de fond; on obtient ainsi un gain de portée de l'ordre de 40 % en utilisant la compression d'impulsion.



### 3.5. Contraste "Echo sur réverbération"

A partir des signaux numérisés, on a déterminé sur ordinateur des contrastes "Echo sur réverbération" :

$$C_{dB} = 20 \log \frac{E - m}{\sigma}$$

où E est l'amplitude de l'écho, m la moyenne et  $\sigma$  l'écart type de l'environnement.

Sur les exemples traités, on peut considérer que l'environnement est constitué uniquement de réverbération de fond, le bruit étant négligeable.

On a obtenu en moyenne :

$$\left. \begin{array}{l} C_a = 24,3 \text{ dB} \\ C_b = 21,4 \text{ dB} \end{array} \right\} \text{d'où } C_b - C_a = -2,9 \text{ dB}$$

En théorie, le gain en contraste "Echo sur réverbération" est :

$$G \left(\frac{S}{R}\right)_{b/a} = 10 \log B_2 T_2 - 10 \log \frac{T_2}{T_1} = 10 \log B_2 T_1$$

On a choisi de comparer des cas où les résolutions temporelles sont identiques, d'où

$$B_2 \approx \frac{1}{T_1}; \text{ dans ce cas } G \left(\frac{S}{R}\right)_{b/a} = 0 \text{ dB}$$

En fait on a vu que les résolutions étaient différentes en raison de la réduction de la bande du signal après traitement cohérent ( $B_2 \approx 4,5 \text{ kHz}$ ); en prenant  $T_1 = 120 \mu\text{s}$  et  $B_2 = 4,5 \text{ kHz}$ , on obtient :

$$G \left(\frac{S}{R}\right)_{b/a} = -2,7 \text{ dB.}$$

On a à peu près retrouvé expérimentalement cette perte de contraste ( $C_b - C_a = -2,9 \text{ dB}$ ).

COMPRESSION D'IMPULSION UTILISANT DES CIRCUITS A TRANSFERT DE CHARGE  
DANS LES SONARS D'IMAGERIE

4 - CONCLUSION

A partir d'expérimentations en mer, on a mis en évidence l'intérêt de l'utilisation de la compression d'impulsion dans les sonars d'imagerie.

Le milieu de propagation ne semble pas avoir affecté le code FM d'émission utilisé. Le filtrage reste ainsi adapté à la réception.

Tout en gardant une résolution en distance comparable, on a obtenu des gains en portée sur réverbération de fond et en portée sur écho de l'ordre de 40 % pour un même niveau sonore à l'émission.

Il est ainsi possible de "durcir" un sonar de détection sur écho quand les bruits sont anormalement élevés (mer très forte, bateaux bruyants, ressac ...), en maintenant une portée qui assure la sécurité du porteur ; bien entendu, en ambiance normale, la portée est accrue des valeurs précédemment obtenues.

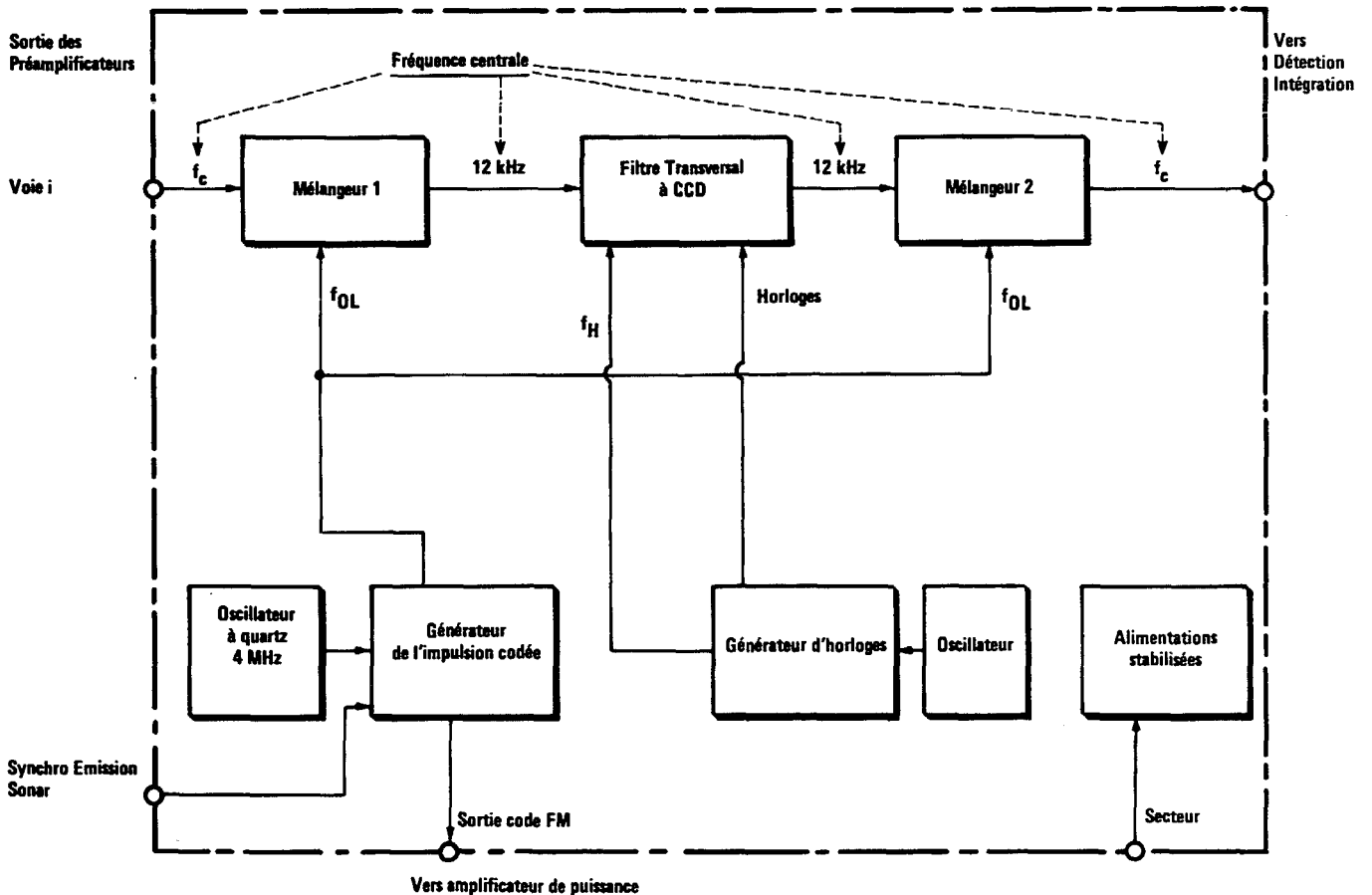


FIG.1 - SYNOPTIQUE DE LA MAQUETTE



COMPRESSION D'IMPULSION UTILISANT DES CIRCUITS A TRANSFERT DE CHARGE  
DANS LES SONARS D'IMAGERIE

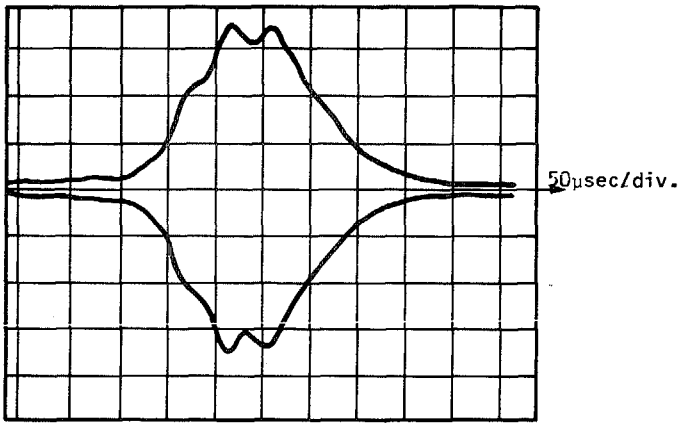


FIG.2 - ENVELOPPE DE L'IMPULSION COMPRIMEE

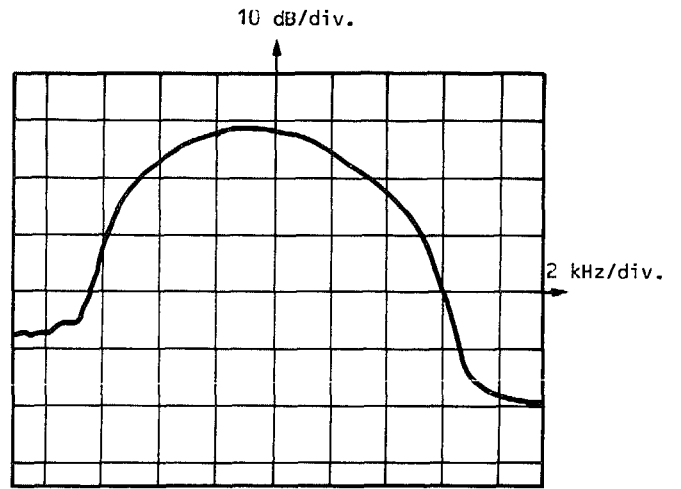
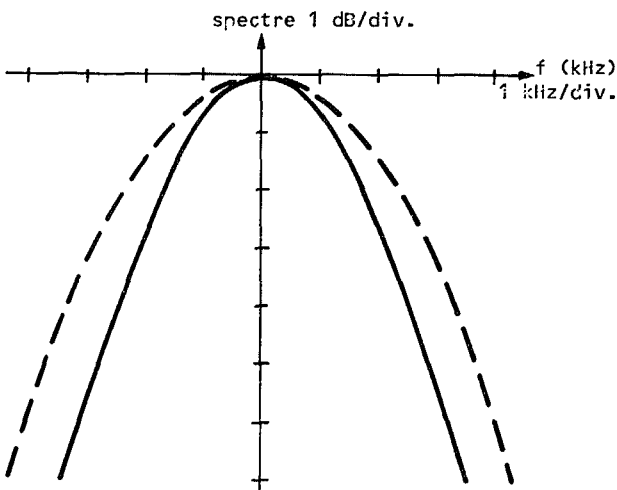


FIG.3 - SPECTRE DE L'IMPULSION COMPRIMEE



- spectre expérimental
- - spectre théorique (méthode de la phase stationnaire)

FIG.4 - COMPARAISON DE SPECTRES

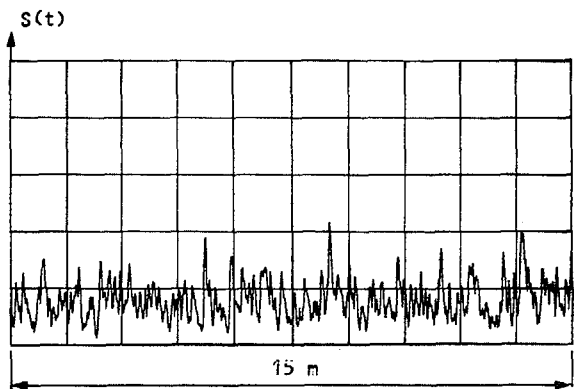


FIG.5 - SIGNAL DE VOIE APRES DETECTION-INTEGRATION  
(cas a)

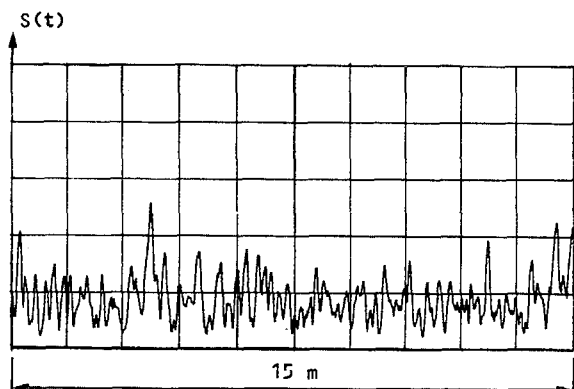


FIG. 6 - SIGNAL DE VOIE APRES DETECTION-INTEGRATION  
(cas b)