

# SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS



NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

---

CAPTURE AUTOMATIQUE, POURSUITE ET RECONNAISSANCE DE LA FORME D'UN SIGNAL PERIODIQUE TRES LARGEMENT VARIABLE EN FREQUENCE ET NOYE DANS LE BRUIT.

Self-capture, tracking and pattern recognition of a widely frequency varying and noise embeded signal

M. GIGNOUX

Laboratoire d'Electronique et de Technologie de l'Informatique  
Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble 85 X 38041 GRENOBLE CEDEX

---

## RESUME

Quand on ne dispose pas de référence locale synchrone du signal, le problème de la poursuite d'un signal périodique avec un filtre passe-bande sélectif à N chemins, se déplace vers celui de la capture du signal, si celui-ci est, soit noyé dans le bruit, soit largement variable en fréquence, soit les deux.

Lorsque la référence doit être créée à partir du signal même, il doit être très propre donc prélevé à la sortie du filtre. Ce rebouclage par la sortie pose alors le problème de l'amorçage du circuit, appelé "capture" du signal. Ce problème est souvent résolu en deux temps : la structure passe d'abord par une configuration apte à la capture, puis vient à une forme normale. La transition est délicate et instable.

Nous décrivons des dispositifs invariables dans le temps montés dans des filtres à N chemins, pilotés par la sortie, qui évitent ces inconvénients. Malgré et grâce au sacrifice d'une partie des caractéristiques de sélectivité, ces nouveaux dispositifs permettent, dans un domaine défini, dont il est discuté, d'étendre les possibilités d'extraction et de reconnaissance de forme d'un signal périodique, variable en fréquence et noyé dans le bruit.

## SUMMARY

When signal is embeded in noise, widely variable in frequency or both and when there are no references synchronised on the signal, the tracking of a periodic signal by the means of a N-Path selective band-pass filter is not a cumbersome problem if capture is done.

If the reference has to be created out of the signal itself it must be very neat, hence taken from the output, this feedback sets the problem of the capture of signal. This problem is often solved on two times with not a stable transition.

We describe time-invarying devices build up in N-Paths filters, fed by the ouput, which by-pass these drawbacks.

Thanks to the sacrifice of a part of selectivity characteristics these new devices allow, in a definite domain, to enlarge the possibilities of extraction and pattern recognition of a periodic signal, frequency varying and embeded in noise.



CAPTURE AUTOMATIQUE, POURSUITE ET RECONNAISSANCE DE LA FORME D'UN SIGNAL PERIODIQUE TRES LARGEMENT VARIABLE EN FREQUENCE ET NOYE DANS LE BRUIT.

## I. INTRODUCTION

L'extraction d'un signal noyé dans le bruit pose des problèmes qui sont en général résolus, lorsque le signal est sinusoïdal, à l'aide de procédés de détection synchrone. L'utilisation de filtres à N chemins qui sont assimilables à des détections synchrones multiples, permet d'étendre ces possibilités d'extraction aux signaux contenant des harmoniques. Dans tous les cas, il est nécessaire de disposer d'une référence locale, synchrone du fondamental du signal utile à observer ; la limite de sélectivité ne dépendant théoriquement alors, que du temps d'observation disponible.

Ceci n'est vrai que dans la mesure où le signal utile conserve pendant tout le temps d'observation une fréquence rigoureusement égale au signal local de référence. Si la loi de variation de la fréquence du signal est connue, il est encore possible d'établir une compensation en estimant cette variation, mais lorsque c'est cette loi de variation qui est sujet d'intérêt on n'a plus ce recours. Il faut alors, pour conserver la sélectivité, pour suivre le signal en synchronisant continuellement la référence locale sur le signal lui-même, ce qui n'est possible de manière précise que si ce signal est peu bruité ...

Il s'agit donc de disposer à la fois d'une structure de filtre permettant de le rendre suiveur et d'un dispositif permettant de synchroniser sa commande sur la fréquence du signal noyé dans le bruit.

Nous avons choisi d'utiliser un filtre à N chemins (FNC) pour réaliser le filtre suiveur en raison de la facilité et de la précision avec laquelle sa fréquence centrale peut être pilotée par une référence externe. Ce type de filtre présente en outre l'avantage d'être très sélectif, peu sensible aux valeurs des éléments, d'avoir une réponse en peigne et de ne pas déphaser les fréquences centrées sur les dents du peigne. Les FNC, dont la théorie est connue [1] depuis 1973, délaissés dans quelques domaines à cause de certains défauts technologiques [2] bénéficient d'un regain d'intérêt dû à l'accélération des progrès dans le domaine de l'intégration à grande échelle des portes analogiques, et de l'amélioration de leurs caractéristiques de vitesse (CMOS/SOS) et de diminution de résistance passante (V.MOS).

Dans cette communication, nous nous proposons de présenter les structures possibles de FNC (rapidement) puis les dispositifs de synchronisation habituels et celui que nous proposons, ainsi que leurs limites; enfin, à partir des résultats acquis nous évoquerons quelques possibilités en particulier dans la reconnaissance de signaux périodiques évoluant en fréquence et noyés dans le bruit.

## II. FILTRES A N CHEMINS (FNC)

Sous leur forme la plus générale les filtres à N Chemins (FNC) comprennent (fig. 1) une série de N commutateurs analogiques à l'entrée ( $P_1, P_2, \dots, P_N$ ), N réseaux de fonction de transfert  $H(\omega)$  et N commutateurs de sortie ( $Q_1, Q_2, \dots, Q_N$ ). On en voit en fig. 2 une représentation équivalente.

Cette forme de représentation permet une généralisation de la théorie; la pratique et la simplification nécessaire des expressions conduit à ne s'intéresser qu'à certains cas particuliers restrictifs:

- Les réseaux  $H(\omega)$  sont identiques, invariants dans le temps et asymptotiquement stables.

- Les commutateurs ont une résistance passante nulle quand ils sont fermés et infinie quand ils sont ouverts.

- Un seul commutateur "P" et un seul "Q" est branché à la fois à un instant donné.

- L'ordre dans lequel les commutateurs P et Q vont successivement commuter est invariable.

- Les deux commutateurs reviennent périodiquement à la même position avec une période T,

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}$$

- Les deux séries de commutateurs ne sont pas nécessairement en phase.

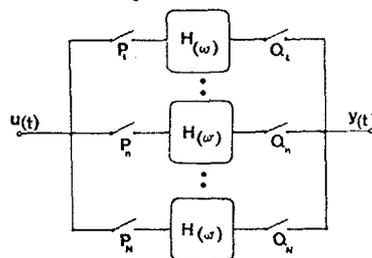


fig.1

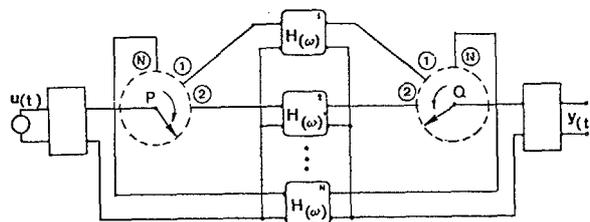


fig.2

Nous nous restreindrons de plus aux cas où chacun des commutateurs reste le même temps en position fermée. On a alors :

$$\frac{Y(t)}{u(t)} = \frac{N \sin^2 \frac{\pi}{N}}{\pi^2} H(s-j\omega_0) + H(s+j\omega_1) \quad (1)$$

$$\text{avec } \omega < \frac{N\omega_0}{2}$$

Le module de la fonction de transfert est donc un peigne et l'on retrouve  $H(\omega)$  dédoublée autour de chacune des positions de ce peigne. Il faut donc également faire quelques restrictions sur  $H(\omega)$  pour qu'il n'y ait pas de repliement du module de la fonction de transfert, de même qu'il est impératif de faire précéder l'ensemble du FNC d'un préfiltre passe-bas limitant la bande-passante du signal d'entrée à la moitié au plus de la fréquence d'échantillonnage  $f_e$  ( $f_e = 1/NT$ ).

Si on se limite au cas simple et pratique qui nous intéresse le FNC prend la forme de la fig. 3 et la formule (1) devient :

$$\frac{y(\omega)}{u(\omega)} = \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{\pi/N} \frac{1}{\text{NRC}(s-j\omega_0)+1} + \frac{1}{\text{NRC}(s+j\omega_0)+1} \quad (2)$$

l'expression ci-dessus est la fonction de transfert d'un filtre passe-bas périodisé en fréquence et dédoublé autour de  $\omega_0$  suivant une symétrie arithmétique ; d'où la représentation de la fig. 4 sur des axes linéaires et non logarithmiques.

La largeur à - 3 dB est de :  $BP_{-3dB} = \frac{2}{\text{NRC}}$  (3) et donc indépendante de  $\omega$ .

CAPTURE AUTOMATIQUE, POURSUITE ET RECONNAISSANCE DE LA FORME D'UN SIGNAL PERIODIQUE TRES LARGEMENT VARIABLE EN FREQUENCE ET NOYE DANS LE BRUIT.

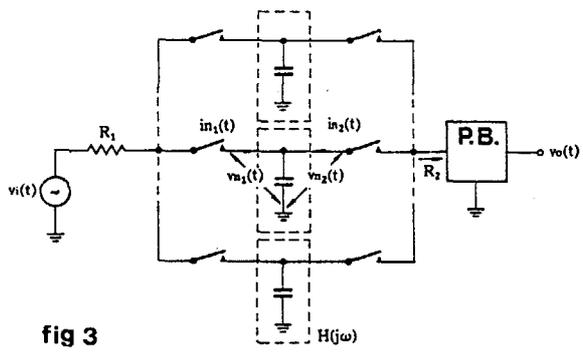


fig 3

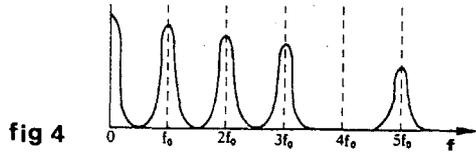


fig 4

Structures possibles

Nous avons vu fig. 3 une des structures possibles appelée structure "Série", la fig. 5 montre une autre disposition appelée "Shunt". On remarquera que la structure Shunt ne permet pas de réaliser de déphasage puisqu'il n'y a qu'un seul commutateur. Ceci mis à part, ces structures sont équivalentes dès lors qu'il est possible de négliger les effets des résistances passantes des commutateurs.

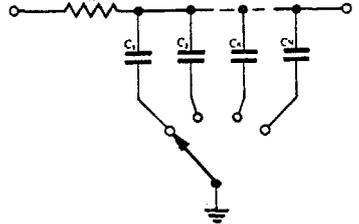


fig 5

Cependant, dans certains cas, il est nécessaire d'éviter les effets produits par la disparité des éléments et une autre structure équivalente a été proposée [3] dont le comportement lui vaut le nom de pseudo-N Chemins.

Ces trois structures peuvent être utilisées dans le dispositif proposé ; pour alléger les figures nous proposons de les représenter selon les figures 5a, 5b et 5c.

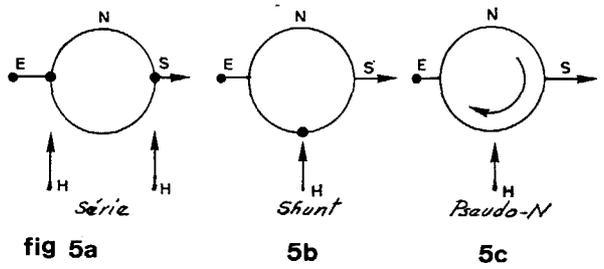


fig 5a

5b

5c

Dans chacune de ces figures H représente le signal de commande extérieur de la fréquence centrale et rappelle qu'il s'agit d'un signal logique ( $H = Nf_0$ ,  $f_0 = \omega_0/2\pi$ ) qui commande les commutateurs analogiques P et Q groupés sous forme de multiplexeurs à une entrée et N sorties.

Comme en général il s'agit de commuter simplement des capacités on appelle ces FNC particuliers des Filtrés à Commutation de Capacités ou FCC.

III. FILTRES SUIVEURS A N CHEMINS

Le signal qui pilote les multiplexeurs du FCC est un signal logique. Sa fréquence détermine la fréquence des raies du peigne. Il est donc facile de déplacer ces raies et en particulier de poursuivre un signal. Deux dispositions sont possibles :

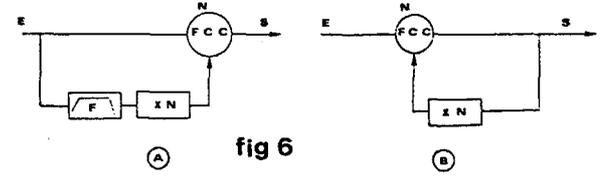


fig 6

En A le signal est prélevé en "amont" du FCC puis il est grossièrement filtré en F, enfin il est multiplié par N avant de piloter le FCC.

En B le signal n'a pas à être filtré il passe d'abord dans le FCC. En "aval" du FCC on espère recueillir un signal suffisant pour actionner un multiplieur par N qui commande le FCC. En régime établi tout le signal utile passe à travers le FCC et le multiplieur est correctement attaqué. Il y a donc dans le cas B une phase de "recherche" puis une phase de "capture" du signal.

III 1 Suiveur "Amont".

Voir fig. 7. Sur une voie, le signal d'entrée contenant le signal utile de fréquence fondamentale  $f_0$ , passe dans le FCC. Sur une autre voie, il est dirigé vers un filtre F passe-bande centré sur  $f_0$ . Puis un multiplieur de fréquence (M) multiplie ce fondamental par N (N étant le nombre de positions du FCC). La fréquence  $Nf_0$  produite par M sert à piloter les N pas du FCC.

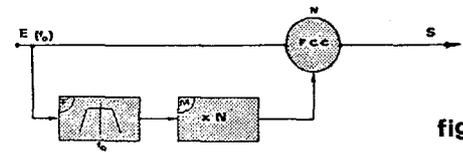


fig 7

Au départ, en l'absence de signal utile à l'entrée, on n'a théoriquement aucun signal en sortie, le FCC n'est pas piloté, ou bien piloté par un signal quelconque.

En appliquant à l'entrée un signal périodique  $f$ , de fondamental  $f_0$ , celui-ci passe à travers F et se trouve multiplié par N dans le multiplieur M. La fréquence  $Nf_0$  issue de M vient actionner cette fois le FCC à une fréquence qui n'est plus quelconque par rapport à  $f_0$ .

En maintenant le signal périodique  $f$  à l'entrée, les N capacités se chargent progressivement avec la constante  $\alpha = RC$  de chaque cellule. Pour que le filtre "réponde" il faut donc maintenir le signal à l'entrée pendant un temps suffisamment grand devant  $\alpha$ .

Si la fréquence  $f$  change, le multiplieur maintient  $Nf_0$  à sa sortie. Les propriétés de poursuite dépendent donc des caractéristiques du multiplieur. Avec un multiplieur idéal la poursuite est instantanée, dès que le signal  $f$  est présent à son entrée.

Discussion

Les phénomènes indésirables (bruit) qui se superposent au signal périodique d'entrée se retrouvent sur la voie multiplication et sont multipliés.

D'où la nécessité de disposer un filtre F devant le multiplieur M. Ce filtre va limiter la plage de poursuite de l'ensemble. Plus on exigera une plage de



poursuite étendue, plus il faudra un filtre large et plus on risquera une "agitation" en phase importante en sortie (jitter).

C'est donc une affaire de compromis entre plage de poursuite et bruit, et il est difficile d'en donner une évaluation chiffrée. Cependant, on peut estimer domage d'utiliser un FCC à Q élevé et d'accepter par ailleurs un bruit en phase élevé. Donc, à priori, F est un filtre déjà sélectif et la plage de poursuite est étroite.

Un FCC à poursuite amont ne sera donc utilisé que pour des signaux périodiques dont la fréquence s'écarte peu d'une valeur connue (par ex. le secteur à 50 ou 60 Hz ou bien le 400 Hz).

### III 2 Suiveur Aval

Voir fig. 8. Par rapport au synoptique du FCC Amont on observe que :

- l'entrée du multiplieur est prise en AVAL du FCC,
- le filtre sur la voie multiplieur est un passe-bas au lieu d'un passe-bande et sa fréquence de coupure est à  $Nf_0$  au lieu de  $f_0$ .

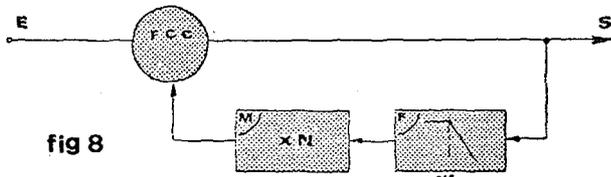


fig 8

#### Interêt de cette disposition

Le fonctionnement est semblable à celui de FCC AMONT en ce sens que pour générer la fréquence  $Nf$  qui pilote le FCC proprement dit, on utilise la fréquence d'entrée  $f$  elle-même. C'est la condition nécessaire à une poursuite rigoureuse.

C'est le FCC lui-même qui filtre le signal à partir duquel est fabriqué le multiple qui sert à le commander. Si ce bon tour est réalisable, on voit que la plage de poursuite est théoriquement INFINIE. Dans la pratique, elle est limitée :

- par la plage du multiplieur, mais celle-ci peut être assez large avec un multiplieur à boucle à verrouillage de phase (BVP),
- par le passe-bas, que l'on devra mettre quand même devant le multiplieur ne serait-ce que pour "lisser" la sortie du FCC qui se présente sous forme de petites marches d'escalier, mais ce filtre peut être très lâche,
- par le système de "démarrage" ou de "capture" du signal. En effet au départ un signal de fréquence inconnue n'a aucune chance de se retrouver en sortie, le filtre étant très sélectif.

#### Systemes de capture

Pour qu'il y ait capture avec un FCC AVAL, il faut et il suffit qu'à un moment donné la fréquence à poursuivre apparaisse en sortie à un niveau suffisant pour exciter le multiplieur. Différentes techniques peuvent être envisagées :

- Par rampe : dans la période d'attente qui précède l'apparition de  $f$  à l'entrée, le multiplieur est excité par une fréquence variable qui balaye, en suivant une rampe toute la plage de capture. Quand la fréquence du FCC coïncide avec  $f$  le système capture le signal, on débranche alors le générateur de rampe. La transition est délicate et instable.
- Par réseau de filtres : plusieurs FCC mis en parallèle sont attaqués par le même signal d'entrée. Leurs fréquences étant décalées d'une largeur de

filtre, il y en a toujours une pour capturer puis poursuivre. La présence d'un signal en sortie sur l'une entraîne les autres. Ce système est très encombrant.

- Par mesure de phase : un FCC ne déphase pas la fréquence sur laquelle il est centré. On peut donc prévoir un système qui se débranche quand la phase s'annule, c'est-à-dire une fois la capture effectuée. Par exemple, sur un FCC Shunt on agira sur  $R$  donc sur la largeur du filtre.

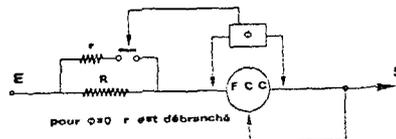
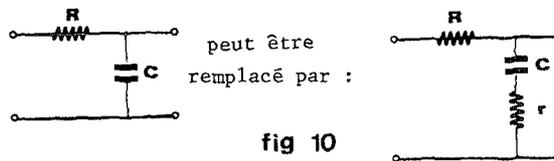


fig 9

- Par réarmement périodique : périodiquement on branche  $r$  c'est-à-dire on élargit le filtre. Mêmes inconvénients que pour la rampe.

Nous voyons cependant que pour éviter la circuiterie annexe, il faut accepter de diminuer les qualités du FCC hors bande et agir sur la nature des réseaux commutés. Ainsi le classique réseau RC :



la résistance  $r$  est appelée résistance de "pied".

Ce simple ajout permet la capture et participe à la poursuite.

#### Capture par "pied" ou piedestal

Une solution entièrement passive est préférable pour éviter à la fois une circuiterie annexe et une transition brusque entre la phase "recherche" (avant capture) et l'état "après capture".

Il est plus rassurant quant au fonctionnement de disposer d'un système où la forme des dents de peigne n'évolue pas au cours de la transition de capture. Ce qu'il faut absolument, c'est conserver la finesse des dents tout en laissant passer une partie du signal. Le spectre en fréquence de l'ensemble doit donc être idéalement de la forme :

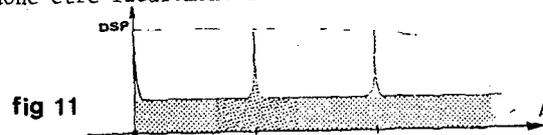
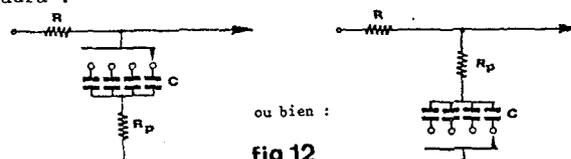


fig 11

où le gabarit du peigne est superposé à une sorte de piédestal.

Le signal passe bien (du moins en partie) pour toutes les fréquences, dont celles de la plage de capture ; il passe en totalité aux emplacements des dents.

Ceci peut être obtenu simplement en ajoutant une résistance ( $R_p$ ) au point de concours des capacités. Par exemple, pour un FCC Shunt à résistance commune, on aura :



Pour réduire le bruit qui passe ainsi vers les fréquences hautes, on peut limiter le piédestal, en disposant une capacité  $C_p$  en parallèle sur  $R_p$  :

CAPTURE AUTOMATIQUE, POURSUITE ET RECONNAISSANCE DE LA FORME D'UN SIGNAL PERIODIQUE TRES LARGEMENT VARIABLE EN FREQUENCE ET NOYE DANS LE BRUIT.

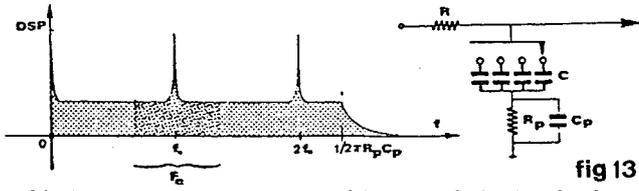


fig 13

L'idéal est de limiter ce piédestal à la bande de poursuite autour de  $f_0$  ( et de ses harmoniques).

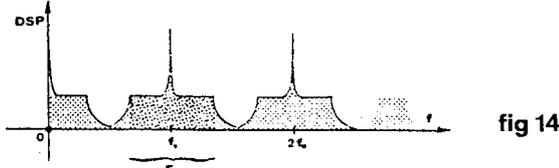


fig 14

Ceci peut s'obtenir de la manière suivante :

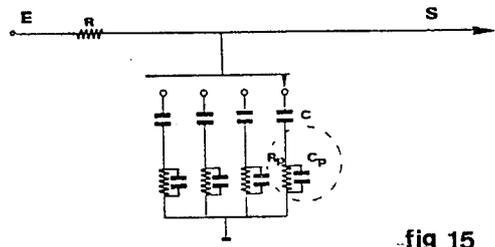


fig 15

Procédé qui s'applique à tous les types de FCC. Il suffit de modifier l'allure de chaque réseau périodisé par la commutation.

Fonctionnement

En l'absence de signal à l'entrée, le FCC se positionne sur  $f_0$  au milieu de la plage de capture:  $F_c$ .

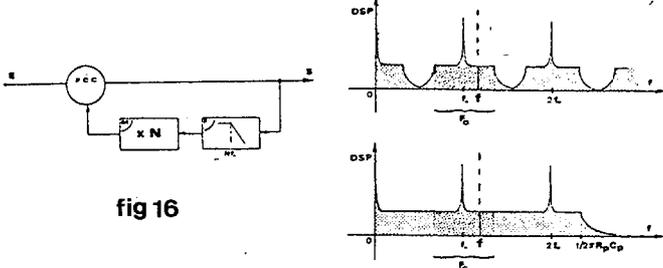


fig 16

Lorsque le signal à capturer se présente, une partie se retrouve en sortie grâce au pied. Le multiplicateur évolue de  $Nf_0$  vers  $Nf$ , et le FCC se centre surflaissant passer la totalité du signal. Ce processus n'est pas immédiat, premièrement parce que le multiplicateur est excité au départ par un signal de faible amplitude et bruité, et ensuite, parce qu'il faut un certain temps pour charger les capacités. D'autres facteurs interviennent tels que les caractéristiques de phase de la boucle de retour qui comprend le multiplicateur.

Plage de capture

La plage de capture est au plus égale à celle de la BVP. Le pied, en particulier le pied "échantillonné" devra avoir une largeur  $F_p$  plus grande que la plage de capture  $F_c$  de la BVP.

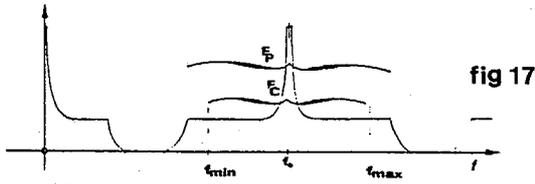


fig 17

Les motifs ne doivent pas se recouper Il faut donc  $F_p < F_{min}$ .

$F_L$ ,  $F_p$  et  $\frac{F_{min}}{2}$  sont les trois critères qui détermi-

nent la plage de capture maximum qui devra en fait être celle de la BVP ( $F_c$ ).

On devra avoir :  $F_p < F_{min}$  pour éviter le recou-  
pement  
:  $F_p > 2 F_c$  Pour assurer la capture  
en cas de changement  
de  $f$ .

d'où :  $2 F_c < F_p < F_{min}$

IV RESULTATS

Les possibilités de ce type de filtre dépendent du gabarit déterminé par le rapport signal à bruit à l'entrée. Plus ce rapport est favorable moins il est nécessaire d'avoir un "pied" important. De même vis à vis de la plage de capture. Il est donc difficile de caractériser ce type de filtre par une sorte de facteur de qualité. Cependant l'exemple illustré par les fig. 61 et 62 donne une idée des possibilités offertes.

Dans cette exemple le filtre est du type Shunt (pied non échantillonné) avec  $N = 32$ .

- NRC = 7 secondes  $BP_{3dB} = 0,29 \text{ Hz}$
- pied = -40 dB
- $f_0 = 400 \text{ Hz}$
- plage =  $\pm 10 \%$  de  $f$ .

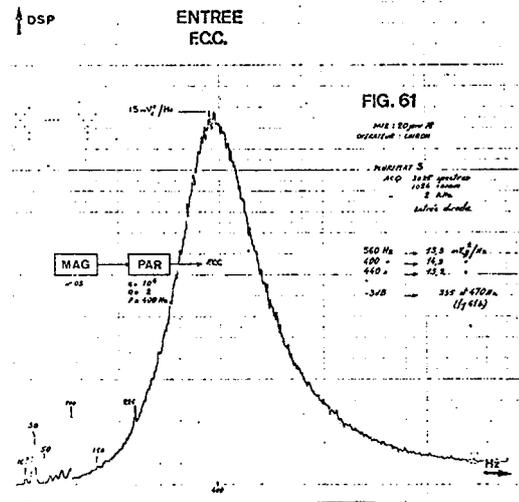


FIG. 61

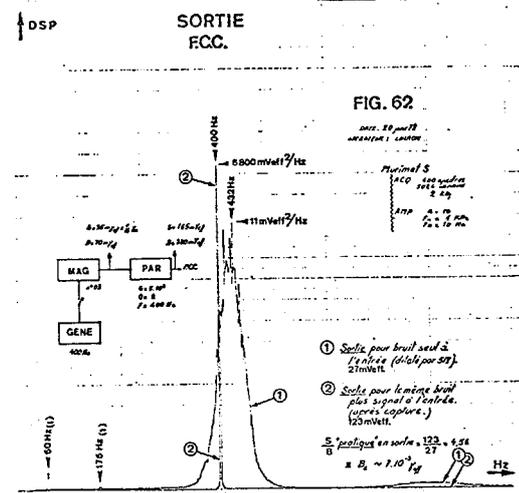


FIG. 62

Pour un bruit à l'entrée centré sur  $f_0$  (fig. 61) d'une valeur efficace double de celle du signal (sinusoïdal) le rapport signal à bruit à la sortie est



CAPTURE AUTOMATIQUE, POURSUITE ET RECONNAISSANCE DE LA FORME D'UN SIGNAL PERIODIQUE TRES LARGEMENT VARIABLE EN FREQUENCE ET NOYE DANS LE BRUIT.

supérieur à 20 après la capture qui s'effectue en moins de 2 secondes.

Avec un filtre série et pied échantillonné on pourrait espérer des résultats encore meilleurs. Un tel filtre a été réalisé, centré sur 2 KHz avec une plage de  $\pm 30\%$  ; pour un rapport S/B de 1/4, le signal est capturé en moins de 7 secondes et présente un rapport S/B meilleur que 15.

Différents essais ont été effectués avec des signaux sinusoïdaux, rectangulaires, triangulaires et en dent de scie, dans les plages de 50 % autour de  $f_0$ , mélangés à des bruits bien caractérisés, en faisant varier la structure du filtre (série ou Shunt), le nombre de chemins (entre 8 et 128) et le motif du pied (échantillonné ou non).

Il est assez simple de vérifier sur un analyseur de spectre le comportement statique dans chaque cas, par contre un simulateur de signal est nécessaire pour conduire les essais dynamiques. La structure Shunt, plus simple, suffit dans tous les cas où il n'est pas demandé de réaliser un déphasage ou un délai [4] ; cependant il faut alors tenir compte de la résistance passante des commutateurs dans l'évolution du pied.

Le nombre de chemins nécessaires n'est pas seulement conditionné par le rang des harmoniques que l'on veut laisser passer vers la sortie mais aussi par la vitesse de poursuite souhaitée qui est limitée par le passe-bas mis devant le multiplieur (cependant certains artifices sont possibles).

La "hauteur" du pied intervient sur le délai de capture, sa "largeur" sur la plage de capture mais l'utilisation d'une CAG permet d'améliorer ces performances pour un gabarit donné.

Dans le cas où il est nécessaire de réaliser un déphasage tout en utilisant un pied échantillonné il faut disposer de trois multiplexeurs.

Il n'est évidemment pas possible de rendre compte de chaque cas. Une analyse théorique a été tentée mais n'est pas achevée ; elle s'avère pour l'instant trop lourde pour être vraiment utile, sauf dans quelques cas très particuliers.

Les limites d'utilisation de ces filtres sont imposées par l'état de la technologie des portes analogiques c'est-à-dire grossièrement à des signaux utiles de quelques centaines de mV à l'entrée et de fréquence inférieure au MHz.

### Détection

La fig. 62 montre qu'en l'absence de signal à l'entrée le FCC est soumis à une forte agitation (courbe 1) et laisse passer vers la sortie une part importante de bruit. Si l'on se propose de détecter la présence ou l'absence d'un signal caché dans le bruit ce comportement est gênant quand bien même le signal est bien filtré lorsqu'il est présent (courbe 2).

Pour palier cet inconvénient diverses solutions existent, elles s'apparentent à la reconnaissance de forme, un synoptique de l'une de ces solutions est donné fig. 18.

Schéma synoptique :

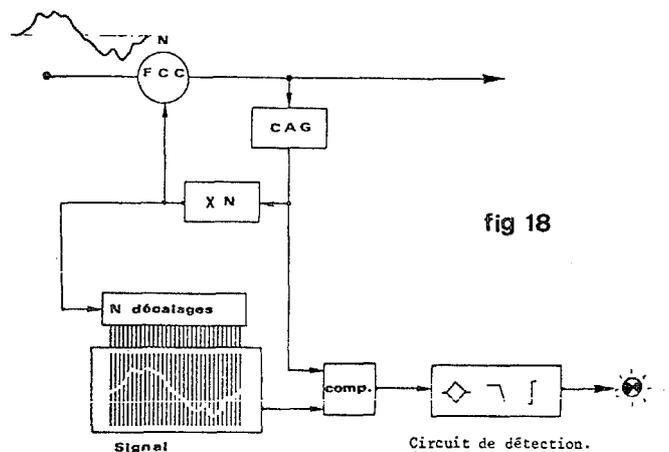
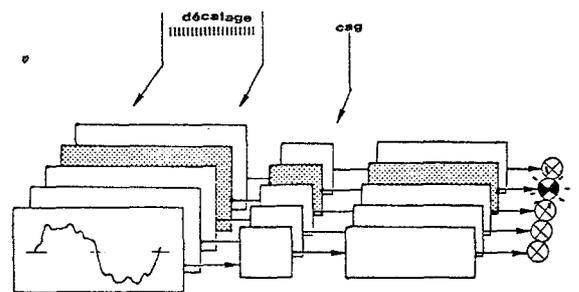


fig 18

Si l'on dispose plusieurs fac-similés de signaux :



On peut reconnaître un signal parmi ceux de cette "bibliothèque"

### CONCLUSION

Nous avons montré qu'il est possible d'extraire un signal périodique noyé dans le bruit, même si la durée de sa période varie dans de larges proportions, pour l'amener à un rapport signal à bruit permettant de reconnaître sa forme. Ces réalisations ont trouvé leurs applications en magnétométrie et vont être appliquées à la magnétoéllurie mais pourraient être appliquées en acoustique ou en médecine. L'intégration complète de ces filtres est envisagée, de nouvelles études ont montré qu'il était en effet possible d'envisager des structures réduisant la valeur des capacités.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L.E. Franks, "N-Path Filters" in Modern Filter Theory and Design, G.C. Temes and S.K. Mitra. Eds. New York : Wiley, 1973, Ch. 11.
- [2] A. Fettweiss and H. Wupper "A solution to the balancing problem in N-Path Filters", IEEE Trans. Circuit Theory (Corresp.), May 1971
- [3] H. Wupper "A Modified N-Path Filter Suited for Practical Realisation" IEEE Tans. on Circuits and Syst. Vol. cas 21, N°3 May 1974.
- [4] F.L.J. Sangster and K. Teer, "Bucket-brigade electronics, new possibilities for delay, time-axis conversion, and scanning" IEEE J. Solid-State Circuits, June 1969.