



LES CORRÉLATEURS AUTOMATIQUES EN TEMPS RÉEL

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'APPAREILS DE MESURE

par

Jacques MAX *

I. INTRODUCTION.

L'application des méthodes de corrélation à divers problèmes de traitement de signal et d'exploitation de mesures n'est pas nouvelle dans son principe. Il y a déjà plusieurs décennies que de nombreux savants, dans le monde entier, ont montré la richesse de cette méthode et les résultats remarquables que l'on était en droit d'en attendre, dans beaucoup de cas où, précisément, les méthodes classiques étaient en défaut.

Malheureusement jusqu'ici, à quelques rares exceptions près, il n'a guère été possible de dépasser le stade de la théorie, car il n'existait pas de dispositifs faciles à mettre en œuvre et permettant de mesurer avec une précision suffisante les fonctions d'auto et d'intercorrélation ; en particulier, il n'existait pas d'appareillages permettant de mesurer ces fonctions en temps réel, c'est-à-dire sans mise en mémoire préalable du signal à analyser.

II. MESURE DES FONCTIONS DE CORRÉLATION.

Mesurer une fonction de corrélation revient donc à mesurer $\frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t - \tau) dt = C(\tau)$ pour différentes valeurs de τ , en nombre suffisant, de manière à obtenir $C(\tau)$ sous forme d'une suite de valeurs $C(0), C(\tau_1), C(\tau_2) \dots C(\tau_m)$ en nombre suffisant, et pour des valeurs de τ convenablement réparties.

Jusqu'ici, sans moyens pour mesurer simultanément ces m valeurs de $C(\tau)$ correspondant aux m valeurs de τ , on devait se contenter de réaliser le décalage τ_K , de mesurer la valeur $C(\tau_K)$ puis de réaliser un autre décalage τ_j , de mesurer la valeur $C(\tau_j)$ et ainsi de suite.

Le décalage était alors réalisé par bande magnétique.

Si cette méthode, bien connue et très utilisée depuis de nombreuses années [1], donne entière satisfaction, elle est très lente. On sait que pour des signaux à bande étroite, donc en particulier pour des signaux basse fréquence, la durée d'intégration T

doit être très grande (plusieurs dizaines de minutes) ; il s'ensuit que le temps nécessaire à l'obtention de la fonction de corrélation devient rapidement prohibitif.

Il semble qu'il faille voir là les raisons essentielles qui font que cette méthode de traitement du signal n'a pas été appliquée jusqu'ici sur une grande échelle et n'a guère dépassé le stade du laboratoire, il faut bien le dire.

L'apparition de corrélateurs en temps réel, mesurant simultanément de nombreux points de la fonction de corrélation pour différentes valeurs du retard τ (jusqu'à 400 valeurs différentes), fait passer la méthode de corrélation dans le domaine industriel ; le corrélateur devient un appareil de mesure au même titre que bien d'autres, comme le sélecteur d'amplitude multicanaux par exemple.

Bien entendu, il ne peut être question de donner ici des justificatifs théoriques de ce qui sera dit ; nous renvoyons pour cela le lecteur à quelques ouvrages de base fondamentaux [4, 5, 6].

III. CORRÉLATEURS AUTOMATIQUES.

On voit facilement que, dans l'état actuel de la technique, l'opération la plus difficile à faire est l'opération de décalage qui transforme une fonction $y(t)$ en une fonction $y(t - \tau)$ retardée de τ .

Pour calculer simultanément un grand nombre de points de la fonction de corrélation correspondant à autant de retards différents, il faut réaliser simultanément chacun de ces retards.

Il est évidemment exclu de les réaliser par des moyens mécaniques (bande magnétique, etc...) car il n'est pas possible de réaliser commodément une boucle magnétique comportant plusieurs centaines de têtes de lecture !

Une réalisation analogique de ces retards n'est pas facile, pour le moment du moins, car les valeurs des éléments intervenant dans les cellules de retard sont essentiellement fonction du spectre du signal à retarder, et il n'est pas possible de faire varier à volonté le retard élémentaire introduit par chaque cellule.

Par contre, si le signal à retarder est mis sous forme numérique (donc par échantillonnage et quantification), il est facile de retarder les impulsions qui

* Ingénieur au Centre d'Étude Nucléaire de Grenoble.



représentent alors le signal. Cette opération se fait à l'aide du montage classique appelé registre à décalage (pris au sens large) qui se réalise aisément à l'aide de bistables à transistors, de mémoires à tores, de lignes à retard à magnétostriktion, etc. Il est à noter que le registre à décalage est un élément logique qui se prête bien à une réalisation en circuits intégrés.

Si l'on se rappelle aussi que la durée d'intégration T nécessaire pour obtenir une fonction de corrélation donnée est fonction, non pas comme on l'a souvent dit faussement, de la plus haute fréquence contenue dans le signal, mais de la largeur spectrale de ce signal, on remarque qu'il est intéressant de considérer deux cas.

— Les signaux très basse fréquence : ces signaux sont évidemment à bande étroite, il faut donc intégrer longtemps (plusieurs heures parfois) et il sera plus facile et plus sûr de faire cette intégration par des méthodes numériques.

— Les signaux à fréquence plus élevée : pour ces derniers, sauf cas tout à fait spécial, la largeur de spectre sera plus grande et on pourra se contenter d'une durée d'intégration beaucoup plus courte ; l'intégration pourra alors être remplacée par un filtrage passe-bas.

Ces remarques fondamentales ont conduit à l'étude et à la réalisation de deux types de corrélateurs, tous deux corrélateurs automatiques en temps réel.

IV. CORRÉLATEUR AUTOMATIQUE EN TEMPS RÉEL POUR SIGNAUX DE TRÈS BASSE FRÉQUENCE [0 A 100 Hz].

Le registre à décalage servant à retarder les signaux sur l'une des voies, ainsi que la mémoire d'intégration numérique sont réalisés à l'aide d'une mémoire à tores.

L'appareil connu sous le nom de sélecteur multicanaux étant déjà très utilisé en analyse statistique (mesure de densité de probabilité, extraction signal/bruit par accumulation de données, etc.) et comportant une mémoire à tores, avec les organes annexes nécessaires (visualisation, sortie numérique des résultats sur imprimante, bande perforée ou ruban magnétique) ce corrélateur se connecte à un sélecteur multicanaux pour en utiliser ces éléments.

La figure 1 montre d'une manière sommaire le fonctionnement de cet appareil, que nous allons expliquer succinctement [2] :

Les deux grandeurs $x(t)$ et $y(t)$ sont introduites dans deux convertisseurs analogiques-numériques.

A chaque instant d'échantillonnage, ces convertisseurs donnent de la grandeur analogique qu'ils reçoivent une valeur numérique qui correspond à la valeur de $x(t)$ et $y(t)$ quantifiée à 9 niveaux.

La valeur X_1 de $x(t)$ lors du premier échantillonnage est mémorisée dans le premier mot de la mémoire « mesure » ; l'échantillon suivant que nous

désignons par X_2 est mémorisée dans le 2^e mot de cette mémoire « mesure » et ainsi de suite jusqu'à l'échantillon X_N qui est placé dans le $N^{\text{ième}}$ mot de la mémoire.

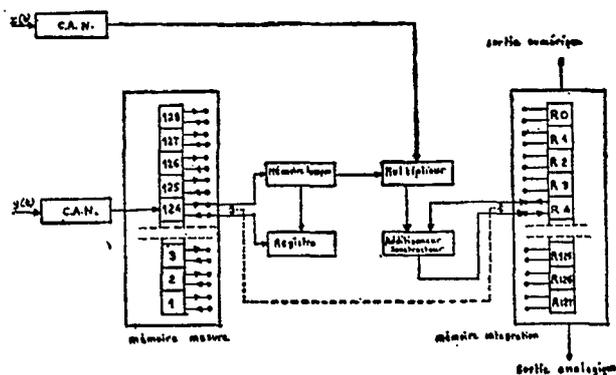


FIG. 1. — Schéma synoptique du corrélateur très basses fréquences.

On considère alors l'échantillon Y_N et on le multiplie par X_N , le résultat du produit est introduit dans le registre de rang 0 de la mémoire d'intégration, qui correspond au retard $\tau_0 = 0$.

Puis cette même valeur de Y est multipliée par X_{N-1} correspondant à la valeur de X lors de l'échantillonnage précédent ; le produit est rangé dans le registre de rang 1 de la mémoire d'intégration qui correspond au retard $\tau_1 = \tau_i$; en même temps X_N prend dans la mémoire « mesure » la place précédemment occupée par X_{N-1} ; il y a décalage. Y_N est ensuite multiplié par X_{N-2} et le produit introduit dans le registre de rang 2 de la mémoire d'intégration qui correspond au retard $\tau_2 = 2\tau_i$; X_{N-1} prend dans la mémoire « mesure » la place de X_{N-2} .

Ce cycle se répète jusqu'au produit de Y_N par X_1 , qui est introduit dans le registre de rang N correspondant au retard $\tau_N = (N - 1) \tau_i$ de la mémoire d'intégration ; la valeur X_2 prend alors la place de X_1 qui est évacuée.

On réalise alors un nouvel échantillonnage qui donne X_{N+1} que l'on introduit dans la mémoire « mesure » à la place laissée libre par le décalage de X_N et Y_{N+1} .

Le cycle d'opération recommence alors, le produit Y_{N+1} par X_{N+1} est ajouté au contenu du registre de rang 0 de la mémoire d'intégration... Le produit Y_{N+1} par X_2 est ajouté au contenu du registre de rang N de la mémoire d'intégration.

Ce cycle se répète jusqu'à la fin du calcul c'est-à-dire pendant la durée T des signaux considérés.

On voit donc que pour le calcul de N points de la fonction de corrélation correspondant à N retards différents, le cycle élémentaire comporte N multiplications, N additions, N décalages et un certain nombre de transferts ; c'est ce fonctionnement séquentiel qui limite la fréquence de fonctionnement de l'appareil, tout en en faisant la simplicité, évidemment. La rapidité du calcul est tributaire de l'opération la plus longue, qui est le cycle mémoire, dans l'état actuel de la technologie.

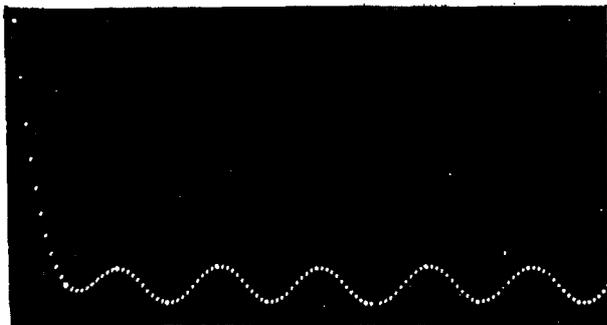


FIG. 2. — Fonction d'autocorrélation d'un signal sinusoïdal (5 Hz) noyé dans du bruit.

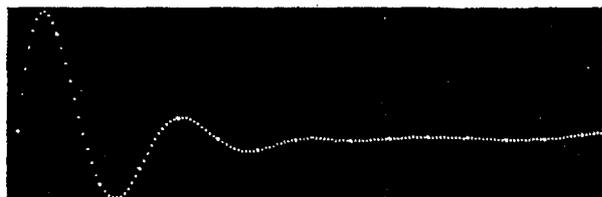


FIG. 3. — Réponse impulsionnelle d'un filtre du 2^e ordre obtenue par intercorrélation du signal d'entrée et du signal de sortie.

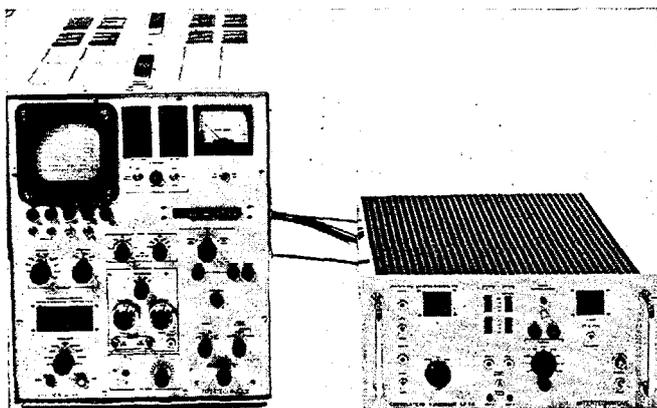


FIG. 4. — Corrélateur automatique en temps réel pour signaux très basses fréquences.

Les figures 2 et 3 représentent deux exemples d'applications et montrent comment sont visualisés les résultats.

La figure 4 représente l'appareil dans sa réalisation industrielle.

V. CORRÉLATEUR AUTOMATIQUE EN TEMPS RÉEL POUR SIGNAUX A FRÉQUENCES ACOUSTIQUES [10 Hz A 4 MHz].

Compte tenu des possibilités actuelles de la technologie, il nous a paru comme étant le plus avantageux de réaliser ici un corrélateur hybride.

Une des deux voies seulement (la voie à retarder) est échantillonnée et codée, de façon à permettre de réaliser aisément l'opération retard sur ces échantillons.

Étant donné la fréquence à laquelle doit pouvoir fonctionner l'appareil, il n'est pas possible de réa-

liser les N (100 à 400) multiplications avec un unique multiplicateur travaillant en séquence.

Chaque point j de la fonction de corrélation est traité par un circuit qui lui est propre et qui réalise la multiplication de $x(t)$ par $y(t - \tau_j)$ et le filtrage passe-bas du produit, de manière à réaliser la moyenne. La technologie actuelle (transistors à effet de champ) permet de réaliser un tel circuit d'une manière très simple, qui permet de le répéter N fois sans aboutir à un volume ou à un prix prohibitif.

L'intérêt majeur de cette conception est que l'on peut augmenter autant qu'on le veut le nombre de points de la fonction de corrélation calculés simultanément, sans augmenter la durée du cycle de travail, donc sans affecter la fréquence maximale de fonctionnement.

Principe de fonctionnement (Fig. 5), multiplication, intégration [3].

Nous avons retenu le principe du multiplicateur à découpage. La surface d'une impulsion modulée en largeur par un signal Y (par la méthode de conver-

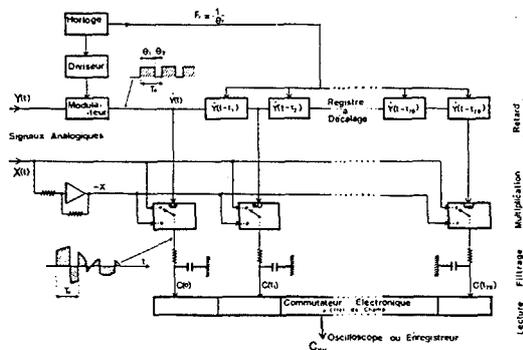


FIG. 5. — Principe de fonctionnement du corrélateur.

sion amplitude-temps par dent de scie) et en amplitude par un signal X est proportionnelle à XY . Ce procédé est ici facile à mettre en œuvre par le fait que nous disposons déjà, au moment de la multiplication, du signal Y sous forme échantillonnée.

Un commutateur à deux voies B et B' est commandé en A par des signaux rectangulaires de fréquence $1/T_e$ (T_e : période d'échantillonnage). La voie X est utilisée sous forme analogique; deux signaux $x(t)$ et $-x(t)$ en opposition de phase sont appliqués en B et B' . La sortie C du commutateur est connectée alternativement sur la position B durant le temps θ_1 et sur B' durant le temps θ_2 . Si $\theta_1 = \theta_2 = T_e/2$ et si le signal X varie peu durant T_e , la surface moyenne des impulsions en sortie est nulle. Les signaux introduits en A sont modulés en largeur de manière linéaire et symétrique :

$$\theta_1 = \frac{T_e}{2} + KY, \quad \theta_2 = \frac{T_e}{2} - KY, \quad \theta_1 + \theta_2 = T_e;$$

si

$$Y = 0, \quad \theta_1 = \theta_2 = \frac{T_e}{2};$$



si

$$Y > 0, \theta_1 > \theta_2.$$

$$Y < 0, \theta_1 < \theta_2.$$

On aura donc en C des impulsions de fréquence de récurrence F_c se décomposant en une impulsion

d'amplitude X et de largeur θ_1 et une impulsion d'amplitude $-X$ et de largeur θ_2 .

On montre facilement que la valeur moyenne de ces deux impulsions sur un temps T_c est $2KX(t_0)Y(t_0)$ qui est exactement le produit XY à l'instant t_0 .

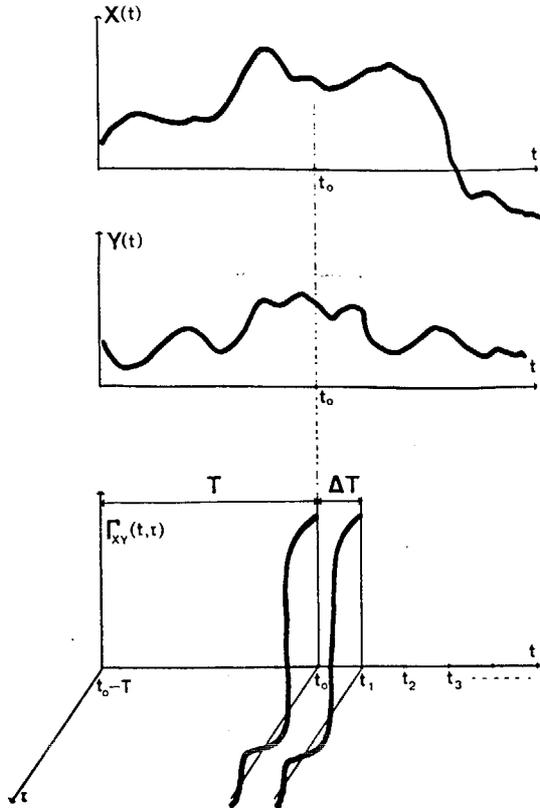


FIG. 6. — Fonction de corrélation Γ , calculée sur une durée T se déplaçant dans le temps.

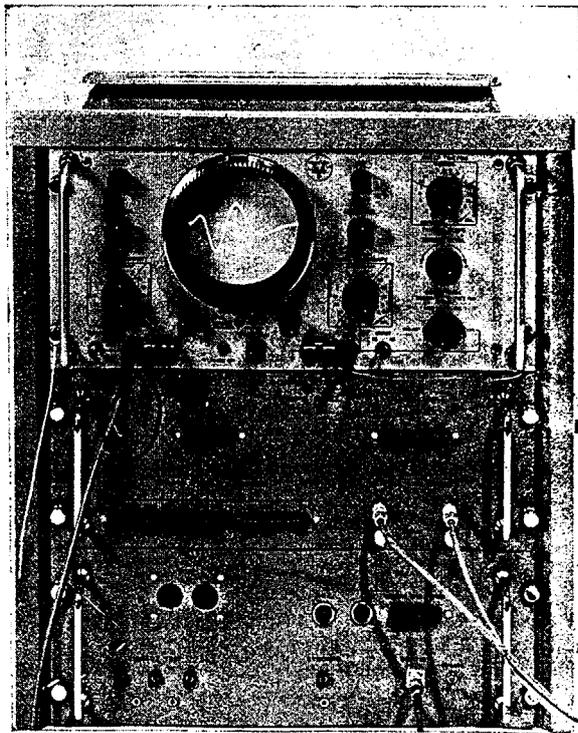


FIG. 7. — Corrélateur automatique en temps réel pour signaux à fréquences acoustiques.

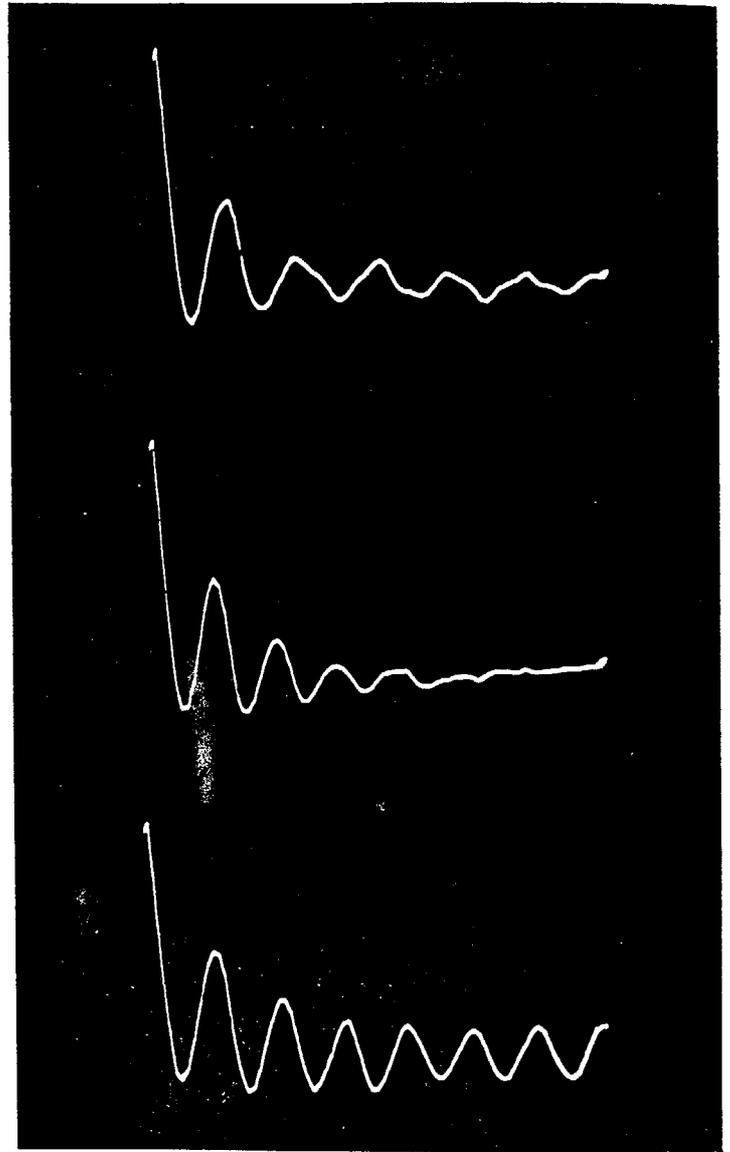


FIG. 8. — Fonction d'autocorrélation d'un électro-encéphalogramme (durée d'intégration 10 s). Cette figure met en évidence la variation du rythme α au cours du temps.

Si on calcule cette moyenne sur un temps $T > T_c$, on aura la valeur moyenne du produit XY pris sur une durée T .

Ce type de corrélateur donne donc en sortie la fonction de corrélation calculée sur une durée T se déplaçant dans le temps (Fig. 6). Il permet donc de visualiser les fonctions de corrélation de phénomènes « non stationnaires sur une longue durée », c'est-à-dire à « stationnarité locale ».

La figure 7 représente l'appareil complet.

La figure 8 donne un exemple de fonction d'autocorrélation ainsi mesurée ; il s'agit de la fonction d'autocorrélation d'un électro-encéphalogramme.



VI. CONCLUSION.

Ces deux types de corrélateurs semblent répondre très correctement aux besoins actuels, du moins tels qu'ils se manifestent à travers les désirs des utilisateurs. Mais, d'ores et déjà, est à l'étude un troisième type de corrélateur qui permettra de traiter des signaux dont le spectre pourra atteindre plusieurs dizaines de Mégahertz ; ceci pour des applications bien particulières actuellement, telles que les mesures sur les plasmas.

Pour conclure, donnons rapidement quelques exemples d'applications.

1) Identification de processus.

On sait que, si on excite un système linéaire avec un signal tel que sa fonction d'autocorrélation soit assimilable à une impulsion de Dirac, la fonction d'intercorrélation entrée-sortie est la réponse impulsionnelle du système (Fig. 9).

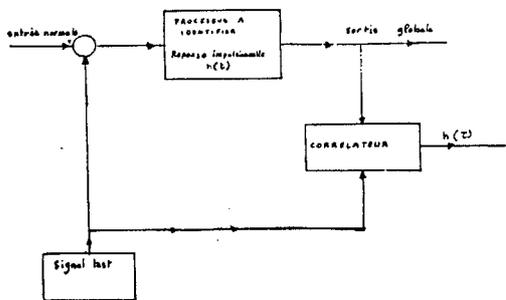


FIG. 9. — Identification du processus.

L'intérêt de cette méthode réside dans le fait qu'elle peut être utilisée sur le dispositif en fonctionnement normal.

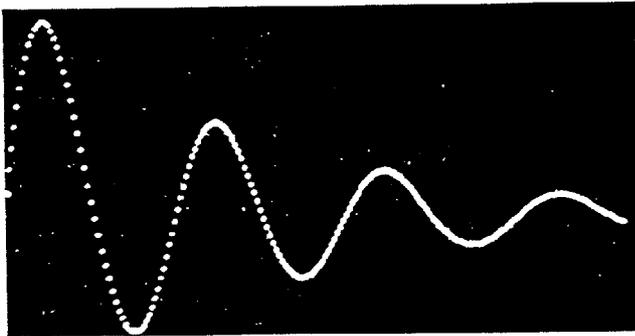


FIG. 10. — Fréquence de résonance du filtre : 5 Hz.

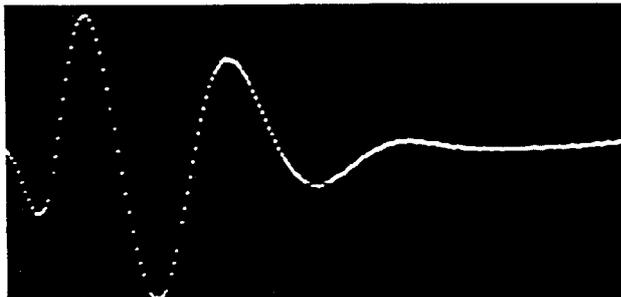


FIG. 11. — Réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bande 2 Hz — 2,5 Hz.

La figure 10 montre la réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bas du 2^e ordre, obtenue par cette méthode ; la figure 11 montre la réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bande à coupure raide (36 dB/octave).

Extraction d'un signal périodique noyé dans du bruit.

La figure 12 montre la fonction d'autocorrélation d'un signal périodique à 5 Hz noyé dans un bruit blanc 0,01 — 100 Hz avec un rapport signal/bruit d'environ — 60 dB, au bout de 30 mn d'intégration ;

La figure 13 donne le résultat après 9 h.

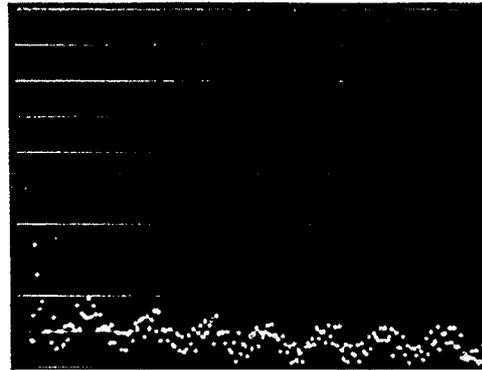


FIG. 12. — Fonction d'autocorrélation d'un mélange signal plus bruit, d'intégration 30 mn..

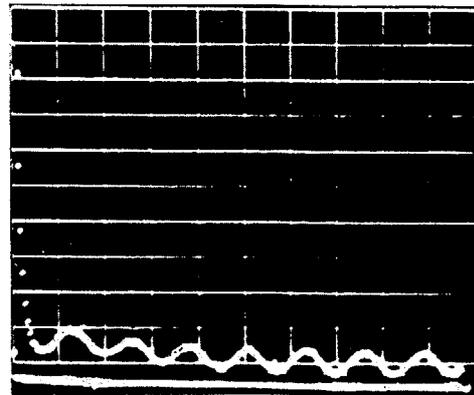


FIG. 13. — Fonction d'autocorrélation d'un mélange signal plus bruit, d'intégration 9 h.

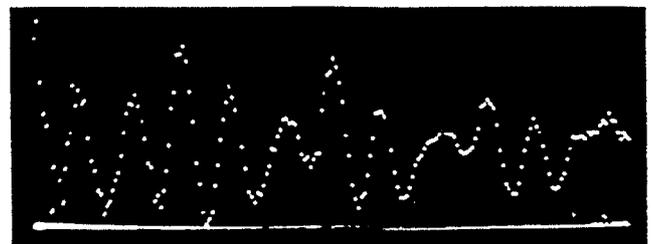


FIG. 14. — Fonction d'autocorrélation d'un signal vibratoire recueilli sur la suspension d'un trépan de forage.

2) Études de vibrations.

Là encore il s'agit essentiellement d'extraire un signal périodique noyé dans un bruit.



La figure 14 montre la fonction d'autocorrélation du signal recueilli sur un capteur de force, lié au vérin soutenant un trépan de forage. La fonction d'autocorrélation montre très nettement la fréquence de rotation (1,6 Hz) et la fréquence triple provenant des trois roulettes du trépan.

3) Étude de transmission de vibrations.

Considérons (Fig. 15a) un montage mécanique dans lequel un organe placé en A engendre des vibrations qui sont transmises jusqu'au point critique B. Pour pouvoir amortir les vibrations de l'élément B il est important de savoir comment sont transmises ces vibrations. On peut, par une étude *a priori*, présumer quels seront les chemins possibles.

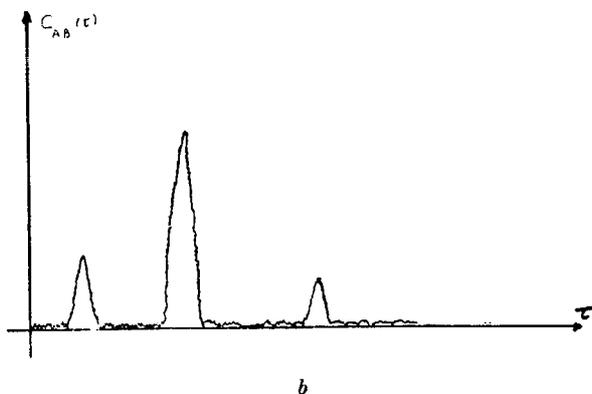
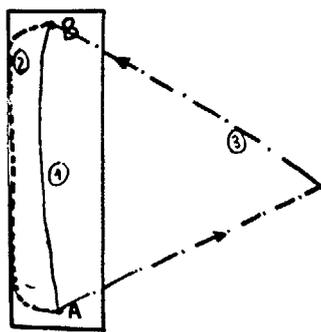


FIG. 15. — Étude de transmission de vibrations.

Supposons que dans le cas actuel, les vibrations puissent être transmises selon 3 chemins différents :

Chemin 1 : Les vibrations sont transmises par la masse du système.

Chemin 2 : Les vibrations sont transmises par la surface du système.

Chemin 3 : Les vibrations sont transmises acoustiquement par réflexion sur une paroi extérieure au système considéré.

On fait alors l'intercorrélation entre les signaux émis par un détecteur de vibrations placé en B et un détecteur analogue placé en A. Cette fonction d'intercorrélation (Fig. 15b) va montrer des maximums relatifs pour des retards τ_1, τ_2, τ_3 correspondant au temps de transmission des vibrations selon ces trois chemins. Comme on connaît, en gros, le temps de transmission des vibrations selon chacun des chemins, on pourra repérer auquel de ces trois chemins correspond chacun des trois pics ; l'influence de ce chemin est fonction de l'amplitude du pic sur la fonction de corrélation.

4) Étude d'électro-encéphalogramme.

La figure 16 montre la fonction d'autocorrélation d'un électro-encéphalogramme, et met en évidence le rythme α (bouffées de trains d'onde à une fréquence caractéristique d'environ 10 Hz).



FIG. 16. — Fonction d'autocorrélation d'un électro-encéphalogramme, temps d'intégration 10 mn.

RÉFÉRENCES

- [1] FAVRE et GAVIGLIO. Appareil analogique de mesures statistiques de la corrélation dans le temps. *Colloque sur la contribution de l'électronique au traitement statistique des mesures en physique*, Grenoble, (avril 1966) ; *L'onde électrique*, (octobre 1966), pp. 1056-1066.
- [2] MAX (I.), CHEVALIER (H.). Analyseur statistique. *Colloque sur la contribution de l'électronique aux méthodes de traitement statistique des mesures en physique*, Grenoble, (avril 1966) ; *L'onde électrique*, (octobre 1966), pp. 1045-1050.
- [3] BERTHIER (D.). Dispositif de calcul automatique de fonctions de corrélation pour signaux acoustiques. *Colloque sur la contribution de l'électronique aux méthodes de traitement statistique des mesures en physique*, Grenoble, (avril 1966) ; *L'onde électrique*, (octobre 1966), pp. 1067-1073.
- [4] LEE (Y. W.). *Statistical theory of communications*. J. Wiley (1960).
- [5] BENDAT (J.). *Principles and applications of random noise theory*. J. Wiley (1958).
- [6] BLANC-LAPIERRE (A.), PICINBONO (B.). *Propriétés statistiques du bruit de fond*. Masson (1961).