

COLLOQUE NATIONAL SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 16 au 21 JUIN 75



GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

Cl. BEAUDUCEL et J. CRETIN

INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE, 4, avenue de Bois Préau - 92502 RUEIL-MALMAISON

RESUME

Le traitement numérique automatique du signal suscite de nombreux problèmes hardware et software liés à la complexité du traitement à appliquer et à la quantité des informations à manipuler. Ces problèmes peuvent être résolus par des petits calculateurs mais ceux-ci ne sont en général pas assez rapides pour effectuer en temps réel des calculs qui sont souvent de type transformée de Fourier ou convolution.

L'idée la plus fréquemment retenue consiste à associer un mini-ordinateur et un "Array-Processeur" sur la même mémoire. Cette solution est en général satisfaisante, mais les performances du système sont toujours limitées par les caractéristiques du mini-ordinateur quelle que soit la puissance de calcul de l'"Array-Processeur".

Une deuxième méthode consiste en l'utilisation d'un calculateur qui, restant universel, intègre avec des performances suffisantes les fonctions d'"Array-Processeur". Ainsi on obtient une efficacité globale bien supérieure et la souplesse du système est accrue.

Le but de la présente communication est de présenter une réalisation de ce type avec une analyse de ses avantages et des performances que l'on peut en espérer. Les exemples seront pour la plupart empruntés au domaine du traitement géophysique.

SUMMARY

Automatic digital processing of signals brings up numerous hard and software difficulties in connection with the complexity of the processing and with the quantity of data to be handled.

Such problems can be solved by the use of minicomputers. However minicomputers are usually too slow and they are unable to perform usually needed real time operations such as FFT or convolution products.

The most commonly used concept is to couple a minicomputer and an array processor onto the same memory. This is usually satisfactory but the performance of the system is always limited by the characteristics of the minicomputer whatever the computing capacity of the array processor.

Another approach consists in the use of a computer which, although being a universal computer, has the same functions as an array processor with the same efficiency. The computing speed necessary can then be put to use for all operations including system management. The overall efficiency is thus higher and one gets more flexible systems.

In this paper a computer of this type is presented with an analysis of its advantage and of the performance which may be expected. Most examples presented will be taken from the geophysical field of application.



GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

1 - TYPES DE SIGNAUX RENCONTRES EN GEOPHYSIQUE

1.1 - La méthode de reconnaissance géophysique de la structure du sous-sol la plus employée est la méthode sismique.

Dans une telle méthode, on provoque en un point un ébranlement du sol (par explosion, chute de poids ou vibration) et l'on recueille la réponse du sous-sol au moyen de géophones. Puis l'ensemble du dispositif avance et l'on procède à une nouvelle excitation.

Caractéristique des signaux recueillis : (le signal reçu par un géophone s'appelle trace)

- bande passante (par géophone) : 10 - 100 Hz
- durée de la mesure : 5 à 20 secondes
- dynamique (1) : 120 dB
- précision (1) : 10^{-4} sur un échantillon
- nombre de voies de mesure (nombre de géophones) de 12 à 96.

Actuellement, ces signaux sont échantillonnés (à 4 ms), multiplexés, puis numérisés et enregistrés sur bande magnétique afin d'être traités sur ordinateur.

Chaque résultat de mesure, ou "tir", peut comporter :

$$96 \times \frac{20}{4 \cdot 10^{-3}} \times 18 = 8,64 \text{ Mbits}$$

et dans le cas d'exploitation marine, la période séparant les excitations étant de l'ordre de grandeur du temps de mesure, on aboutit à une quantité de bandes magnétiques énorme.

1.2 - Traitement appliqué sur ces signaux

Le but d'un traitement géophysique est de tenter de restituer la réponse impulsionnelle verticale du sous-sol à partir de la réponse au signal émis. Celui-ci peut être court et inconnu (explosion) ou être long et connu (vibration).

1.2.1 - Dans le cas de l'explosion, on admet que l'autocorrélation du signal reçu $R(t)$ pendant la toute première tranche de temps représente une assez bonne approximation de l'autocor-

rélation du signal émis ($E(t)$). On détermine donc à partir de cette autocorrélation un signal "inverse" $I(t)$ tel que $F(I) \approx \frac{1}{F(E)}$ avec lequel on convoluera le signal reçu afin de s'approcher d'une réponse impulsionnelle $S(t)$; en effet, dans le domaine spectral on a :

$$F(R) = F(S) \times F(E)$$

$$\text{soit } F(S) = \frac{F(R)}{F(E)}$$

cette opération s'appelle déconvolution.

1.2.2 - Dans le cas d'un signal long, on choisit un signal d'émission dont l'autocorrélation est pratiquement un dirac :

$$E(t) * E(-t) \approx \delta(t)$$

La réponse impulsionnelle du sol est donc donnée par :

$$\begin{aligned} R(t) * E(-t) &= S(t) * E(t) * E(-t) \\ &= S(t) * \delta(t) = S(t) \end{aligned}$$

il suffit donc de corrélérer le signal émis avec le signal reçu pour obtenir le résultat cherché.

1.2.3 - Dans le cas de la vibration, le signal reçu peut être trop faible pour être exploité : les résultats de la mesure étant noyés dans le bruit. Il faut donc répéter plusieurs fois la vibration au même point et additionner géophone à géophone les signaux reçus afin d'augmenter le rapport signal à bruit.

1.2.4 - En général, on déplace le dispositif d'une demi-distance entre géophone à chaque excitation. La réponse du sous-sol provenant en gros de la médiatrice entre le géophone et le point d'excitation, on a autant de réponses à la même verticale du sol qu'il y a de géophones, mais avec des incidences différentes.

On peut donc sommer ces différentes réponses pour éliminer l'influence des micro-réflexions et des diffractions qui ne nous intéressent pas, mais il faut auparavant corriger les différences de trajets de propagation.

Cette correction s'appelle correction dynamique et suppose la connaissance de la loi de vitesse de propagation des ondes sur cette verticale en fonction de la profondeur, ce qui s'obtient par des essais successifs de correction avec des vitesses différentes. Après ces corrections, on peut effectuer la sommation qui s'appelle alors couverture multiple.

Le tout peut être suivi d'une nouvelle déconvolution et/ou d'un filtrage en fréquence.

(1) l'acquisition se fait généralement en virgule flottante, d'où :

- 4 bits d'exposant
- 1^4 de mantisse, après numérisation

(2) $F(I)$ = transformée de Fourier de $I(t)$.



GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

Actuellement, hormis l'accumulation successive (§ 1.2.3), l'ensemble de ces opérations est effectué dans un centre de calcul sur gros ordinateur scientifique, en général 6600 ou 7600 de Control Data. Un traitement type pour un dispositif à 48 traces et un temps d'enregistrement de 6 secondes dure environ 2 sec. par tir sur CDC 7600.

L'exploration sismique grossièrement présentée ci-dessus laisse donc apparaître deux problèmes :

a) effectuer sur le terrain ou à proximité, un traitement simplifié afin de mieux contrôler la qualité des résultats obtenus (ce qui est quasi impossible par examen des enregistrements bruts) et/ou condenser l'information pour diminuer le nombre de bandes à envoyer au centre de calcul.

b) chercher à diminuer le coût du traitement en disposant d'un calculateur spécialisé nécessairement plus petit qu'un gros ordinateur scientifique tout en ayant des performances comparables dans le domaine de l'application envisagée.

L'idée était tentante de réaliser un appareillage s'adaptant à ces deux situations par évolution de la configuration.

C'est ce qui a donné naissance au GEOPROCESSEUR, fruit de la collaboration entre l'Institut Français du Pétrole et l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématique Appliquée de Grenoble.

2 - STRUCTURE HARDWARE DU GEOPROCESSEUR (fig. 1)

2.1 - Généralités

C'est un calculateur rapide micro-programmé.

- La longueur du mot est adaptée au traitement du signal : 20 bits (représentation en virgule flottante, 15 bits de mantisse + 5 bits d'exposant).

- Le temps de cycle de base a été ramené à 70 ns, par utilisation exclusive de la technologie ECL (série 10 000, 2 ns par porte).

- La mémoire centrale est à technologie MOS rapide : 210 ns de temps d'accès. On y accède par l'intermédiaire d'un bus mémoire permettant de connecter d'autres unités centrales et/ou des accès directs mémoires (A.D.M.)

- Le bus d'entrée/sortie permet de connecter 64 périphériques, son taux de transfert est de

500 k mots/s.

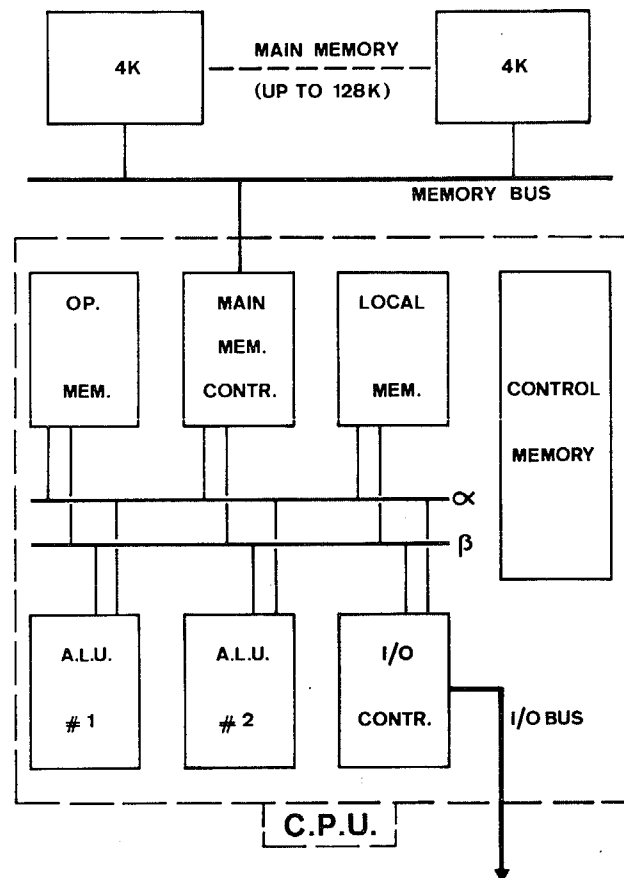


Fig. 1

2.2 - Chemins de données

L'unité centrale est organisée autour de 4 bus :

- deux bus de 20 bits α et β assurant en simultanéité les échanges avec les différents sous-ensembles.

- un bus de test à 2 bits permettant d'effectuer des branchements à quatre directions dans le micro-programme.

- un bus d'attente permettant la resynchronisation du micro-programme sur des événements internes ou externes.

2.3 - Organes de calcul

C'est l'introduction de deux unités arithmétiques performantes, capables de travailler en simultanéité qui a permis de microprogrammer les fonctions de convolution, de transformée de Fourier avec des performances approchant celles des "Array-Processeur" sans pour autant augmenter notablement le prix.



GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

Ces deux unités arithmétiques, en sus de l'addition, peuvent exécuter la multiplication fixe de 20 bits x 20 bits en 700 ns (10 micro-cycles), de façon automatique, indépendante du déroulement du microprogramme.

L'unité n° 1 exécute en plus les fonctions logiques et permet tous les tests de débordement et de pré-débordement sur les additions.

L'unité n° 2 est apte à exécuter de manière automatique toutes les opérations sur les nombres représentés en virgule flottante (addition flottante : 1,5 μ s).

2.4 - Mémoires internes

2.4.1 - La mémoire locale est composée de 16 registres dont 9 sont accessibles au programmeur.

2.4.2. - Mémoire opérateur

C'est une mémoire supplémentaire de 1 Kmots plus rapide que la mémoire centrale et qui peut fonctionner en simultanéité avec elle. Elle est destinée à contenir les opérateurs de convolution.

2.4.3 - Mémoire de contrôle

C'est une mémoire morte de 2 Kmots de 48 bits qui contient tous les micro-programmes.

La micro-instruction permet en 70 ns d'exécuter en simultanéité les opérations suivantes :

- transfert sur les deux bus α et β .
- commande d'une des deux unités arithmétiques.
- lancement de lecture/écriture sur la mémoire centrale ou sur la mémoire opérateur.
- commande d'entrée/sortie.
- test et branchement à l'adresse suivante.

3 - PROGRAMMATION DU GEOPROCESSEUR

Les micro-programmes contenus dans la mémoire de contrôle interprètent un répertoire d'instruction étendu dont les caractéristiques essentielles sont les suivantes :

3.1 - Le programmeur dispose de :

- . 2 accumulateurs
- . 3 bases
- . 3 index

Les instructions à référence mémoire ayant toujours le même calcul d'adresse :

$$\text{Adresse} = (\text{Base}) + (\text{Index}) + \text{déplacement}$$

3.2 - Le répertoire comporte en plus des instructions habituelles :

- l'arithmétique flottante
- la convolution
- la transformée de Fourier
- un jeu "d'instructions sur vecteurs"
- des instructions "système" mettant en jeu un superviseur micro-programmé ou micro-système.

3.3 - Micro-système

3.3.1 - Motivations

Le traitement d'un grand nombre de données en temps réel (ou ramené au cas du temps réel si l'on part de bandes comportant des enregistrements très longs) débute toujours par ce qu'on pourrait appeler une gestion de fichier rapide en temps réel : démultiplexage des données d'entrée, transfert de bande à disque, etc...

La gestion de fichier fait en général appel au système de base de l'ordinateur qui est toujours trop lent pour pouvoir réagir en temps réel et limite de ce fait les performances globales du traitement, même si par ailleurs les temps de calculs sont courts. Cela est déjà vrai avec les gros ordinateurs et l'est encore plus avec les mini-ordinateurs.

Dans ce domaine, le couplage d'un Array-Processus n'apporte rien, car celui-ci n'est pas conçu pour ce genre d'opérations.

C'est ce qui nous a amené, afin de parfaire l'orientation du Géoprocésseur vers le traitement du signal, à profiter de la rapidité du hardware pour accélérer, en les microprogrammant, les fonctions de synchronisation nécessaires à un fonctionnement en multiprogrammation.

3.3.2 - Description sommaire

Le micro-système est bâti autour de la notion de processeur et de tâche.

Une tâche est un ensemble composé d'un descripteur de tâche et d'un programme. Le calculateur ne peut exécuter le programme relatif à une tâche :

- que si celle-ci a été demandée par une autre ou par un événement extérieur,
- que si elle ne s'est pas mise en attente d'un événement.

Chaque tâche est relative à un processeur et un seul, et lorsqu'elle est demandée, elle vient se mettre dans la file d'attente de ce pro-



GÉOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMÉRIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

cesseur, cette opération étant effectuée par le "scheduler" micro-programmé.

Le scheduler peut également retirer de la file la tâche de tête, si celle-ci se met en attente et la réinclure lorsqu'elle sera réveillée.

Un processeur est virtuel et n'a d'existence que si sa file d'attente n'est pas vide, donc s'il a des tâches à "exécuter".

Les processeurs sont hiérarchisés et un "dispatcher" micro-programmé est apte, à chaque instant, à reconnaître le plus prioritaire ayant une file d'attente non vide. Dans ce cas, le calculateur commence à exécuter le programme relatif à la tâche située en tête de file, après avoir sauvegardé le contexte de celui de la tâche en cours, le cas échéant.

3.3.3 - Avantages

- Rapidité : un changement complet de contexte : mise en file d'attente d'une tâche, sauvegarde de la tâche en cours et initialisation d'une nouvelle tâche, dure 14 μ s.

- Possibilité de construire rapidement un logiciel d'exploitation adapté à l'utilisation, sans qu'il soit nécessaire de faire appel aux fonctions d'un moniteur software : on peut utiliser directement les instructions système. A la limite, pour une application simple, on écrit directement les tâches nécessaires à cette application sans se soucier de la présence de tâches résidentes pour une autre application ; le micro-système résoud automatiquement tous les conflits.

- Le système de base est réduit et se contente d'introduire et de lancer l'ensemble des tâches constituant une application.

4 - EXEMPLE DE TRAITEMENT A BORD D'UN BATEAU GÉOPHYSIQUE

4.1 - Configuration (fig. 2)

Dans cette configuration, les bandes B_1 et B_2 , le disque D_1 sont utilisés pour une opération dite prétraitement et qui s'effectue en simultanéité avec le traitement (il s'agit essentiellement d'entrée/sortie avec peu d'occupation du temps de l'unité centrale).

Cette configuration donnée en exemple n'est pas limitative. On peut en particulier augmenter la puissance de calcul en mettant 2 unités centrales sur la même mémoire centrale.

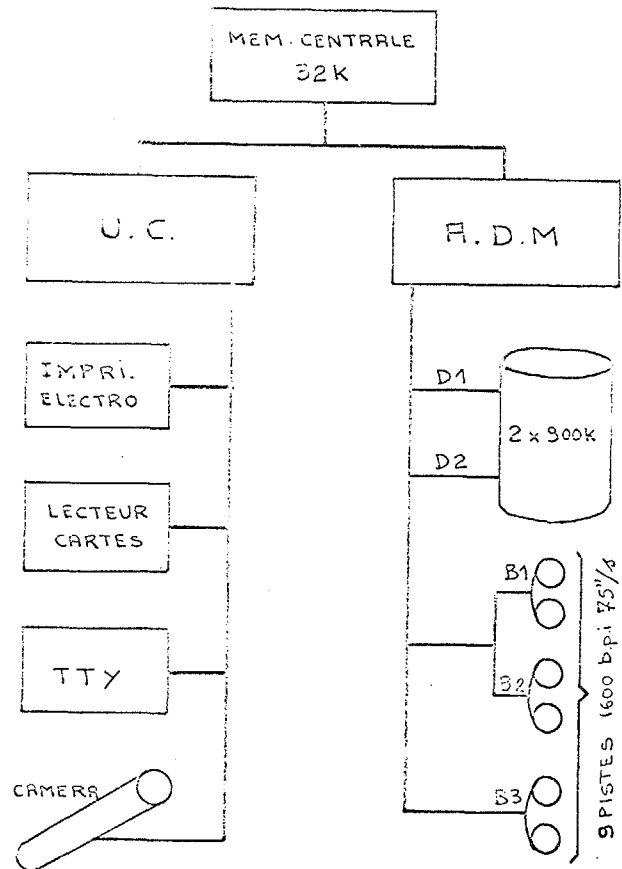


Fig. 2

4.2 - Organisation du traitement

4.2.1 - Prétraitement

Il permet d'obtenir à partir des bandes entrées sur B_1 des enregistrements "démultiplexés" sur B_2 , c'est-à-dire que la bande écrite par B_2 comporte autant d'enregistrement qu'il y a de "traces", c'est-à-dire dans notre exemple, 48 par "tir".

De plus, tous les 50 tirs environ, on recherche la loi de vitesse des ondes dans le sol en effectuant 20 corrections dynamiques avec vingt vitesses différentes. Le résultat de ces essais est sorti sur l'imprimante électrostatique sous forme de courbes. Cette opération s'appelant "analyse de vitesse".

4.2.2 - Traitement des bandes multiplexées

Cette phase utilise en permanence :

- la bande B_3 comme dérouleur d'entrée,
- la caméra comme périphérique de sortie et elle partage avec l'analyse de vitesse,
- le disque D_2 ,
- la zone de travail ZT en mémoire centrale.

GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

Le traitement effectué comprend :

- entrée d'une trace en mémoire centrale
- application d'une loi de gain
- calcul de l'opérateur de déconvolution (autocorrélation sur 512 termes)
- déconvolution : opérateur de 64 termes
- filtrage : opérateur de 50 termes
- corrections
- couverture multiple (addition sur disque)
- déconvolution (opérateur 128 termes)
- filtrage (opérateur 50 termes)
- sortie caméra.

Ce traitement est interrompu pour le "calcul des lois de vitesse" lorsque les 48 traces relatives à un même point de réflexion du sous-sol sont sur disque D 2. On effectue alors :

- déconvolution des 48 traces
- filtrage des 48 traces
- application de 20 corrections dynamiques
- sortie sur caméra électrostatique des 48 traces corrigées et de leur somme.

4.3 - Partage de la mémoire centrale

La mémoire est découpée en 3 zones :

- zone système - ZS
- zone de prétraitement ZPT
- zone de traitement ZT partagée entre le traitement et les analyses de vitesse.

Les tailles sont :

- . ZS : 4 K mots
- . ZPT: 8 K mots
- . ZT : 16 K mots
- . Libre : 4 K

4.4 - Performances estimées

4.4.1 - Prétraitement

5 x 48 = 240 ms 0,25 sec./tir

4.4.2 - Analyse de vitesse

Tous les 50 tirs

48 déconvolutions (64 pt) 48 x 90
 48 filtrages (50 pt) 48 x 50
 (20 x 48) corrections 20 x 48 x 20
 0,55 sec./tir

4.4.3 - Traitement

48 lois de gain	48 x 10	}	48 x 185
48 déconvolutions	48 x 90		
48 filtrages	48 x 50		
48 corrections	48 x 20		
48 sommations	48 x 10	}	250
1 déconvolution	1 x 180		
1 filtrage	1 x 50		
1 sortie caméra	1 x 10		

8,7 sec./tir

TOTAL : 9 sec./tir

Avec 30 % de sécurité : 12 sec./tir pour le traitement le plus complet.

5 - CONCLUSIONS

Face aux systèmes hybrides composés d'un mini-calculateur sur lequel on greffe en parasite mémoire un "Array-Processeur", l'intérêt d'une étude aussi importante que celle ayant abouti au GEOPROCESSEUR se dégage des remarques suivantes :

- format interne adapté à la représentation des signaux physiques ;
- facilité de programmation d'une application grâce à l'existence des instructions spécialisées dans le traitement du signal, à l'existence des instructions système (dans le cas du temps réel) ;
- souplesse d'emploi, la configuration pouvant s'étendre jusqu'à un système multiprocesseur avec un grand nombre de périphériques, sans effort software notable ;
- transportabilité dans le cas de configurations réduites.

Si pour chacun des points évoqués ci-dessus on peut imaginer des solutions ne nécessitant pas l'étude d'un appareillage spécialisé, aucune nous semble-t-il, ne peut présenter l'ensemble des caractéristiques qui font du Géoprocasseur un calculateur quasi universel dans le domaine du traitement du signal.

BIBLIOGRAPHIE

- F. ANCEAU, Microprogrammed system for task management. Séminaire IRIA, mars 1971.
- C. BEAUDUCEL, J. CRETIN, F. ANCEAU, Ph. DROUET, Géoprocasseur : calculateur rapide à micro-système. Congrès AFCET (Alpe d'Huez, avril 1974).



GEOPROCESSEUR :
CALCULATEUR NUMERIQUE ADAPTE AU TRAITEMENT DU SIGNAL

- F. ANCEAU, C. BEAUDUCEL, P. COURBOULAY, J. CRETIN,
Ph. DROUET, Geoprocasseur : a computer for geo-
physical research (Information Processing 74,
North Holland Publishing). IFIP Congress,
August 1974.
- F. ANCEAU, Contribution à l'étude des systèmes
hiérarchisés de ressources dans l'architecture
des machines informatiques. Thèse présentée à
l'Université Scientifique et Médicale de
Grenoble, le 5 décembre 1974.