



NICE du 1^{er} au 5 JUIN 1981

DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS ÉVOQUÉS
EN ÉLECTRO-ENCÉPHALOGRAPHIE

J. HANCQ

Faculté Polytechnique de Mons, Service de Théorie des Circuits, 31, boulevard Dolez, B-7000 MONS (Belgique)

RESUME

Le grand intérêt des potentiels évoqués en électro-encéphalographie clinique est désormais établi.

Le processus d'extraction de ces potentiels le plus couramment utilisé est basé sur une accumulation et un moyennage des réponses à une succession périodique ou aléatoire de stimulations.

Un processeur spécialisé a été développé pour cette application; il utilise un microprocesseur mono-tranche 8 bits; on en donne une brève description. Cette solution programmée retenue offre de grands avantages de souplesse aussi bien pour l'établissement des caractéristiques d'expérience que dans les possibilités de dépouillements mathématiques ou statistiques des réponses recueillies.

Cependant, l'amélioration du rapport signal sur bruit peut s'avérer parfois insuffisante et l'interprétation des résultats peut en être rendue délicate. On présente donc un bilan rapide d'autres techniques d'extraction possibles et en particulier une méthode basée sur le calcul des spectres des réponses et ne nécessitant qu'un faible volume de mémoire.

Etant donné l'importance du volume de calcul nécessaire, on peut envisager une réalisation en temps réel grâce à un système microprogrammé utilisant des microprocesseurs par tranches (bit-slices). L'architecture d'un tel système réalisé est décrite et discutée.

SUMMARY

The large interest of the evoked potentials is henceforth established in the electroencephalography.

A technique for the extraction of these potentials is based on the averaging of the responses to a periodic or random sequence of the stimulations. This technique is currently used.

It has been builded a specialized processor for this application.

A quick description of this processor that uses a 8 bits microprocessor is given.

This solution allows a large flexibility as well for the definition of the experience's parameters as for the mathematical or statistical processings on the obtained responses.

In some cases, the improvement of the signal-to-noise ratio is insufficient and the interpretation of the results is very difficult.

It is described a quick schedule of others possible techniques for the extraction of the evoked potentials.

Specially, it is studied a technique that necessitates the spectral analysis of the responses but a small amount of memory.

It is shown a possible realization in real time with a processor that uses bit slices. The architecture of this system is discussed.



DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS ÉVOQUÉS EN ÉLECTRO-ENCÉPHALOGRAPHIE

J. HANCQ

Au cours de cette dernière décennie, l'utilité des "potentiels évoqués" en électro-encéphalographie clinique s'est largement étendue [1].

Il apparaît utile de rappeler que l'activité électrique recueillie au niveau de la surface du cerveau comprend une activité spontanée et une activité liée aux stimuli.

On appelle "potentiel évoqué" (EP), l'activité électrique à la surface du cerveau provoquée par un stimulus et mesurée dans la région de sensibilité au stimulus généré.

Ces potentiels présentent une amplitude très faible vis-à-vis de l'activité spontanée.

L'extraction de tels potentiels dans un électro-encéphalogramme procure un large champ d'investigation à la physiologie et aux mathématiques appliquées.

La méthode d'extraction la plus couramment utilisée et à laquelle on donnera ici le qualificatif de "classique" consiste en un "moyennage" (ou accumulation des données) des signaux EEG obtenus en soumettant le patient à des stimuli répétés.

Cette méthode ne requiert guère une instrumentation compliquée même pour un traitement en temps réel des signaux EEG.

Toutefois, les hypothèses nécessaires pour la validité d'une telle méthode apparaissent peu vérifiées dans le cas des signaux EEG.

METHODE CLASSIQUE D'EXTRACTION: LE MOYENNAGE.

D'une façon générale, une telle méthode est applicable à l'extraction de signaux déterministes répétitifs, noyés dans du bruit pour autant que l'on connaisse l'instant d'apparition de ces signaux ou d'un événement lié à ceux-ci [2].

Définissons:

$$x(t) = r(t) + n(t) \quad [1]$$

le signal disponible, c'est-à-dire ici le signal recueilli aux électrodes avec:

- $r(t)$ le signal à extraire, ici le potentiel évoqué;
- $n(t)$ le bruit, ici l'activité spontanée et divers artefacts.

Le processus de moyennage synchronisé sur les stimulations consiste en un échantillonnage du signal $x(t)$ que l'on nommera "relevé" et en une accumulation (sommation) en mémoire de ces relevés.

On montre que ce processus améliore le rapport

signal sur bruit d'un facteur \sqrt{N} , si N est le nombre de stimulations et pour autant que les hypothèses ci-après soient vérifiées.

Hypothèses sur $r(t)$:

- Le potentiel évoqué se répète identiquement à lui-même, sans aucune déformation d'une stimulation à une autre.
- Il est lié rigidement dans le temps à la stimulation.

Hypothèses sur $n(t)$:

- Le bruit $n(t)$ est supposé stationnaire au second ordre.
- Il est centré (valeur moyenne nulle) et de puissance σ_n^2 .
- Les échantillons successifs de bruit acquis sont non corrélés.

Il est peu réaliste de penser que de telles hypothèses soient vérifiées aussi bien sur le signal utile $r(t)$ que sur le bruit $n(t)$.

Aussi, des méthodes plus sophistiquées ont été envisagées pour l'extraction des potentiels évoqués.

AUTRES METHODES D'EXTRACTION ENVISAGEES.

Les méthodes de moyennage sélectif.

Dans de telles méthodes, les relevés relatifs aux différentes stimulations subissent une discrimination de manière à ne garder que les "meilleurs" pour le processus de moyennage.

Les critères discriminatoires sont divers:

- rejet des relevés présentant un risque important d'artefacts, ceci grâce à une analyse spectrale du signal acquis;
- ne garder que les relevés présentant des ondes types, ceci étant effectué grâce à des techniques de corrélation avec des gabarits représentant ces ondes types.

Filtrage adaptatif obtenu par corrélation et correction des latences.

On utilise la corrélation mutuelle pour estimer la latence optimale entre un stimulus et le relevé associé. On peut alors corriger le facteur temps dans chaque relevé de façon à ce qu'ils présentent une latence commune et procéder à un moyennage.

Le processus est itératif: le potentiel moyen obtenu remplace le gabarit initial pour un nouveau processus de corrélation.

DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS EVOQUES
EN ELECTRO-ENCEPHALOGRAPHIE

Cette méthode prémunit les résultats des fluctuations de latence d'un relevé à un autre.

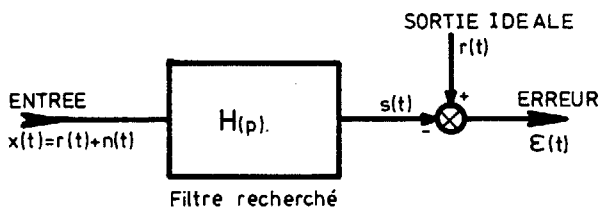
Filtrage minimisant les erreurs quadratiques moyennes.

Un filtre optimal est calculé dans le domaine temporel, le critère utilisé étant l'erreur quadratique moyenne vis-à-vis d'un estimateur du potentiel évoqué. Le filtre est appliqué à chacun des relevés. Le processus est itératif, l'estimateur initial étant le potentiel évoqué moyen obtenu par moyennage des relevés.

Filtrage à "posteriori" selon la théorie du filtre optimal de WIENER [3].

Les hypothèses statistiques émises sur le bruit sont d'autant plus admissibles que la durée de l'expérience est courte, autrement dit que le nombre de stimulations nécessaires à l'obtention d'un rapport signal sur bruit suffisant peut être réduit. Dans ce but, la théorie du filtrage optimal de WIENER est appliquée à l'obtention du potentiel évoqué.

La théorie de WIENER délivre un filtre qui minimise la variance de l'erreur résiduelle, différence entre la sortie réelle $s(t)$ et la sortie désirée $r(t)$.



Critère choisi : $R = |E| = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} E^2(t) \cdot dt$

Figure 1 PRINCIPE DU FILTRE OPTIMAL
SELON WIENER

Dans l'hypothèse d'indépendance entre signal utile et bruit, le filtre optimal exprimé dans le domaine fréquentiel est donné par :

$$H(\omega) = \frac{\phi_{rr}(\omega)}{\phi_{rr}(\omega) + \phi_{nn}(\omega)} \quad [2]$$

avec ϕ_{rr} : la densité de puissance spectrale du signal utile.

ϕ_{nn} : la densité de puissance spectrale du bruit.

Ces valeurs peuvent être estimées à partir de :

ϕ_{xx} : la densité spectrale de la moyenne (valeur obtenue par le processus classique)

$$\phi_{xx}^{--}(\omega) = \phi_{rr}(\omega) + \frac{1}{N} \phi_{nn}(\omega) \quad [3]$$

ϕ_{xx}^{--} : la densité spectrale moyenne ou moyenne des densités spectrales des différents relevés

$$\phi_{xx}^{--}(\omega) = \phi_{rr}(\omega) + \phi_{nn}(\omega) \quad [4]$$

On en déduit deux filtres optimaux :

- Le premier permet l'obtention du potentiel évoqué à partir de chaque relevé mais nécessite une mémorisation de chaque relevé.

$$H_1(\omega) = \frac{\frac{N}{N-1} \phi_{xx}^{--}(\omega) - \frac{1}{N-1} \phi_{xx}^{--}(\omega)}{\phi_{xx}^{--}(\omega)} \quad [5]$$

- Le second, nommé filtre à "posteriori", en permet une obtention à partir du potentiel moyen.

$$H_2(\omega) = \frac{\frac{N}{N-1} \phi_{xx}^{--}(\omega) - \frac{1}{N-1} \phi_{xx}^{--}(\omega)}{\phi_{xx}^{--}(\omega)} \quad [6]$$

Des stimulations sur des ondes théoriques montrent les avantages d'une telle méthode, vu la convergence rapide vers le potentiel évoqué.

Lors des expérimentations pratiques de cette méthode, les potentiels obtenus se présentent sous une forme plus adoucie que les potentiels obtenus par moyennage classique.

L'interprétation de ce dernier point varie selon les auteurs.

DESCRIPTION DE SYSTEMES D'EXTRACTION DE POTENTIELS EVOQUES EN TEMPS REEL.

Les développements récents dans les circuits intégrés numériques permettent la réalisation aisée d'ensembles assurant un traitement numérique en temps réel.

Deux réalisations vont être décrites ci-après :

Dispositif de moyennage.

Un système très performant peut être réalisé à partir de microprocesseurs monochips 8 bits selon une architecture multiprocesseurs. La structure générale d'un tel système étudié et réalisé est décrite à la figure 2.

Un microprocesseur central dit "processeur maître" va réaliser l'ensemble des fonctions de traitement nécessaires pour le moyennage des signaux. Sa structure est celle d'un micro-ordinateur classique, il comprend :

- un bloc "processeur" comportant :



DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS EVOQUES
EN ELECTRO-ENCEPHALOGRAPHIE

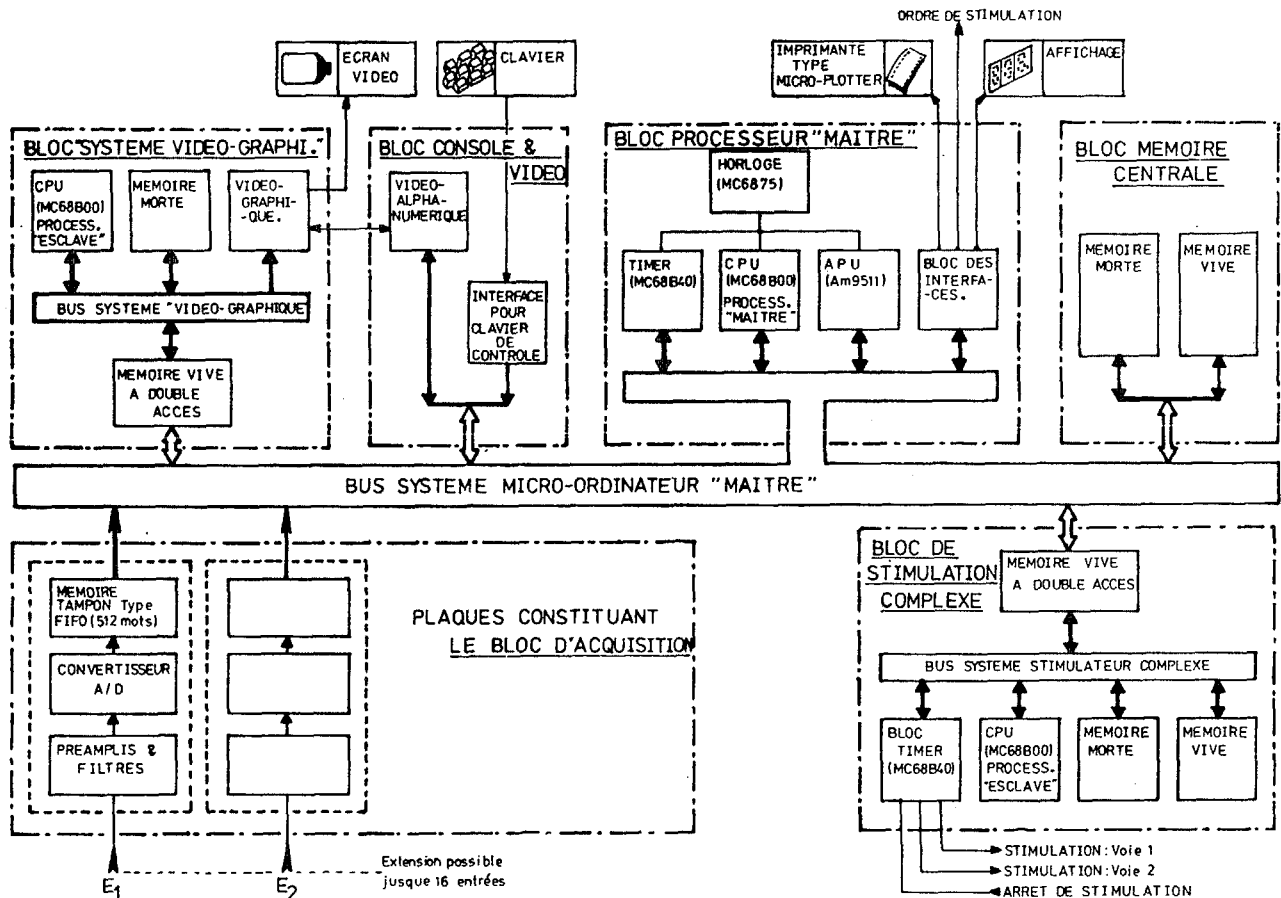


Figure 2a STRUCTURE GENERALE D'UN DISPOSITIF POUR MOYENNAGE E.E.G.

- . une unité centrale de traitement (ici, MC68B00),
- . une unité arithmétique spécialisée (APU Am9511) pour l'accélération des calculs en format flottant,
- . une unité "timer" programmable (MC68B40) assurant les tâches de contrôle des temps,
- . les interfaces assurant les liaisons avec l'extérieur;
- un bloc "mémoire vive et morte";
- un bloc "console de commande" comprenant un interface vers le clavier de commande et une vidéo RAM alphanumérique;
- un ensemble de plaques d'acquisition des signaux (au maximum 16 voies sont prévues) qui se branchent sur le bus du processeur maître. Chaque plaque est relative à une voie d'acquisition et comporte des préamplificateurs filtres, un convertisseur A/D et une mémoire tampon du type FIFO de longueur maximale de 512 mots.

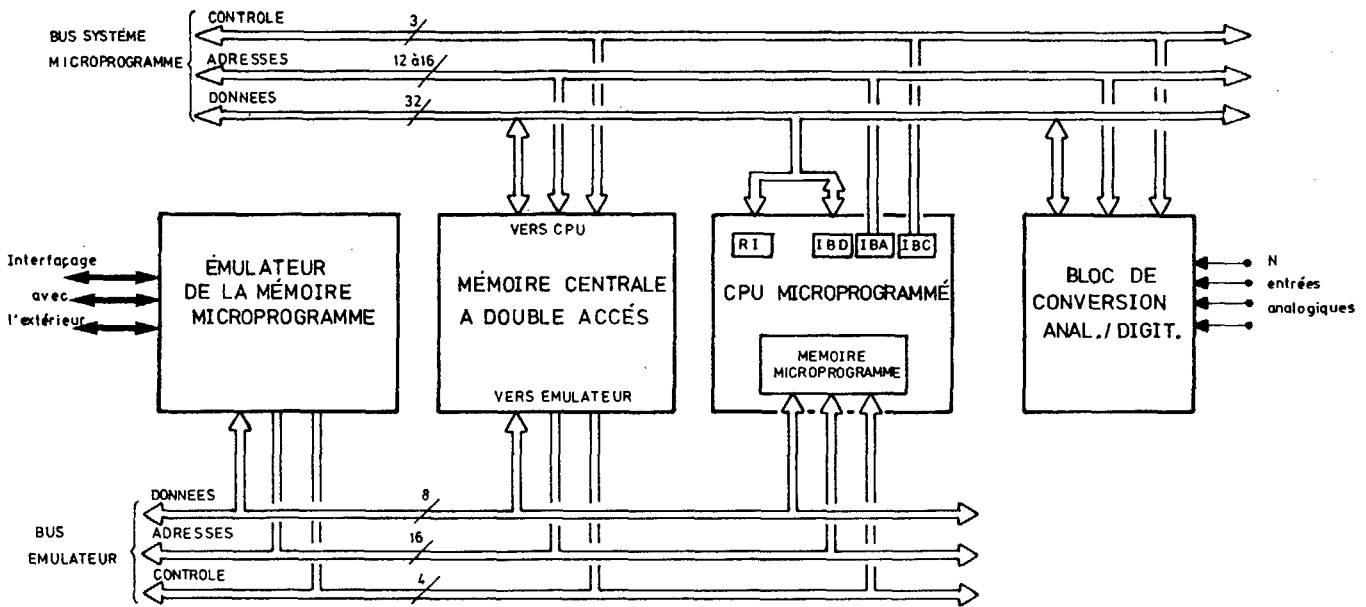
Viennent s'ajouter des dispositifs auxiliaires tels que:

- un bloc de visualisation simultanée des signaux acquis ou des moyennes composé d'un processeur "esclave" possédant une zone commune de mémoire vive avec le processeur maître et connecté à une vidéo-RAM graphique;
- un bloc de génération de stimulations complexes permettant de créer 2 trains d'impulsions à paramètres variables. Ces paramètres sont fournis par le processeur maître au processeur de ce bloc via une zone de mémoire vive commune.

Le logiciel comprend actuellement 4 programmes distincts relatifs à:

- la définition des conditions d'expérience (paramètres d'acquisition et de stimulation) grâce à un programme conversationnel du type "menu";
- la calibration des plaques d'acquisition;
- la mesure ou expérience proprement dit;
- la sortie des potentiels moyens extraits vers imprimante graphique ou mémoire de masse.

DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS EVOQUES EN ELECTRO-ENCEPHALOGRAPHIE



RI: registre d'instruction
 IBD: interface du bus de données
 IBA: interface du bus d'adresses
 IBC: interface du bus de contrôle

Figure 3 a STRUCTURE DU PROCESSEUR UTILISANT DES MICROTRANCHES.

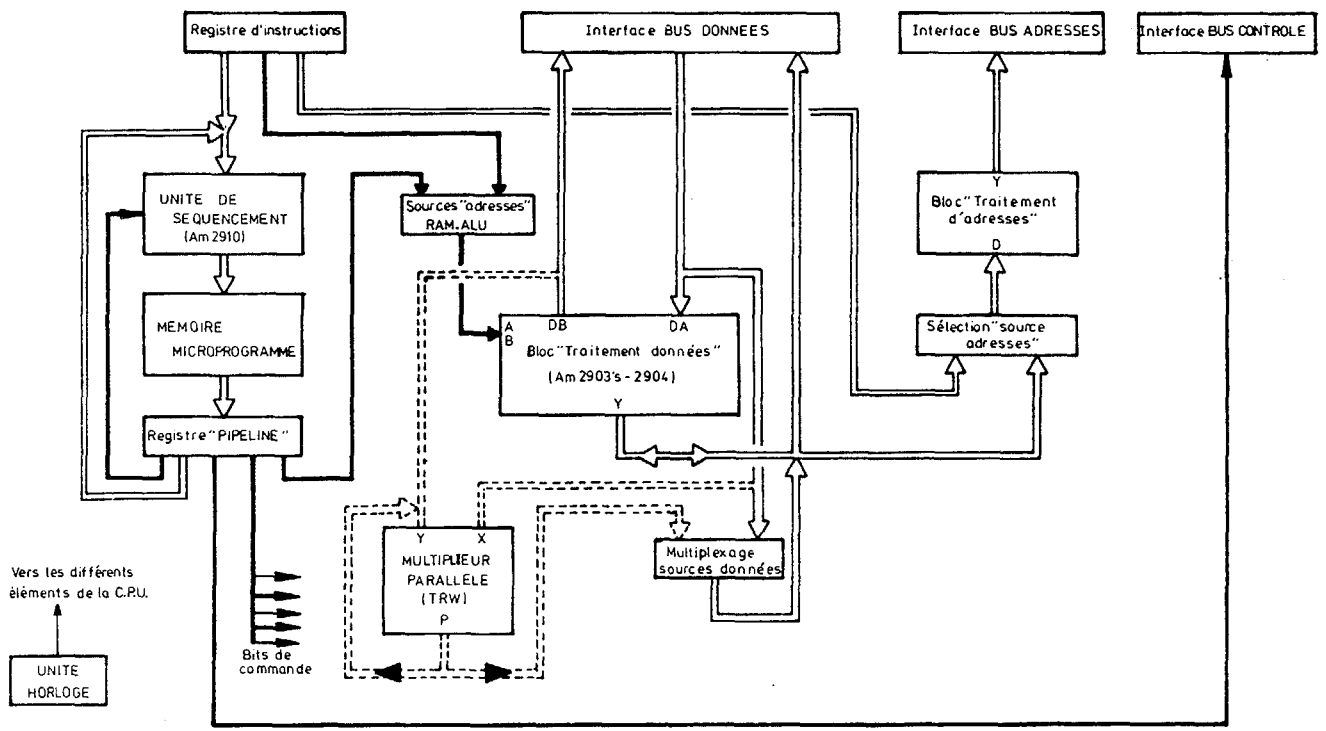


Figure 4 a STRUCTURE DE LA C.P.U. MICROPROGRAMMÉE



DISPOSITIFS D'EXTRACTION POUR POTENTIELS ÉVOQUÉS
EN ELECTRO-ENCEPHALOGRAPHIE

La cadence maximale possible est d'un échantillon pris simultanément sur toutes les voies toutes les 40 μ s (limite fixée par les convertisseurs de bas prix utilisés).

Au maximum, 512 échantillons seront prélevés par relevé et par voie (limite fixée par la mémoire tampon).

Le processus d'accumulation porte sur des mots de 24 bits, l'acquisition ayant lieu en 12 bits.

La limite d'accumulation est fixée à 9999 relevés.

De telles performances répondent largement à l'ensemble des expériences rencontrées en mesure de potentiels évoqués.

Dispositif d'extraction selon le filtrage à posteriori.

Dans le cas d'un processus d'extraction par filtrage à posteriori, le traitement en temps réel nécessite un volume de calcul tel qu'il n'est plus possible d'envisager une solution multiprocesseurs à base de monotranches 8 ou 16 bits. Une technologie possible est alors celle des microprocesseurs par tranches ou "bit-slices".

L'avantage de cette technologie est double:

- sur le point "firmware", l'utilisation de la microprogrammation permet d'adopter un jeu d'instructions performant pour le problème envisagé. Dans l'exemple ici traité, on disposera d'instructions de base réalisant l'algorithme FFT;
- sur le point "hardware", la structure de traitement donnée à l'unité centrale sera adaptée au problème à solutionner: choix de la longueur des mots traités, du type d'arithmétique, des capacités des bus, etc...

Un processeur spécialisé pour le traitement du signal a été développé selon cette technologie. Sa structure générale est représentée à la figure 3. La capacité du bus données est de 32 bits tandis que celle du bus adresses est de 12 bits, extensible à 16 bits.

On note que la mémoire microprogramme de l'unité centrale est du type mémoire vive en vue d'une modification aisée du jeu d'instructions. Un dispositif émulateur construit à partir d'un microprocesseur mono-tranche 8 bits assure le chargement aisé de cette mémoire microprogramme.

Cet émulateur peut aussi accéder à la mémoire centrale. Il assure, dans notre cas, l'interfaçage avec le monde extérieur.

La figure 4 représente l'organisation interne de l'unité centrale microprogrammée.

Les données y sont traitées selon un format de 32 bits parallèles, 2 types d'arithmétiques étant possibles: un mode "fixe (32 bits en complément à 2) et un mode "flottant" (24 bits de mantisse et 8 bits d'exposant traités en parallèle).

De plus, il est possible d'adjoindre un multiplieur parallèle rapide à l'unité de traitement.

Le calcul des adresses est simultané au traitement des données.

Le temps de cycle d'un tel système est de 300 ns.

Pour le problème du filtrage à posteriori, des instructions du type FFT ont été microprogrammées. Elles font appel à une micro-sousroutine de base nommée cellule Butterfly qui s'exécute en quelque 70 microcycles.

Un algorithme FFT du type Bergland organisé sur 512 données réelles est alors exécuté en environ 20 msec.

Ce type de processeur est en fait tout à fait général pour tout problème de traitement de signaux demandant une grande puissance de calcul. Des versions simplifiées doivent être envisagées en fonction de l'algorithme d'extraction utilisé, une fois que ce dernier sera bien établi.

CONCLUSIONS.

Les progrès de la technologie des microprocesseurs permettent une réalisation aisée et souple des dispositifs nécessaires à l'extraction des potentiels évoqués ainsi qu'à des traitements ultérieurs sur ces derniers. Toutefois, il y a encore lieu d'investiguer sur les méthodes d'extraction de façon à obtenir des processus améliorant rapidement le rapport signal sur bruit.

BIBLIOGRAPHIE.

1. P. BUSER, W. STORM VAN LEEUVEN, F.H. LOPES DA SILVA, A. KAMP, "Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology", volume 8, part A: "Evoked Responses", Elsevier Scientific Publishing, 1975.
2. J. MAX, "Méthodes et techniques de traitement du signal", Masson, 1977, pp. 197-201/288-293.
3. D.J. DOYLE, "Some comments on the use of Wiener filtering in the estimation of evoked potentials", Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 1975, vol. 38, pp. 533-534.