

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

CONCEPTION D'UN ENSEMBLE MODULAIRE DE
TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL

J. LIENARD

CEPHAG (Equipe de Recherche Associée au CNRS) B.P. 46, 38402 ST. MARTIN D'HERES

RESUME

On indique les motivations (vitesse de calcul, facilité de mise au point) qui ont conduit à construire, pour la simulation en temps réel d'algorithmes de traitement et leur exploitation en laboratoire, un ensemble modulaire utilisant une transmission de l'information sous forme série à format variable.

L'analyse des besoins spécifiques du traitement du signal et la souplesse désirée justifient le choix des fonctions de base de l'ensemble. Celles-ci se divisent en fonctions arithmétiques, mémoires et gestions. Leur description montre l'influence sur leur conception du choix de la transmission série, ainsi que la faculté du système à faire évoluer la précision de la représentation des nombres au cours d'un même traitement.

On décrit quelques exemples d'application typiques qui montrent la puissance du système.

SUMMARY

We outline the motivations (computation speed, adjusting facilities) which lead us to build up a modular device utilising serial transfert of data with adjustable format, for the real time simulation of processing algorithms and their laboratory exploitation.

The analysis of the specific requirements of signal processing and the desired flexibility justify the choice of the basic functions of the device. These functions may be divided into arithmetical functions, memories and controls. Their description shows the influence of the choice of the serial transfert on their conception, as well as the ability of the system of varying the precision of the representation of numbers during a same process.

Some examples are given of typical applications, showing the performances of the system



CONCEPTION D'UN ENSEMBLE MODULAIRE DE TRAITEMENT NUMERIQUE
DU SIGNAL.

J. LIENARD

1.- INTRODUCTION

L'ensemble modulaire décrit ici a été étudié dans le but d'aider les chercheurs d'un laboratoire de Traitement du Signal dans leurs dépouillements de grande quantité de signaux et dans leurs expérimentations d'algorithmes nouveaux sur des signaux réels.

Depuis quelques années déjà, le Traitement du Signal ne peut plus se contenter des techniques analogiques et s'est orienté vers le numérique, dont les avantages bien connus sont essentiellement la possibilité d'introduire facilement des retards et sa grande précision qui permet l'accumulation d'un grand nombre de valeurs et la réalisation de fonctions compliquées de façon parfaitement reproductible, sans réglages délicats.

Les techniques numériques peuvent être mises en oeuvre sur un ordinateur d'usage général ou sur des appareils spécialisés. L'utilisation d'un ordinateur heurte à deux problèmes : vitesse de calcul insuffisante due à sa structure trop séquentielle et mise au point difficile à cause du manque de contrôle du déroulement du programme. Pour y remédier, certains constructeurs proposent des mini-ordinateurs dont la vitesse de calcul est augmentée par microprogrammation de fonctions souvent rencontrées (produit scalaire, transformée de Fourier...) couplés à des unités de visualisation des blocs de données.

Ce type d'appareil à l'inconvénient de ne travailler commodément que sur des données structurées en blocs.

Une autre façon d'introduire le numérique est de réaliser des appareils spécialisés dans une fonction bien définie, dans une technologie rapide en logique câblée ou microprogrammée. Ils peuvent être des appareils de mesures autonomes possédant leurs propres systèmes d'acquisition du signal et de visualisation, comme des analyseurs de spectre ou des corrélateurs. La vitesse de traitement peut alors être très grande, mais le coût d'une telle réalisation et les difficultés d'étude et de mise au point ne justifient pas pour le test d'un algorithme ou pour un traitement de courte durée. De plus le développement de telles techniques amène à juxtaposer des appareils numériques et, puisqu'il n'est pas souhaitable de multiplier les conversions entre numérique et analogique, il se pose le problème souvent difficile d'interconnexion numérique. La solution qui consiste à coupler tous ces appareils à un même calculateur n'est pas entièrement satisfaisante, car elle réintroduit certains des inconvénients de celui-ci.

C'est pour répondre aux besoins de vitesse de calcul et de facilité d'utilisation ressentis par les expérimentateurs que nous avons étudié un ensemble numérique modulaire qui voudrait apporter les avantages du numérique tout en conservant la facilité d'interconnexion et de contrôle de l'analogique.

2.- CHOIX DE LA STRUCTURE DU DISPOSITIF

2.1. Cet ensemble modulaire est surtout

destiné à effectuer les calculs simples mais très répétitifs qui apparaissent en amont des chaînes de Traitement du Signal: filtres, convolution, corrélation...

Ces calculs sont essentiellement constitués de produits et de sommes et peuvent se décrire par des opérations vectorielles ou matricielles. Nombres d'opérations portent sur un vecteur glissant contenant les derniers échantillons du signal.

- Les besoins en précision de calcul sont extrêmement variables. Des signaux d'entrée bruités peuvent être présentés sur quelques bits ; par contre un intégrateur ou un système récursif peut nécessiter plusieurs dizaines de bits. Il est donc très utile de pouvoir faire varier facilement le nombre de bits de représentation des valeurs, et ce entre les différentes phases d'un même traitement : Cela nécessite donc de pouvoir faire varier la précision des opérateurs, d'utiliser des mémoires reconfigurables et de disposer d'un système de transmission des informations à format variable.

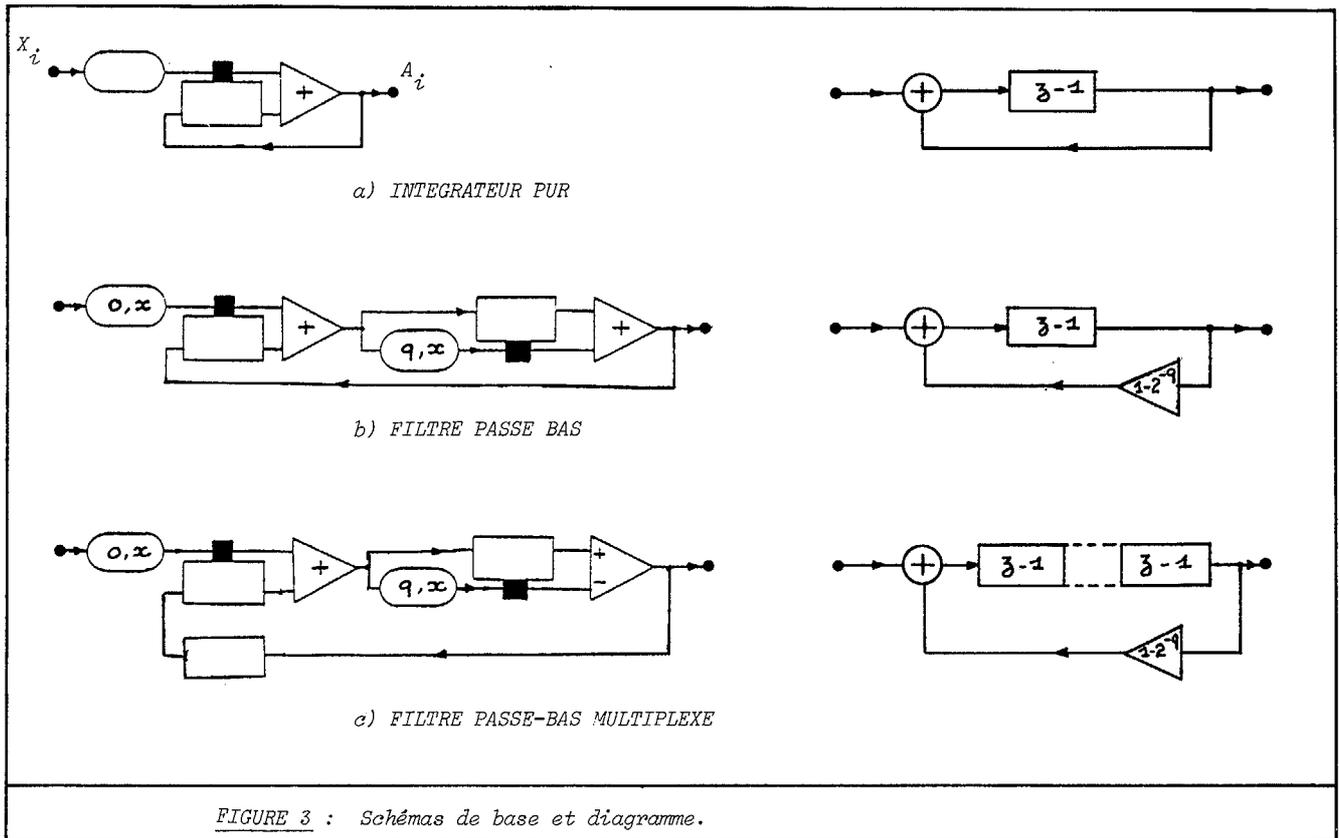
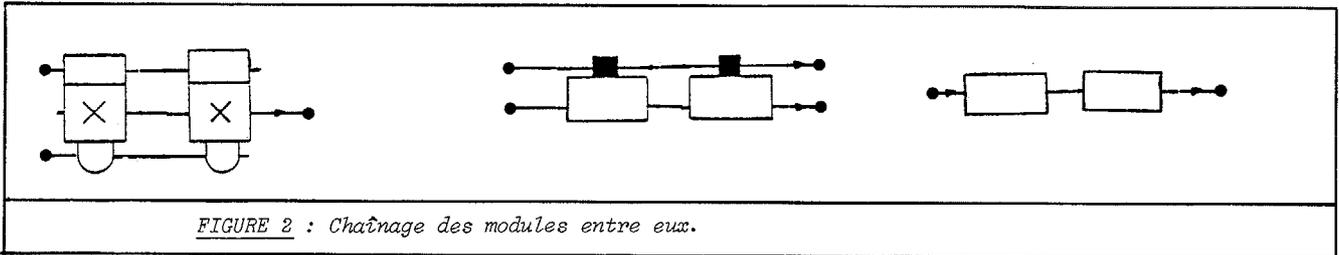
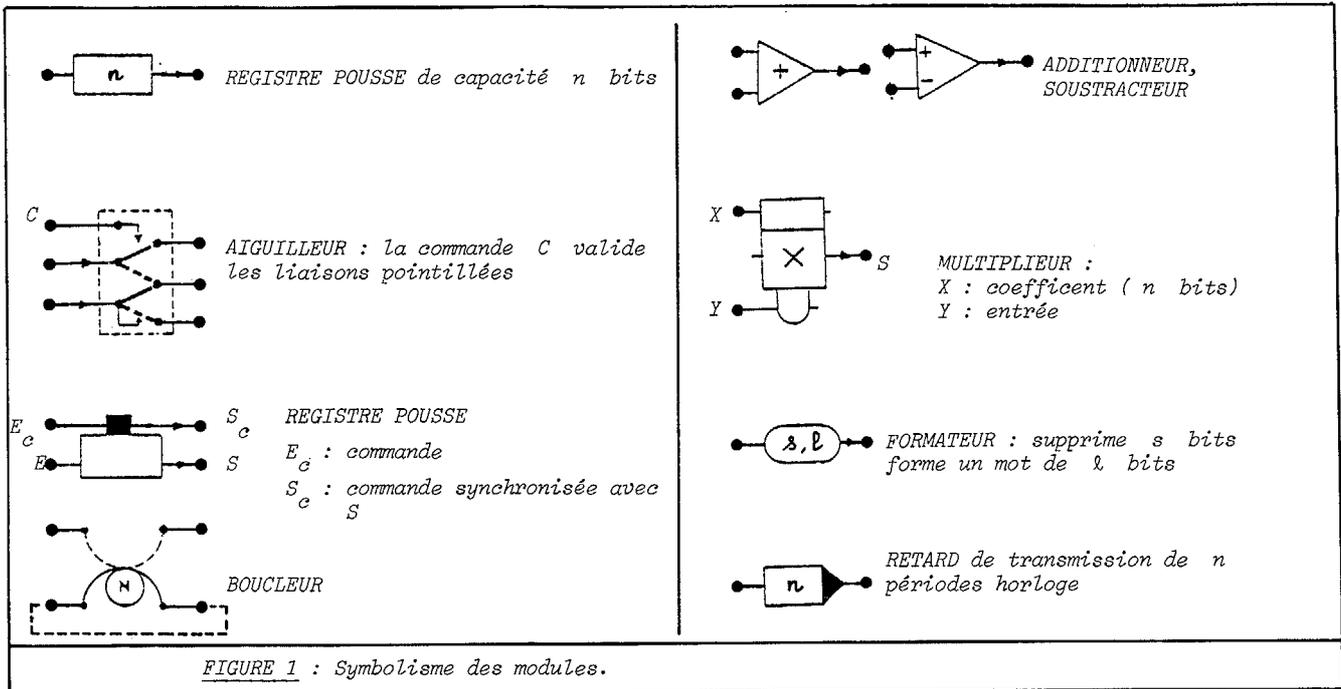
- D'autre part, si un mini-ordinateur est nécessaire, soit pour effectuer un post-traitement, soit pour calculer les paramètres du traitement, il faut prévoir une liaison facile avec celui-ci.

2.2. Nous désirons obtenir un ensemble relativement simple d'emploi mais puissant. La puissance de calcul nécessite de mettre des opérateurs en parallèle, et plutôt que d'utiliser quelques unités de calculs sophistiquées, nous avons préféré utiliser des opérateurs très simples en plus grand nombre, ce qui autorise un découpage fonctionnel des opérateurs. Pour les mêmes raisons, nous avons renoncé à relier les opérateurs au moyen d'un "bus" et nous avons utilisé une liaison directe entre les opérateurs. La préparation d'un traitement se fait alors par assemblage des éléments suivant un schéma très proche du schéma fonctionnel, ce qui simplifie la conception et la mise au point.

Pour obtenir le maximum de souplesse, nous avons utilisé la décomposition la plus élémentaire, en opérateurs arithmétique et mémoire, auquel nous devons ajouter des modules de gestion et d'interface, tout en nous gardant la possibilité de compléter ces modules de base par des "macro-modules" réalisant des fonctions plus globales (filtres, transformateurs de Fourier).

Ce choix d'utiliser des opérateurs simples mais en grand nombre conduit à augmenter le nombre d'interconnexions. Il apparaît vite [2] que des liaisons numériques parallèles sont inacceptables à cause de leur encombrement et des causes de pannes possibles. Nous avons donc étudié un système de transmission série rapide (5Mbits/S), d'interface très simple pour ne pas trop augmenter la complexité des modules et qui permet de transmettre des mots de longueur quelconque.

La plupart des systèmes de Traitement du signal peuvent se décrire par des diagrammes de flux [5] où chaque opérateur transmet son information au suivant, avec un rythme qui est déterminé par la fréquence d'échantillonnage des signaux, donc





CONCEPTION D'UN ENSEMBLE MODULAIRE DE TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL.

imosé. Il n'y a pas besoin de système de dialogue, il suffit de respecter les contraintes vitesse opérateurs. Chaque module est caractérisé par un temps de calcul connu au terme duquel il transmet son information au module suivant qui est supposé prêt. L'interconnexion est donc unidirectionnelle et est réalisée au moyen d'un simple câble coaxial.

3.- DEFINITION DES MODULES DE BASE

Pour définir les modules de base, nous avons tenu compte des besoins variables en précision et nous avons essayé de généraliser l'aspect modulaire de l'ensemble tout en limitant le nombre d'interconnexions. Le choix de la transmission série des données entre les modules influence profondément la conception de ceux-ci.

Une particularité de la transmission série est le caractère fugitif de l'information, alors qu'avec une transmission parallèle, les niveaux peuvent être maintenus. Cela peut être compensé en utilisant des registres tampons qui transposent l'information série fugitive en une information parallèle stable. En fait, il n'est pas toujours utile ni souhaitable de transposer l'information sous forme parallèle et la représentation série peut être conservée pour l'opération. En particulier, l'addition de deux nombres sous forme série est beaucoup plus simple que sous forme parallèle et possède l'avantage dû à sa structure séquentielle, de pouvoir traiter des mots de longueurs quelconques. Nous avons donc utilisé un additionneur (ou soustracteur) série [1, 3].

De même la multiplication d'une valeur par un coefficient est avantageusement réalisée par un multiplieur série-parallèle dont la structure permet un chaînage des opérateurs entre eux pour augmenter le nombre de bits du coefficient (fig.2). Comme pour l'additionneur, le nombre de bits de l'entrée peut être quelconque.

Notons que l'utilisation d'une arithmétique série nécessite de transmettre les valeurs codées en binaire complément à 2 avec les poids faibles en tête. D'autre part, nous avons utilisé un mode de transmission synchrone dont l'horloge est utilisé dans tous les modules et l'ensemble est donc un gros automate synchrone.

Une autre fonction très simple à réaliser sous forme série est le recadrage, c'est à dire la sélection des seules bits significatifs parmi ceux d'un long mot. Il suffit pour cela de compter les bits à supprimer et ceux à conserver. Nous avons défini un module nommé "formateur" qui peut à la fois supprimer des bits de poids faibles et ajouter des bits de poids forts. Il peut accepter des mots dont la longueur n'est limitée que par la capacité des compteurs, qui peuvent être facilement grande (par exemple 99).

La description des systèmes échantillonnés fait intervenir des cellules de mémorisation qui contrôlent le cheminement de

de l'information entre les opérateurs en introduisant un retard d'un pas d'échantillonnage (opérateur " z^{-1} "). Dans un dispositif à représentation parallèle des nombres elles sont composées de registres à entrée et sortie parallèle. Une bonne façon de réaliser cette cellule en structure série est d'utiliser un registre du type premier-entré, premier-sorti, qui accepte un fonctionnement avec des mots de longueurs variables et peut également servir d'organe de resynchronisation entre mots. La commande de transfert de l'information en sortie est faite par un mot série : chaque bit de commande provoque la sortie d'un bit.

Une logique appropriée permet le chaînage de ces modules entre eux pour obtenir une capacité quelconque (fig. 2) : nous nommons ces registres "registres pompés".

La commande du registre n'est pas utile s'il est utilisé uniquement comme cellule retard. Pour cela, nous introduisons un module plus simple appelé "registre poussé" qui est composé essentiellement d'un registre à décalage : chaque bit présenté à l'entrée provoque l'émission du bit mémorisé le plus ancien. Ces registres ne sont pas structurés en mots et peuvent être utilisés avec des mots de longueur quelconque et être associés entre eux pour augmenter leurs capacités.

L'ensemble des modules arithmétiques et mémoires permet de réaliser toutes les opérations nécessaires. Mais en pratique, il n'est pas envisageable d'utiliser une structure entièrement parallèle des opérateurs, car cela conduirait à un nombre d'opérateurs déraisonnable : il n'est pas question de mettre cent multiplieurs pour faire un corrélateur à 100 points. Il est donc indispensable de multiplexer certains opérateurs. Pour cela, il faut multiplexer les signaux, ce qui peut être fait dès l'entrée. Mais il est souvent nécessaire de disposer sous forme multiplexée des N derniers échantillons du signal. Cela peut se faire à l'aide d'une mémoire circulante dont on renouvelle un échantillon à chaque cycle. Nous avons introduit un module permettant de gérer le rebouclage d'un registre poussé : le "boucleur". La mémoire circulante ainsi réalisée est asynchrone, chaque rotation est commandée par le signal d'entrée. La cadence de circulation est imposée par un module "retard" inséré dans la boucle.

Le multiplexage des opérateurs conduit à une organisation séquentielle des opérations. Pour gérer celle-ci, nous avons dû ajouter un module "aiguilleur" qui est l'équivalent d'un relai et un module "séquenceur" destiné à fabriquer des bouffées d'un nombre fixé d'échantillons.

Ces modules doivent bien entendu être complétés par des modules convertisseurs numériques-analogiques et analogiques-numériques.

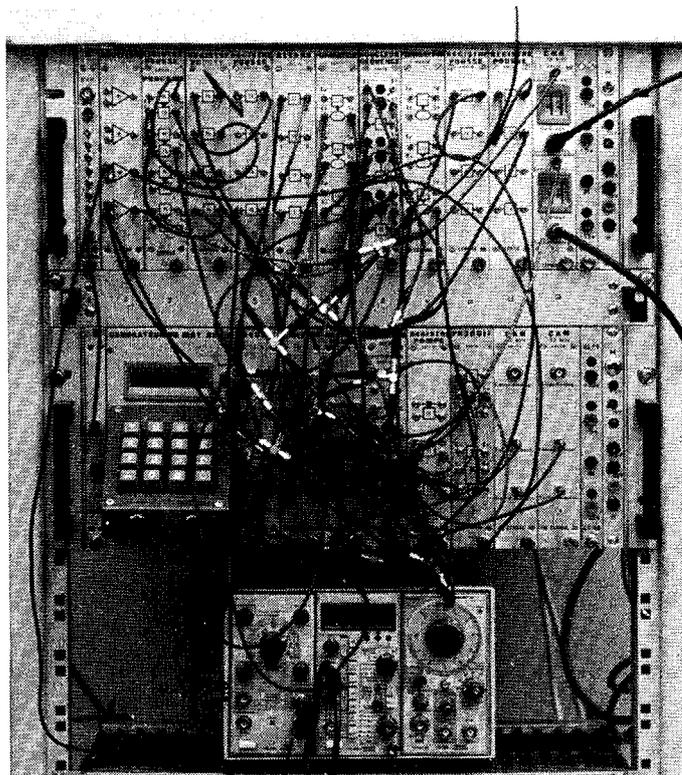
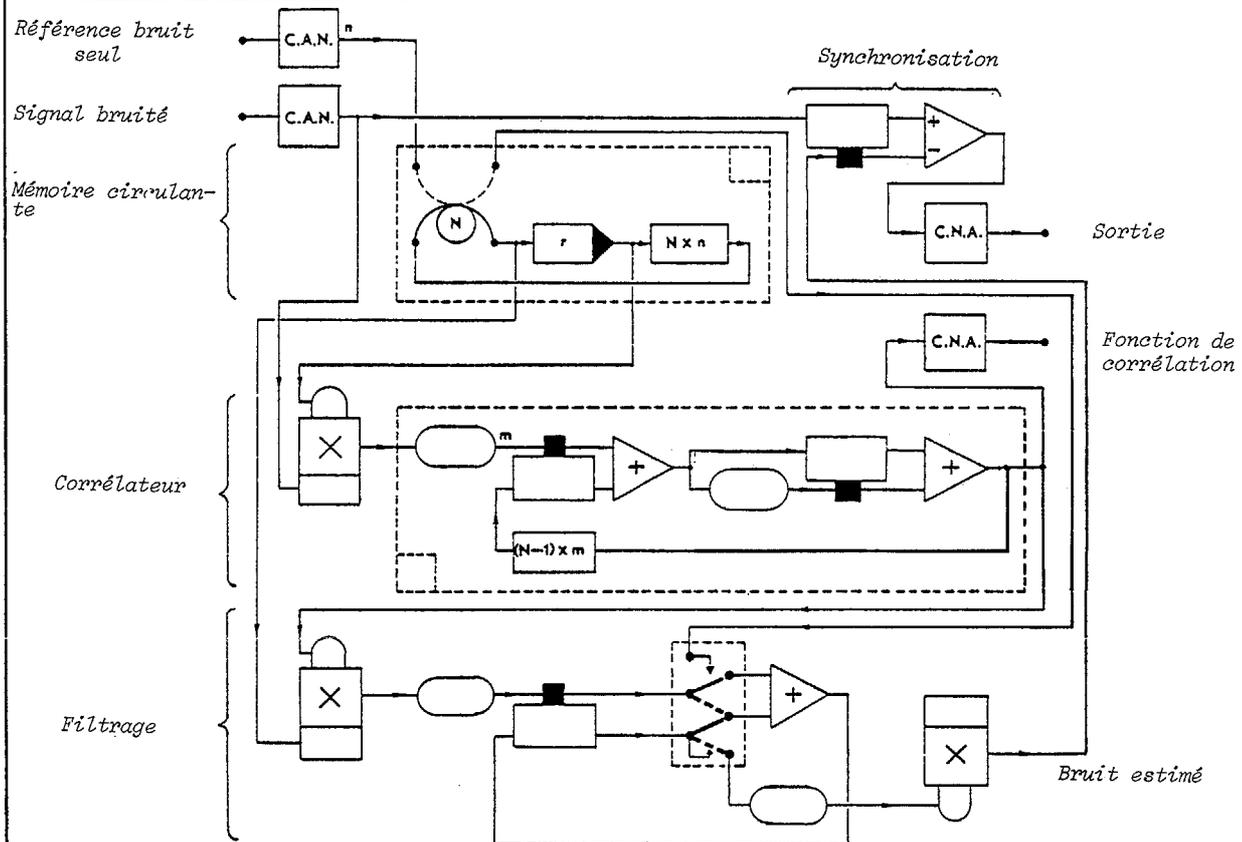
4. EXEMPLES D'APPLICATIONS.

Nous donnons quelques schémas de base d'utilisation des modules et nous montrons comment les combiner pour réaliser des fonctions plus complexes.

4.1 L'intégrateur pur (fig. 3a) montre



FIGURE 4 - Exemple de réalisation d'un corrélofiltre.





CONCEPTION D'UN ENSEMBLE MODULAIRE DE TRAITEMENT NUMERIQUE DU SIGNAL.

l'utilisation du registre pompé associé à un additionneur. Le mot X_i provoque la sortie du contenu A_{i-1} du i registre. Ces deux valeurs se retrouvant synchrones à l'entrée de l'additionneur. Le résultat de l'addition est renvoyé sur l'entrée du registre avec un retard inférieur au temps de transfert des mots; il y a donc simultanément sortie et entrée dans le registre, ce qui justifie le choix de sa structure. Le formateur ajoute à l'entrée des bits de poids fort qui seront remplis au cours de l'intégration.

4.2 Une modification du reboilage permet de transformer le montage précédent en filtre passe bas du premier ordre (fig. 3b). On voit ici l'utilisation du formateur en gain fractionnaire (2^{-1}).

4.3 Pour réaliser un filtre passe-bas pour les signaux multiplexés, il suffit d'insérer un registre poussé contenant les $N-1$ accumulateurs supplémentaires (fig. 3c).

4.4 La mémoire circulante (fig. 4b) est l'application type du boucleur. L'échantillon du signal d'entrée pousse le registre. La sortie de celui-ci est lui appliqué de nouveau à travers le boucleur et ainsi de suite jusqu'à ce que le boucleur interrompe le bouclage lorsque le nombre de tours désiré est atteint.

4.5 La mémoire circulante combinée à un multiplieur et à un filtre passe-bas multiplexé forme un corrélateur (fig. 4b).

4.6 Nous montrons fig. 4 comment réaliser un corrélofiltre [4] dans lequel les valeurs de la fonction de corrélation sont utilisées comme coefficients d'un filtre transversal. Le filtrage est obtenu en effectuant le produit des échantillons du signal contenu dans la mémoire circulante par les valeurs de la fonction de corrélation, puis l'intégration de ce produit. Un aiguilleur, commandé par la fin de la recirculation provoque la sortie du résultat et la remise à zéro de l'intégration. On voit comment ce résultat est resynchronisé sur l'entrée par un registre pompé pour pouvoir effectuer la soustraction nécessaire.

5. PERFORMANCES.

Pour la réalisation de cet ensemble, nous avons choisi une fréquence d'horloge de 5 MHz qui est un bon compromis entre l'impératif de vitesse et la facilité de réalisation des modules.

Le temps d'exécution des opérations série est pratiquement le temps de transfert du mot. Si n est le nombre de bits du mot le plus long d'une boucle de calcul de N valeurs, la durée d'exécution sera $n.N.\theta$, θ étant la période horloge ($0.2 \mu\text{s}$).

Prenons l'exemple d'un corrélateur de 100 points utilisant une intégration sur 25 bits, nous obtenons $500 \mu\text{s}$, soit une fréquence d'échantillonnage de 2 KHz. Nous voyons que nous sommes loin des vitesses de certains corrélateurs très sophistiqués, mais bien au

dessus des performances d'un mini-calculateur. Il est bien évident qu'en dédoublant la boucle de calcul et en utilisant deux multiplieurs, nous pouvons doubler la vitesse : le degré de parallélisme des opérateurs peut être facilement adapté. Dans la structure la plus rapide, la cadence est limitée par le temps de transfert d'un mot, ce qui limite la fréquence de l'ensemble vers 200 KHz.

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] STANLEY L. FREGNY - Special Purpose Hardware for Digital Filtering. Proc. of the I.E.E.E., April 1975
- [2] STEVEN C. BASS - A Laboratory for Digital Filter Instructions. I.E.E.E. Trans. on Circuits and Systems, April 1976.
- [3] LELAND B. TUCHSON - An Approach to the Implementation of Digital Filter. I.E.E.E. Trans. Audio, Sept. 1968.
- [4] D. BAUDOIS, A. SILVENT - Application du corrélofiltre à l'élimination de raies. Coll. GRETSI, 1979.
- [5] A. OPPENHEIM, R.W. SCHAFER - Digital Signal Processing (Prentice Hall).