

# SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

---

MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE

(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)

J. LE HARS

G.E.S.M.A. - D.C.A.N. DE BREST

---

## RESUME

On décrit le principe de réalisation d'un multicorrélateur basse fréquence, selon une technique entièrement analogique.

Cet appareil met en oeuvre des Dispositifs à Transfert de Charge de type "Bucket Brigade Device". Le fonctionnement en temps réel est assuré par une boucle de compression de temps, comprenant un quantifieur et un registre à décalage analogique ; on propose un mode de fonctionnement particulier visant à réduire les pertes par inefficacité de transfert dans le registre analogique. L'intégration exponentielle, est obtenue par un intégrateur à capacité commutée associé à un commutateur électronique.

On présente l'équipement ainsi réalisé, et les performances obtenues.

## SUMMARY

This paper deals with a particular design of low frequency correlator using analog technics.

The correlator makes use of Charge Transfer Devices type Bucket Brigade Device. Real time processing is performed by means of a DELAY TIME Compressor including a quantifier and an analog shift register ; a special process to reduce inefficiency losses of the analog register is suggested. A switched capacitor integrator, associated with a multiplexer, performs the exponential averaging.

A presentation of the equipment realized as described above, and of the experimental results is given as a conclusion.



MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE  
(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)

## 1 - INTRODUCTION

L'estimation de la fonction d'intercorrélation de deux grandeurs  $x(t)$  et  $y(t)$  est définie par les relations suivantes :

- en analogique :

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t-\tau) dt$$

- en numérique :

$$C_{xy}(mTe) = \frac{1}{N+1} \sum_{k=0}^N x(kTe) \cdot y[(k-m)Te]$$

On note qu'il faut réaliser trois opérations successives :

- retard
- multiplication
- intégration

Nous nous proposons de décrire le fonctionnement d'un corrélateur, répondant aux caractéristiques suivantes :

- Gamme de fréquence utile : 20 Hz à 200 Hz
- Calcul simultané de  $n = 127$  points de corrélation
- Retard à l'origine  $\tau_0$  continûment variable de 0,1 s à 0,4 s
- Retard incrémental  $\tau_i$  continûment variable et tel que  $0,2 s \leq n \tau_i \leq 0,7 s$
- Constante de temps d'intégration  $T \leq 10 s$
- Réalisation compacte.

Après avoir décrit le principe et les particularités des différentes fonctions, nous présenterons les résultats obtenus.

## 2 - PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DU MULTICORRELATEUR

Après une brève présentation du synoptique général, nous décrirons séparément le principe et le fonctionnement de chaque sous-ensemble.

### 2.1 - Présentation du synoptique

Le synoptique général du multicorrélateur est représenté à la figure 4. Le signal  $y(t)$  issu d'une entrée est introduit dans un registre à décalage analogique où il est retardé de  $\tau_0$ . L'interpolation du signal échantillonné issu du registre est réalisée par un filtre passe-bas. Le signal reconstitué  $y(t-\tau_0)$  est introduit dans une boucle de compression de temps de rapport  $K = 127$ . Cette boucle comprend un inverseur, un échantillonneur-bloqueur, un quantifieur et un registre à décalage analogique. Entre deux instants d'échantillonnage de  $y(t-\tau_0)$ , le signal compressé  $y\left(\frac{t-\tau_0}{127}\right)$  se présente sous la forme d'une succession de 127 échantillons, dont les amplitudes respectives sont représentatives des 127 échantillons de  $y(t-\tau_0)$  précédemment prélevés. Un multi-

plieur analogique rapide effectue le produit du signal compressé  $y\left(\frac{t-\tau}{127}\right)$  et du signal  $x(t)$  issu de la seconde entrée. Les 127 produits effectués entre deux instants d'échantillonnage de  $y(t-\tau_0)$  sont respectivement dirigés vers 127 capacités d'intégration, dont chacune correspond à un retard élémentaire de la fonction d'intercorrélation. La tension aux bornes des capacités d'intégration est recueillie par un échantillonneur-bloqueur, à la sortie duquel la fonction d'intercorrélation se présente sous la forme d'une succession de 127 paliers. Cette fonction peut être lissée par un filtre passe-bas. Un oscillateur, associé à une logique de commande assure la synchronisation de l'ensemble.

### 2.2 - Création du retard à l'origine

Dans des applications particulières, la partie intéressante de la fonction d'intercorrélation  $C_{xy}(\tau)$  est parfois limitée à une fenêtre de retard comprise entre  $\tau_0$  et  $\tau_M$ . Ce changement d'origine est obtenu en retardant le signal appliqué à l'une des entrées du corrélateur d'une quantité  $\tau_0$ . Ce retard est créé par des Dispositifs à Transfert de Charge de type "Bucket Brigade Device", fonctionnant en registre à décalage analogique.

On utilise deux registres multiplexés, ce qui permet de doubler la fréquence d'échantillonnage, pour un retard donné.

L'interpolation du signal échantillonné issu des registres à décalages analogiques, est réalisée par un filtre passe-bas d'ordre  $n = 6$  (réponse de Butterworth).

### 2.3 - But et principe de la compression de temps

Pour calculer la fonction d'intercorrélation  $C_{xy}(\tau)$  en temps réel, il faut entre deux instants d'échantillonnage :

- réaliser  $n$  retards différents
- effectuer  $n$  produits
- aiguiller ces  $n$  produits vers leurs cellules d'intégration respectives.

La compression de temps permet d'accélérer la cadence de présentation des échantillons, ce qui autorise un fonctionnement en temps réel, en n'utilisant qu'un seul multiplieur.

La compression de temps consiste à transformer une tranche de signal de durée  $T$  et de bande  $B$ , en une tranche de durée  $T' < T$  et de bande  $B' > B$ , telle que  $BT = B'T'$ . Le rapport  $K = T/T' = B'/B$  est appelé taux de compression de temps. Pour réaliser cette compression de temps, on introduit, au cours



MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE

(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)

du temps, dans une mémoire, les  $n$  échantillons ( $n \geq 2$  BT) de la tranche  $T$ , puis on les lit plus rapidement dans le temps  $T'$ . (3) et (4)

La compression de temps de signaux échantillonnés, se réalise à l'aide d'une mémoire circulante et d'une logique permettant le prélèvement et la recirculation des échantillons. Le schéma de principe est représenté à la figure 1.

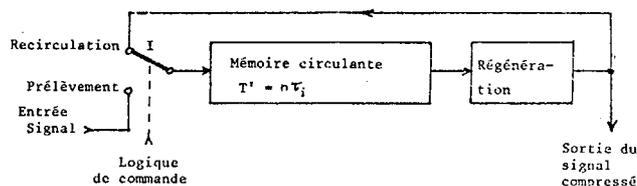


Figure 1 - Schéma de principe d'une boucle de compression de temps

Un échantillon, représentatif du signal d'entrée est introduit dans la mémoire circulante (inverseur I en position prélèvement), au bout d'un temps  $T'$  correspondant à la durée de la propagation dans la mémoire, cet échantillon est réinscrit (inverseur I en position recirculation). Juste avant cette réinscription on introduit un nouvel échantillon.

Si la mémoire peut contenir  $n$  échantillons, chaque échantillon circulera  $(n-1)$  fois avant d'être remplacé par un échantillon plus récent. La période d'écriture dans la mémoire est donc  $\frac{(n-1) T'}{n}$  alors que la période de lecture est  $\frac{T'}{n}$ . Une compression de temps a été réalisée dans un rapport  $K = n-1$  sur une tranche du signal d'entrée égale à  $T = (n-1) T'$ .

Le synoptique du montage adopté est représenté à la figure 2.

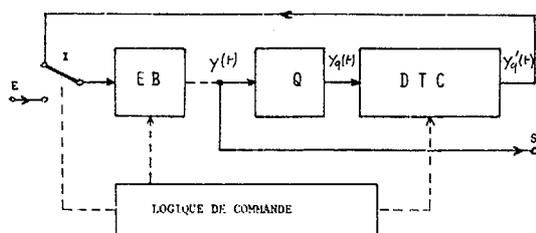


Figure 2 - Synoptique de la boucle de compression de temps

La boucle de compression de temps comprend les éléments suivants :

- Un Dispositif à Transfert de Charge (DTC) assurant la mémorisation des échantillons.
- Un Inverseur (I) contrôlant l'entrée et la recirculation des échantillons.
- Un Echantillonneur-Bloqueur (EB) assurant la mise en forme des signaux issus du DTC.
- Un Quantifieur (Q) assurant la stabilité du gain de la boucle.

Explicitons le rôle et le fonctionnement de chacun de ces éléments.

Rôle du quantifieur

Le registre à décalage analogique utilisé, est identique à celui qui produit le retard à l'origine ; il possède  $N = 512$  étages, et nous verrons plus loin qu'il peut mémoriser  $n = 128$  échantillons. Nous avons mesuré une inefficacité de transfert  $\epsilon = 3.10^{-4}$ , (5) c'est-à-dire une perte totale dans le registre de  $N\epsilon = 0,15$ . L'amplitude d'un échantillon sera donc réduite de 15 % à chaque circulation, ce qui est incompatible avec le fonctionnement de la boucle, puisque chaque échantillon doit circuler  $n-1 = 127$  fois avant d'être remplacé.

On voit donc la nécessité de régénérer l'amplitude du signal à chaque circulation, d'où l'idée d'insérer un quantifieur dans la boucle du montage.

Le fait de quantifier un signal en un nombre limité de niveaux, réduit la précision sur l'amplitude, Mais, on sait qu'une quantification grossière affecte peu la précision de la fonction de corrélation. Le corrélateur est à quantification monovoie, puisque seule la voie  $y(t)$  est quantifiée, ce qui constitue un bon compromis précision-complexité. (2)

La loi de quantification adoptée est de type paire avec 4 niveaux de quantification.

Le signal analogique  $y(t)$  introduit dans le quantifieur, produit un signal  $y_q(t)$  dont l'amplitude ne peut prendre qu'un nombre limité d'états distincts.  $y_q(t)$  est transmis par le registre à décalage analogique et apparaît atténué à la sortie de ce dernier, sous la forme  $y'_q(t)$ . Le recyclage de  $y'_q(t)$  se fait par l'intermédiaire du quantifieur, ce qui a pour effet de restituer l'amplitude du signal original  $y_q(t)$ .

Ceci à la restriction suivante près : le demi pas de quantification  $q/2$  (ou demi quantum), devra être supérieur à la perte d'amplitude maximale subie par un échantillon, au cours d'une circulation.

Remarque

Nous venons de voir, que la perte d'amplitude subie par un échantillon dans le registre à décalage analogique est de 15 %. Or, nous nous sommes fixé une loi de quantification à 4 niveaux, ce qui porte la valeur du demi quantum  $q/2$  à 12,5 % de l'amplitude maximale du signal quantifié. Dans ces conditions, la stabilité du gain de la boucle n'était pas assurée pour les signaux forts, puisqu'une perte supérieure à  $q/2$  entraîne un changement du niveau de quantification.

Nous avons alors été conduits à diminuer les effets de l'inefficacité de transfert, en utilisant le registre à décalage analogique selon un mode de fonctionnement, particulier. On intercale des échantillons d'amplitude nulle, entre les échantillons représentatifs du signal analogique  $y(t)$ , avant de les introduire dans le registre. Le report d'amplitude d'un échantillon sur le suivant est alors considérablement réduit, puisqu'il n'est plus que de 1,2 % pour le registre considéré. Et la stabilité du gain de la boucle est assurée dans les conditions les plus défavorables. La capacité de mémorisation du registre est réduite à  $n = 128$  échantillons, et le taux de compression de temps sera  $K = n-1 = 127$ . C'est-à-dire que le corrélateur pourra calculer simultanément 127 points de corrélation. La fréquence du signal d'entrée  $y(t)$  est comprise entre 20 Hz et 200 Hz, après compression de temps elle est translatée entre 2540 Hz et 25400 Hz. Cette bande de fréquence est compatible avec la gamme de fréquence du registre utilisé.

Rôles de l'échantillonneur-bloqueur

Le signal issu du registre à décalage analogique se présente sous la forme d'une succession d'échantillons significatifs, séparés par des échantillons nuls. A ces échantillons sont superposés des pics parasites importants, produits par les commutations de l'horloge de commande du registre analogique. L'échantillonneur-bloqueur a deux rôles :

- Reconstituer le signal échantillonné original, en maintenant la tension de chaque échantillon significatif, pendant la durée de l'échantillon nul qui le suit.
- Eliminer les pics parasites qui altèrent le signal issu du registre.

Les qualités essentielles de l'échantillonneur-bloqueur sont, rapidité et précision. Le signal issu

de l'échantillonneur-bloqueur est dirigé, d'une part vers le quantifieur pour effectuer une nouvelle circulation, et d'autre part, vers le multiplieur pour élaborer les produits  $x_i y_i$ .

2.4 - Principe de l'intégration

Les 127 échantillons issus du multiplieur, durant chaque période d'échantillonnage de l'entrée, doivent être dirigés respectivement vers 127 cellules d'intégration analogique. Ces cellules sont lues à un rythme moins rapide pour élaborer en sortie la fonction de corrélation. Le schéma de principe de l'intégrateur est représenté à la figure 3.

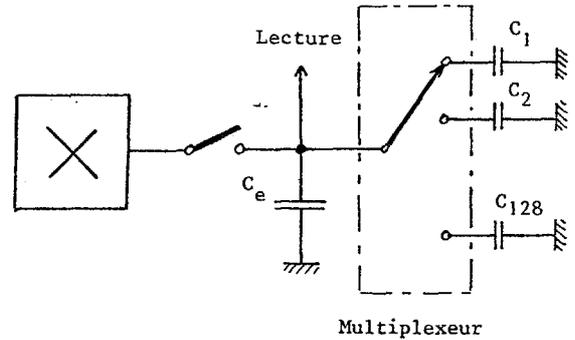


Figure 3 - Schéma de principe de l'intégrateur

L'échantillon à intégrer issu du multiplieur, est d'abord appliqué à la capacité  $C_e$  (comprenant la capacité d'entrée du multiplexeur en parallèle avec une capacité de transfert), alors que le multiplexeur est inhibé,  $C_e$  se charge à la tension de l'échantillon considéré. Puis,  $C_e$  est isolée du multiplexeur, pour être reliée à un condensateur  $C_i$  adressé par le multiplexeur. Il y a transfert de charge jusqu'à l'équilibre, et le cycle recommence avec un nouvel échantillon et le condensateur  $C_{i+1}$ .

Soient,  $T$  la période d'adressage d'un condensateur d'intégration  $C_i$ , et  $E$  une tension continue issue du multiplieur, la tension aux bornes de  $C_i$  sera :

$$U(t) = E \left\{ 1 - \exp \left[ - \frac{t}{T} \log \left( \frac{C_e}{C_i} + 1 \right) \right] \right\}$$

$$U(t) = E \left[ 1 - \exp \left( - \frac{t}{T_f} \right) \right]$$

D'où la constante de temps d'intégration

$$T_f = \frac{T}{\log \left( \frac{C_e}{C_i} + 1 \right)}$$

$$\text{et pour } C_e \ll C_i \quad T_f \approx T \frac{C_e}{C_i}$$



MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE

(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)

Pour une période d'adressage  $T$  fixée, la constante de temps dépend de la capacité  $C_e$ .

La lecture des cellules d'intégration est réalisée par un échantillonneur-bloqueur relié au point commun du multiplexeur par l'intermédiaire d'un amplificateur à grande impédance d'entrée. Le prélèvement des échantillons s'effectue à la fin de la phase transfert de l'intégrateur, c'est-à-dire après équilibre des charges. La fonction de corrélation obtenue à la sortie se présente sous la forme de 127 paliers correspondants aux 127 points du multicorrélateur. et peut être lissée par un filtre passe-bas. Les avantages présentés par ce principe d'intégration sont les suivants :

- la réponse de ce circuit est exponentielle en nombre de commutations, ce qui rend la précision de l'intégration indépendante de la fréquence d'échantillonnage du corrélateur.
- Il suffit d'un seul multiplexeur (réalisé au moyen de circuits intégrés) pour effectuer l'intégration et la lecture.
- Le réglage de la constante de temps d'intégration est réalisé simplement par la commutation d'un seul condensateur.

### 3 - PRESENTATION DE L'EQUIPEMENT-RESULTATS

Cet équipement a été conçu et réalisé dans le cadre d'un mémoire présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers (6). Son rôle est d'effectuer un filtrage adapté, par intercorrélacion du signal large bande  $y(t)$  émis par une source sonore immergée, avec le signal  $x(t)$  reçu sur un hydrophone placé à une distance  $d$  de la source.

Une vue d'ensemble de la maquette est représentée à la figure 5.

Les figures 6, 7 et 10 représentent les fonctions d'autocorrélacion  $C_{xx}(\tau)$  obtenues pour divers signaux présentés à l'entrée.

Les figures 8 et 9 représentent respectivement, les fonctions d'intercorrélacion  $C_{xy}(\tau)$  obtenues lorsque le signal émis  $y(t)$  est modulé en phase (PSK) et en fréquence (FSK). Le signal reçu  $x(t)$  étant préalablement filtré dans la bande 85 Hz-115 Hz.

### BIBLIOGRAPHIE

- (1) MAX J. , Méthodes et techniques de traitement du signal  
Paris, MASSON et Cie 1972.
- (2) BONNET G. , Sur les corrélateurs utilisant la quantification des signaux, cours d'été OTAN Marine Nationale, GRENOBLE, 1964.
- (3) ALLEN W.B. WESTERFIELD E.C. , Digital compressed time correlators and Matched Filters for Active Sonar, The Journal of the Acoustical Society of America, 36, n° 1, January 1964, pp 121-139.
- (4) TOURNOIS P. , Analyse spectrale et filtrage adapté des signaux basse fréquence, en temps réel et après compression de temps, l'Onde Electrique, XLIX, n° 511, Octobre 1969, pp 952-959.
- (5) BERGLUND C.N. , THORNER K.K. , A fundamental comparison of incomplete charge transfer in charge transfer device, Bell System Technical Journal, 52, n° 2, 1973, pp 147-182.
- (6) LE HARS J. , Multicorrélateur embarcable, mémoire présenté au Conservatoire National des Arts et Métiers - Centre Régional Associé de BREST, Juin 1978.



MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE

(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)

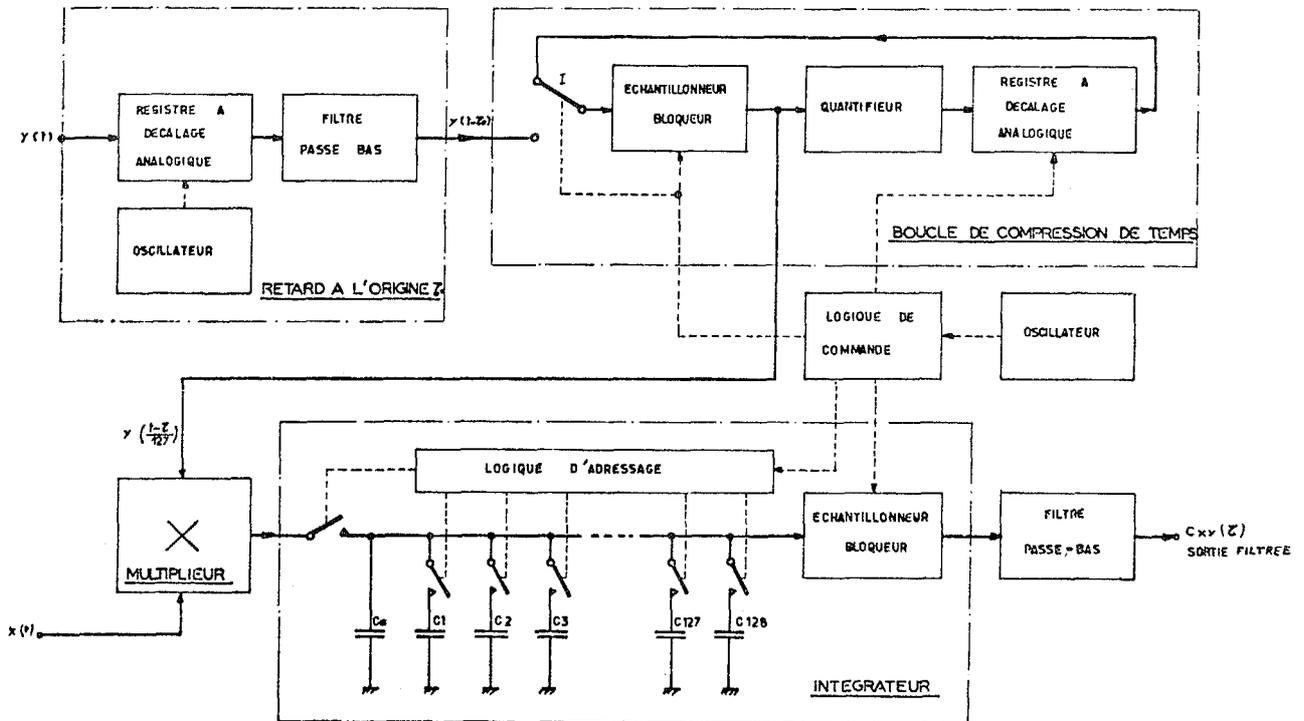


FIGURE 4 : SYNOPTIQUE GENERAL

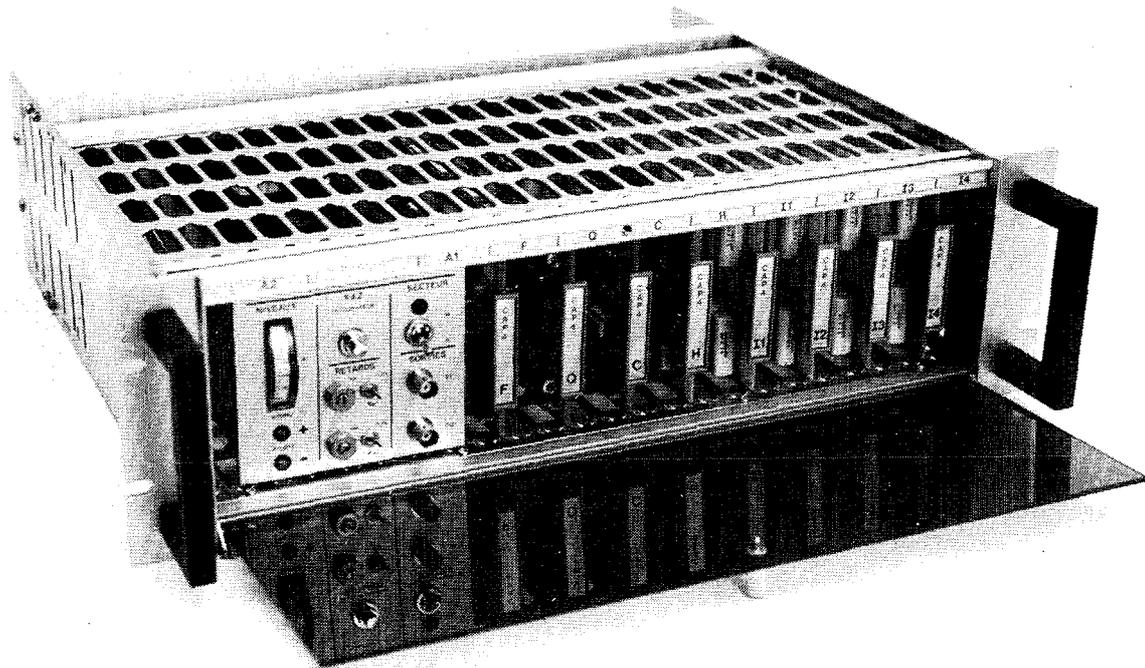
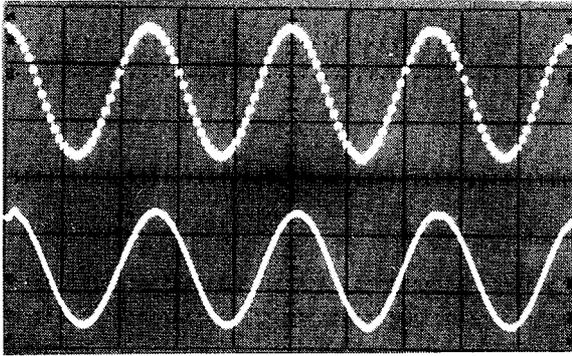


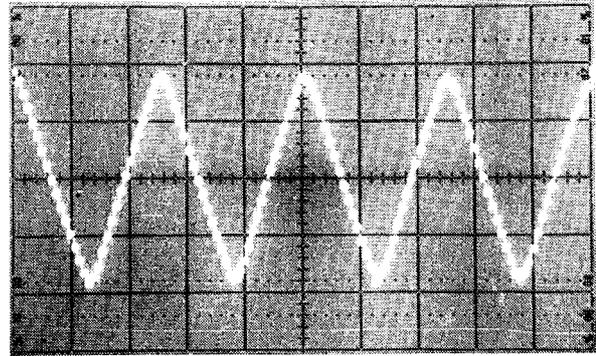
FIGURE 5 : VUE DE LA MAQUETTE

MULTICORRELATEUR BASSE FREQUENCE UTILISANT DES DISPOSITIFS A TRANSFERT DE CHARGE  
(LOW FREQUENCY REAL TIME CORRELATOR USING CTD)



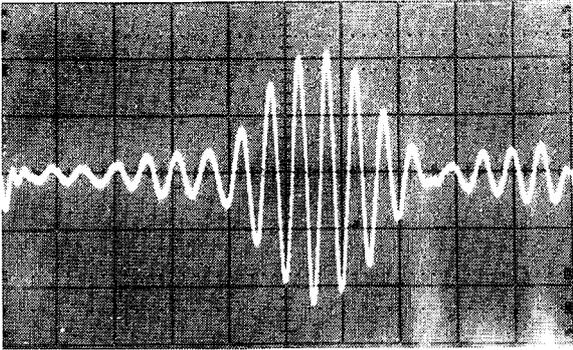
0 0,1s 0,2s  
Figure 6

$C_{XX}(\tau)$  { Trace sup. : non filtrée  
Trace inf. : filtrée  
(0,5 V/div)  
avec X(t) signal sinusoïdal ( $f_0 = 20$  Hz)  
T intég. : 2 s



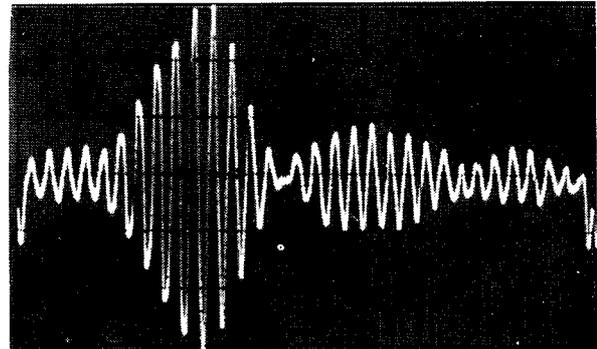
0 0,1s 0,2s  
Figure 7

$C_{XX}(\tau)$  non filtrée (0,5 V/div)  
avec X(t) signal carré ( $f_0 = 20$  Hz)  
T intég. : 2 s



0,2 s 0,3 s 0,4 s  
Figure 8

$C_{XY}(\tau)$  { X(t) Bande 85 Hz - 115 Hz  
Y(t) modulé PSK  $f_0 = 100$  Hz  
(0,1 V/Div)  $n = 6$  ;  $\theta = 40$  ms  
T intég. : 2 s

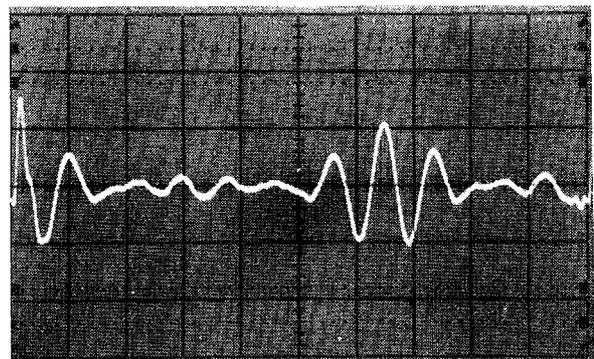


0,2 s 0,5 s  
Figure 9

$C_{XY}(\tau)$  { X(t) Bande 85 Hz - 115 Hz  
Y(t) modulé FSK  $f_1 = 90$  Hz ;  $f_2 = 110$  Hz  
 $n = \infty$  ;  $\theta = 20$  ms  
(0,05 V/div)  
T intég. : 3 s

Figure 10

$C_{XX}(\tau)$  filtrée (0,1 V/div)  
avec X(t) signal pseudo-aléatoire  
 $n = 7$  ;  $\theta = 1$  ms ; bande : 40 Hz - 70 Hz  
T intég. : 2 s



0 0,1s 0,2s