

ORSAY  
n° d'ordre:

# THESE

PRESENTEE A L'UNIVERSITE DE PARIS-SUD

CENTRE D'ORSAY

PAR

Mohamad Fawaz MOUSSELY

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR INGENIEUR

ETUDE ET REALISATION D'UN PROTOTYPE  
DE MESUREUR ABSOLU  
DE NOMBRES D'ONDES LASER

SOUTENUE LE 22 juin 1982 DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

MM.	S. LOWENTHAL	Président
	P. JACQUINOT	Examineur
	P. BOUCHARREINE	"
	S. LIBERMAN	"
	J. PINARD	"



## TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>I - PRINCIPE DU SIGMAMETRE</u>	6
<u>II - PRINCIPE DE L'APPAREIL</u>	9
<u>III - CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL</u>	13
A - CALCUL DU POUVOIR DE RESOLUTION DE L'APPAREIL	13
B - CALCUL DU DOMAINE SPECTRAL DES MESURES DE L'APPAREIL	16
<u>IV - DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL</u>	18
A - LE SPECTROGRAPHE	18
1. La barrette de photodiodes	19
α) Principe du fonctionnement	19
β) Caractéristiques opto-électroniques de la barrette	21
2. Les caractéristiques du disperser	22
3. Détermination des meilleures conditions d'utilisation du spectrographe	23
α) L'analyse du spectre cannelé	23
β) L'analyse des raies spectrales	26
B - LE SIGMAMETRE	28
1. L'interféromètre ; principe du bloc séparateur de faisceau ; calcul de ses paramètres	28
2. Réalisation et montage des différents éléments du bloc optique : achromatisme	31

3. Adaptation des différentes sources lumineuses à l'interféromètre ; alignement	34
α) le faisceau de lumière blanche	35
β) le faisceau de lumière d'un laser	36
4. Système électronique de détection des signaux optiques donnés par l'interféromètre	37
 C - PRESENTATION DE L'ENSEMBLE OPTIQUE DE L'APPAREIL ; COUPLAGE ENTRE LES DIFFERENTS ELEMENTS	 39
 <u>V - DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE DE L'APPAREIL</u>	 43
 A - LES FONCTIONS DU MICROPROCESSEUR DANS L'APPAREIL	 44
1. Le pilotage du fonctionnement de l'appareil	44
2. La commande du système d'acquisition de données	45
3. Le traitement numérique des données	46
 B - LE MATERIEL DU SYSTEME	 46
1. L'Unité Centrale	47
α) Le microprocesseur	47
β) Les mémoires	48
2. L'interface d'entrée/sortie, son utilisation dans le pilotage du fonctionnement de l'appareil	48
α) La commande des relais	50
β) Le dialogue entre le système et l'utilisateur ; la commande "start-acquisition" et l'unité d'affichage	50
γ) La commande de l'amplification du signal de la barrette	55
3. Les unités périphériques d'acquisition de données	55
α) Le transfert de données par accès direct à la mémoire : le DMAC	56
β) L'unité périphérique d'acquisition du signal de la barrette de photodiodes	58
γ) Les unités périphériques d'acquisition des signaux $\sin 2\pi\epsilon$ et $\cos 2\pi\epsilon$	60

C - LE PROGRAMME PRINCIPAL ET LES SOUS-PROGRAMMES DE TRAITEMENT NUMERIQUE	61
1. L'organigramme du programme principal	61
2. L'organigramme du sous-programme "EPS"	65
3. L'organigramme du sous-programme "CVBTD"	65
<u>VI - RESULTATS EXPERIMENTAUX</u>	67
<u>CONCLUSION</u>	69
<u>REFERENCES</u>	70
<u>ANNEXE</u>	



INTRODUCTION





## INTRODUCTION

La découverte des lasers à colorant, accordables en fréquences, a permis le développement, depuis une dizaine d'années, de nouvelles méthodes de spectroscopie ainsi que la réalisation d'expériences destinées à étudier l'interaction entre atome et rayonnement. Dans l'un comme dans l'autre cas, on sera toujours amené à accorder la fréquence du laser sur la fréquence de la transition atomique que l'on désire étudier. Cela pose un problème que l'on résout généralement en utilisant monochromateur et lampe spectrale adaptée. Cette opération délicate ne se fait souvent pas sans une part de tâtonnement ; ainsi un bon nombre d'équipes se sont penchées sur le problème de la mesure absolue de la fréquence du rayonnement émis par les lasers accordables.

Nous pouvons rappeler quelles seraient les caractéristiques d'un appareil idéal ; il devrait :

1°/ effectuer des mesures absolues de fréquences (ou de nombre d'ondes ou de longueur d'ondes) avec la précision recherchée dans l'expérience ;

2°/ être en mesure d'être utilisable aussi bien avec des lasers continus qu'avec des lasers fonctionnant en impulsions ; donc, donner des mesures quasi instantanées de la fréquence, ce qui implique que sa détermination ne peut être obtenue par déplacement d'une pièce mobile ;

3°/ permettre l'asservissement et le balayage en fréquence de ces lasers.

Ainsi, un certain nombre d'instruments ont vu le jour. Nous allons rapidement passer en revue les quatre principaux qui permettent d'effectuer des mesures absolues avec des précisions élevées :

1°/ Le lambdamètre {1} dont le principe est basé sur la très ancienne méthode du comptage de franges ; il s'agit d'un interféromètre de Michelson dont on fait varier la différence de marche (D.D.M.). Il est traversé par le faisceau du laser à analyser (de longueur d'onde  $\lambda_i$ ) et le faisceau d'un laser de référence (de longueur d'onde  $\lambda_r$  connue). En sortie, les deux faisceaux sont analysés indépendamment par deux détecteurs. Cela permet alors de compter les nombres de franges ( $N_r, N_i$ ) pour les deux faisceaux et pour la même variation de la D.D.M.

$$\text{On a alors : } \lambda_i = \lambda_r \times \frac{N_r}{N_i}$$

Dans les systèmes perfectionnés récemment mis au point, un système électronique permet de mesurer la fraction de frange.  $N_i$  est alors un nombre fractionnaire, ce qui permet d'augmenter la précision de l'instrument pour atteindre quelques  $10^{-9}$ . Cependant, il ne peut pas effectuer de mesures instantanées et, par conséquent, il n'est pas adapté à la mesure de la longueur d'onde des lasers fonctionnant en impulsions.

## 2°/ Le sigmamètre {2}

Nous ne donnerons pas ici son principe qui sera développé dans le chapitre I. Nous dirons simplement que, bien que sensiblement plus complexe que le lambdamètre (il est composé de quatre interféromètres de Michelson de D.D.M. fixes), il remplit toutes les conditions de l'appareil idéal énoncées plus haut. La précision de l'instrument réalisé atteint  $10^{-8}$  ; il peut fonctionner aussi bien avec le rayonnement de sources continues ou pulsées et ceci dans un très large domaine de fréquences, par exemple l'ensemble du domaine visible.

## 3°/ Le mesureur de longueur d'onde "Wavelength Meter" {3}

Cet instrument est comparable dans ses propriétés au sigmamètre. Il utilise quatre interféromètres de Fabry-Perot de D.D.M. fixes ; les anneaux à l'infini, que donnent ces interféromètres de la source à étudier et d'une source de référence, sont analysés à l'aide d'une barrette de photodiodes. Un micro-ordinateur permet de traiter directement les informations de la barrette, afin de déterminer la longueur d'onde cherchée.

L'instrument réalisé a une précision sensiblement plus faible que les précédents : elle est de  $10^{-7}$  ; d'autre part, l'utilisation d'un interféromètre Fabry-Perot ne permet pas de le rendre parfaitement achromatique dans un grand domaine spectral.

## 4°/ Le Fizeau Wavemeter {4}

Nous nous attarderons un peu plus longuement sur cet appareil remarquable par sa simplicité. Il utilise un interféromètre de Fizeau, c'est-à-dire composé de deux lames formant un coin d'air. Cet interféromètre étant éclairé à l'aide d'un faisceau laser parallèle, les deux faisceaux

réfléchis interfèrent pour donner un système de franges rectilignes parallèles qui est analysé par une barrette de photodiodes (figure 1). La comparaison du signal sinusoïdal observé pour, respectivement, le rayonnement laser dont on veut mesurer la longueur d'onde  $\lambda_i$  et celui d'un laser de référence  $\lambda_r$ , permet de déterminer  $\lambda_i$ . Ceci se fait en deux temps à l'aide d'un mini-ordinateur. Dans un premier temps, on

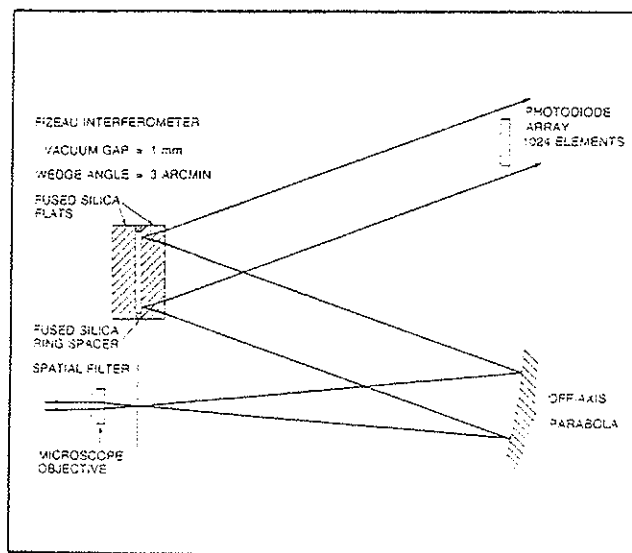


Figure 1

#### Fizeau Wavemeter

détermine une valeur de  $\lambda_i$  à partir de la période des franges  $P_i$  et  $P_r$  :

$$\lambda_i = \lambda_r \frac{P_i}{P_r}$$

; cette mesure est peu précise, mais permet de calculer l'ordre d'interférence à  $\lambda_i$ . La valeur finale et précise de  $\lambda_i$  est obtenue dans un deuxième temps en comparant les phases respectives du signal de franges pour les longueurs d'ondes  $\lambda_i$  et  $\lambda_r$ . La précision des mesures indiquée par les auteurs est de l'ordre de  $10^{-7}$ .

Cet instrument pose un certain nombre de problèmes associés au fait que les erreurs de phase du signal d'interférence doivent être inférieures

à quelques  $10^{-4}$  sur l'ensemble de la pièce optique dont les dimensions doivent être de l'ordre de plusieurs centimètres.

L'instrument, que nous allons étudier et décrire, est une association d'un spectrographe et d'un sigmamètre comportant un seul interféromètre de différence de marche de 1 mm ; il permet la mesure absolue de nombres d'ondes avec une précision de l'ordre de  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ , précision tout à fait suffisante pour caler un laser (continu ou pulsé) sur une fréquence bien déterminée. Cette précision modeste permet de donner à l'appareil une certaine autonomie ; il n'utilise en outre pas de laser monomode comme référence et comportera son propre système d'étalonnage.

Avant de décrire notre appareil (chapitre IV), nous allons rappeler dans le chapitre I le fonctionnement du sigmamètre. Nous passerons ensuite à la description du principe de l'appareil (chapitre II) et nous en déterminerons les principaux paramètres (chapitre III). Le chapitre IV sera consacré à l'ensemble micro-informatique qui assure le traitement des données et le contrôle du fonctionnement de l'appareil. Nous décrirons finalement, au chapitre VI, quelques expériences tests.



CHAPITRE I

PRINCIPE DU SIGMAMETRE





## I - PRINCIPE DU SIGMAMETRE

L'élément de base du sigmamètre est un interféromètre de Michelson. Si l'on éclaire l'interféromètre par un faisceau de lumière en ondes planes de nombre d'ondes  $\sigma$ , on recueille en sortie un flux lumineux d'intensité  $\frac{I_0}{2} (1 + \cos 2\pi\sigma\delta)$  où  $\delta$  est la D.D.M. entre les deux bras de l'interféromètre et  $I_0$  l'intensité du faisceau entrant. De même, si l'on place dans l'un des bras une lame  $\frac{\lambda}{4}$  introduisant ainsi une différence de phase de  $\frac{\pi}{2}$  par rapport au chemin optique précédent, on obtiendra un signal de la forme  $\frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\pi\sigma\delta)$ . Ces deux faisceaux sont obtenus simultanément à partir d'un même interféromètre à deux voies.

La figure 2 représente le schéma d'un appareil qui a été effectivement réalisé. L'interféromètre comporte deux parties : un bloc optique relativement complexe et un miroir positionné à une distance  $\frac{\delta}{2}$  de la face supérieure du bloc par l'intermédiaire de cales en Invar.

Comme le montre la figure, le bloc optique est monté à partir de plusieurs pièces préalablement traitées, puis assemblées entre elles par adhérence moléculaire sous contrôle interférométrique. Cet ensemble joue de multiples rôles :

INTERFEROMETER

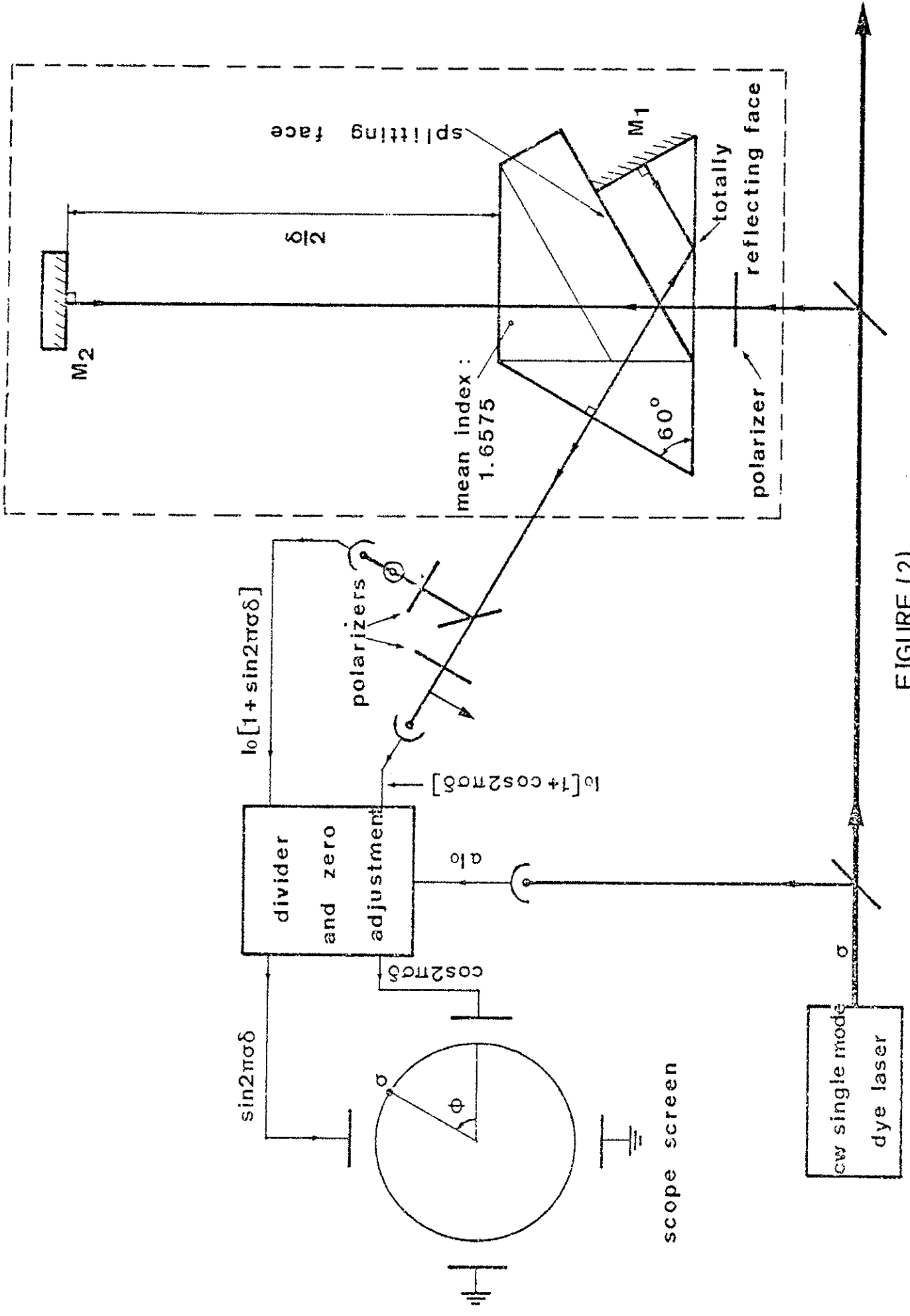


FIGURE (2)

- a) une de ses faces internes est utilisée comme séparatrice de faisceau ;  
 b) une autre face est utilisée comme miroir ;  
 c) il comporte, dans un des bras, une face sur laquelle le faisceau vient se réfléchir totalement. Cette réflexion totale a pour but d'introduire entre les deux composantes du faisceau polarisées perpendiculairement et parallèlement au plan d'incidence, un déphasage de  $\phi_{\parallel} - \phi_{\perp} = \frac{\pi}{4}$  quasiment indépendant de la longueur d'onde.

Le faisceau entrant dans l'interféromètre est polarisé à 45° du plan de la figure. En sortie, chacune de ses composantes  $I_{\parallel}$  et  $I_{\perp}$  est analysée indépendamment par deux détecteurs. On obtiendra ainsi les deux signaux recherchés :

$$I_{\parallel} = \frac{I'}{2} (1 + \cos 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{\parallel})$$

$$\text{et } I_{\perp} = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{\parallel})$$

Ils subissent ensuite un traitement électronique simple, afin de les réduire à deux signaux électriques respectivement proportionnels à  $\cos 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{\parallel}$  et  $\sin 2\pi\sigma\delta + 2\phi_{\parallel}$ , lesquels, portés sur les plaques horizontales et verticales d'un oscilloscope, donnent un spot qui décrit un cercle complet lorsque le nombre d'ondes  $\sigma$  varie d'une quantité égale à  $\frac{1}{\delta}$  et dont l'argument  $\phi$ , en prenant comme origine  $2\phi_{\parallel}$ , donne directement la valeur de  $2\pi\sigma\delta$  ; ainsi, connaissant  $\delta$ , on peut déduire de cet argument  $\sigma$  modulo  $\frac{1}{\delta}$ .

Le principe d'un appareil de mesure de  $\sigma$  est alors évident : si l'on considère plusieurs interféromètres de D.D.M. respectivement et

rigoureusement égale à 0,1, 1, 10 et 100 cm, comme un compteur, la lecture de chacun des arguments correspondants  $\phi_1, \phi_2, \phi_3$  et  $\phi_4$  donnera les chiffres des unités, des dixièmes, des centièmes et des millièmes du nombre d'ondes  $\sigma$  exprimé en  $\text{cm}^{-1}$ , avec une indétermination de  $K \times 10 \text{ cm}^{-1}$  qui peut être aisément levée à l'aide d'un modeste spectromètre à réseau. La précision ultime d'un tel instrument est donnée par la précision avec laquelle on peut effectuer la mesure de  $\phi$  ; cette mesure est effectuée couramment avec une précision de  $\frac{2\pi}{100}$ , ce qui, dans l'appareil précédent, représente une précision de mesure de  $10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ .

Dans l'appareil qui a effectivement été réalisé, les quatre D.D.M. ne sont pas rigoureusement égales à 0,1, 1, 10 et 100 cm. L'appareil nécessite donc un étalonnage préalable qui consiste à mesurer chacune des D.D.M. avec une grande précision ; ceci ne peut être réalisé que par l'utilisation de plusieurs sources de références de nombres d'ondes connus avec une précision meilleure que celle recherchée par l'instrument et d'une méthode d'excédent fractionnaire. L'utilisation de telles sources, qui sont elles-mêmes complexes, rend l'appareil (comme tout appareil destiné à effectuer des mesures très précises) d'un maniement relativement délicat.

Il est en fait montré que bon nombre de mesures (surtout utilisant des lasers fonctionnant en impulsion) ne nécessitent pas de grandes précisions. C'est pour cette raison que nous avons entrepris la réalisation de l'instrument qui est décrit dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

PRINCIPE DE L'APPAREIL



## II - PRINCIPE DE L'APPAREIL

Comme nous l'avons dit dans l'introduction, notre appareil possède comme élément de base un sigmamètre. Cependant, comme nous l'avons également fait remarquer, le sigmamètre ne peut à lui seul effectuer une mesure complète de nombre d'ondes, mais seulement en donner les derniers chiffres significatifs, c'est-à-dire : si, par exemple, la différence de marche de l'interféromètre (constituant le sigmamètre) est de 1 cm, l'instrument donnera uniquement les chiffres des dixièmes et des centièmes de  $\text{cm}^{-1}$ . Il faut alors lui adjoindre un instrument de type classique pour avoir les premiers chiffres et compléter ainsi la mesure ; ainsi donc notre ensemble comportera également un petit spectromètre à réseau. Mais afin de conserver à l'appareil son caractère fondamental de mesureur instantané de nombre d'ondes, celui-ci est du type spectrographe : un spectromètre multicanal, utilisant comme détecteur une barrette de photodiodes. Cette barrette a comme propriété de mémoriser instantanément l'ensemble du spectre par intégration du flux lumineux correspondant à chaque élément spectral, tout comme le ferait une plaque photographique.

Bien évidemment, l'ensemble des informations données d'une part par la barrette et d'autre part par le sigmamètre n'est pas directement

exploitable. Nous avons donc été amenés à élaborer un système d'acquisition et de traitement de données basé sur l'utilisation d'un microprocesseur.

En conclusion, l'appareil est constitué de trois éléments principaux :

- 1°/ un sigmamètre, constitué d'un seul interféromètre de Michelson,
- 2°/ un spectrographe, muni d'un réseau linéaire de photodiodes,
- 3°/ un système micro-informatique.

Nous allons voir maintenant comment un couplage astucieux de ces différents éléments permet leur étalonnage pour, finalement, aboutir à une mesure absolue de nombres d'ondes.

La figure 3 montre le schéma de principe du fonctionnement de l'appareil ; chacun des éléments ci-dessus cités y est représenté. Afin d'effectuer une mesure, le faisceau lumineux d'un laser de nombre d'ondes  $\sigma_L$  inconnu est envoyé simultanément dans le sigmamètre et le spectrographe. Tout d'abord, le sigmamètre, comme nous l'avons vu dans l'introduction, nous permet de mesurer ce nombre d'ondes modulo  $\frac{1}{\delta}$  ; on a alors :

$$\sigma_L = \frac{1}{\delta} (N_L + \epsilon_L)$$

où  $N_L$  est un nombre entier à déterminer et  $\epsilon_L$  l'excédent fractionnaire directement donné par les signaux  $\sin$  et  $\cos$  qui en sont issus. Ensuite le spectrographe, en nous donnant une mesure  $\sigma'_L$  de précision modeste mais toutefois suffisante, nous permet de déterminer sans ambiguïté le nombre entier  $N_L$  par l'examen du produit  $\sigma'_L \cdot \delta$  en tenant



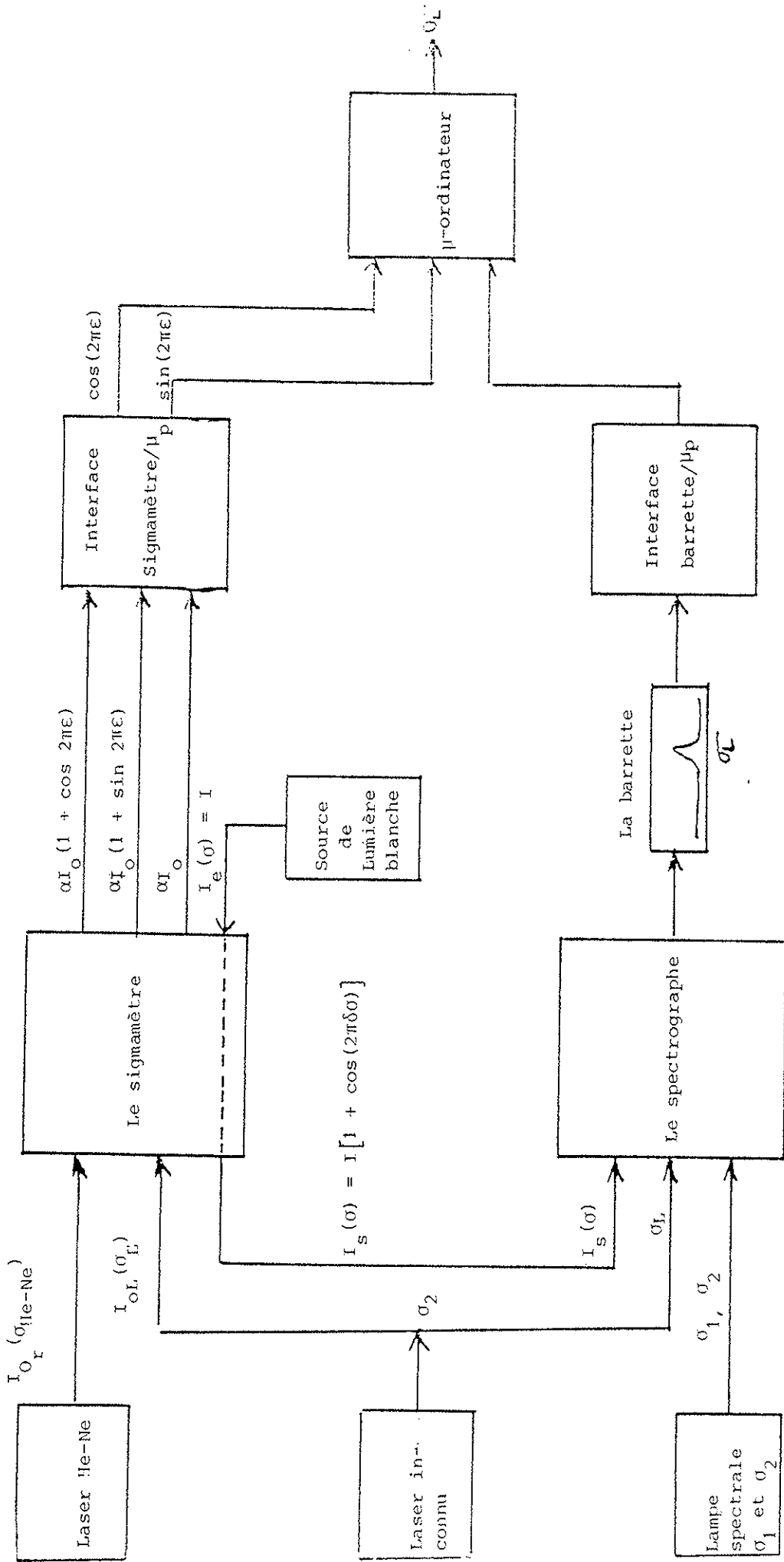


Figure 3  
Schéma de principe du fonctionnement de l'appareil.

compte de la valeur de  $\varepsilon_L$ . Comme nous pouvons le constater, la mesure de  $\sigma_L$  nécessite la connaissance, avec une bonne précision, de la différence de marche  $\delta$  de l'interféromètre ainsi qu'un étalonnage relativement précis du spectrographe, c'est-à-dire une détermination sur la barrette d'une échelle de nombres d'ondes.

Cette opération d'étalonnage est réalisée à l'aide de trois sources lumineuses de références : une lampe spectrale, une source de lumière blanche et une source laser.

La lampe spectrale, dont la lumière ne traverse que le spectrographe, est choisie de façon à donner deux raies de nombres d'ondes  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$  telles qu'elles permettent d'étalonner la barrette de photodiodes en deux points situés proches de ses extrémités.

La lumière provenant de la source blanche, elle, par contre, traverse d'abord l'interféromètre avant d'être analysée par le spectrographe. On obtient alors sur la barrette un spectre cannelé. La période des cannelures est définie par l'interféromètre ; elle est égale à  $\Delta\sigma = \frac{1}{\delta}$  et est constante dans tout le spectre, pourvu que l'interféromètre soit parfaitement achromatique. Ces cannelures permettent d'obtenir sur la barrette une échelle parfaitement linéaire en nombres d'ondes.\*

D'autre part, en mesurant le nombre de cannelures situées entre les deux raies de référence  $\sigma_1$  et  $\sigma_2$ , nous obtenons une prémesure de la différence de marche de l'interféromètre  $\delta' \approx \frac{N}{\sigma_2 - \sigma_1}$

---

\* Cette échelle nous permet d'avoir un étalonnage beaucoup plus sûr que ne le serait celui déterminé à partir de la seule loi de dispersion du spectrographe et d'une raie de référence.

La source laser He-Ne ne traverse que le sigmamètre ; celui-ci délivre alors une mesure de l'excédent fractionnaire  $\epsilon_r$  , d'où l'on obtient la différence de marche modulo  $\frac{1}{\sigma_r}$  :

$$\delta = \frac{1}{\sigma_r} (N_r + \epsilon_r)$$

La mesure complète de  $\delta$  est effectuée à partir de la prémesure  $\delta'$  qui permet de déterminer le nombre entier  $N_r$ .

Toutes les opérations ci-dessus énumérées sont effectuées par le micro-ordinateur qui permet à tout instant d'effectuer ou de contrôler l'étalonnage de l'appareil et de calculer les nombres d'ondes.



CHAPITRE III

CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL



### III - CALCUL DES PARAMETRES PRINCIPAUX DE L'APPAREIL

Dans ce chapitre, nous allons déterminer deux paramètres principaux de l'appareil : son pouvoir de résolution et le domaine spectral de mesure.

Les valeurs de ces deux paramètres sont en fait limitées, comme nous allons le voir, par le nombre des éléments de la barrette de photodiodes que nous avons utilisée dans le spectrographe ; ce nombre est égal à 2048.

#### A - CALCUL DU POUVOIR DE RESOLUTION DE L'APPAREIL

Le fait que la précision des mesures de l'appareil est celle de son sigmamètre, la détermination du pouvoir de résolution se ramène au choix de la différence de marche  $\delta$  de l'interféromètre du sigmamètre : en effet, l'incertitude  $\Delta\sigma$  des mesures de l'appareil est égale à  $\frac{\Delta\varepsilon}{\delta}$  où  $\Delta\varepsilon$  étant l'incertitude sur les mesures de l'excédent fractionnaire  $\varepsilon$ . Nous avons alors :

$$R = \frac{\sigma}{\Delta\sigma} = \frac{\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot \delta$$

Cette relation montre que, afin d'augmenter le pouvoir de résolution, il nous suffit d'augmenter la différence de marche  $\delta$ , mais comme nous l'avons remarqué dans le principe de l'appareil, l'étalonnage nécessite une mesure précise de cette différence de marche. Cette mesure précise n'est possible que pour des valeurs de  $\delta$  inférieures à une certaine valeur  $\delta_{\max}$  que nous allons calculer maintenant.

Nous avons vu dans le deuxième chapitre que la mesure de  $\delta$  est effectuée en deux étapes : d'abord l'utilisation d'un laser He-Ne de référence permet de calculer  $\delta$  modulo  $\frac{1}{\sigma_{\text{He-Ne}}}$  ; cette indétermination sur  $\delta$  est levée ensuite par une autre mesure  $\delta'$  de  $\delta$ , effectuée cette fois par le spectrographe. Et ceci n'est possible que si l'incertitude  $\Delta\delta'$  sur la mesure de  $\delta'$  est inférieure à  $\frac{1}{\sigma_{\text{He-Ne}}}$ . Nous demandons donc au spectrographe, par une analyse du spectre cannelé enregistré sur la barrette, de pouvoir différencier deux différences de marche voisines d'une longueur d'onde  $\lambda_{\text{He-Ne}}$ . Nous avons admis et vérifié expérimentalement que ceci était réalisé lorsque le nombre de cannelures comptées entre deux raies de références situées à l'une et l'autre extrémité du spectre dispersé sur la barrette varie alors d'une quantité égale au quart de la période à condition toutefois que cette variation corresponde au moins à un élément de la barrette. Cette condition a pour conséquence de définir la différence de marche maximum de l'interféromètre par la relation :

$$\delta \leq N \lambda_{\text{He-Ne}} = \delta_{\max}$$

où  $N$  est le nombre d'éléments de la barrette entre les deux raies de références (au maximum 2048).



Pour démontrer cette relation, nous devons tenir compte du fait que la dispersion du spectre sur la barrette de photodiodes n'est pas linéaire en nombre d'ondes et que de ce fait les cannelures ont une période assez fortement variable ; elle est par contre approximativement linéaire en longueur d'onde. Il suffit alors de calculer indépendamment pour  $\lambda_{\min}$  et  $\lambda_{\max}$  (correspondant aux deux raies de références) les variations de l'ordre d'interférences pour deux différences de marche  $\delta$  et  $\delta + \lambda_{\text{He-Ne}}$

Pour  $\lambda_{\min}$  on a :

$$\delta = \lambda_{\min} \cdot P_{\min} \quad (P \text{ fractionnaire})$$

et par différenciation on obtient :

$$\Delta P_{\min} = \frac{\Delta \delta}{\lambda_{\min}} = \frac{\lambda_{\text{He-Ne}}}{\lambda_{\min}}$$

Exprimée en longueur d'onde, cette variation correspondra à :

$$\Delta \lambda_{\min} = \frac{\lambda_{\min}^2}{\delta} \quad \Delta P_{\min} = \frac{\lambda_{\text{He-Ne}} \cdot \lambda_{\min}}{\delta}$$

où  $\frac{\lambda_{\min}^2}{\delta}$  est la période des cannelures au voisinage de  $\lambda_{\min}$ .

De même pour  $\lambda_{\max}$ , on aura :

$$\Delta \lambda_{\max} = \frac{\lambda_{\text{He-Ne}} \cdot \lambda_{\max}}{\delta}$$

la variation enregistrée sera alors :

$$\Delta \lambda_{\max} - \Delta \lambda_{\min} = \frac{\lambda_{\text{He-Ne}}}{\delta} (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$$

Comme il y a une correspondance linéaire entre les longueurs d'ondes et les éléments de la barrette,

à  $\lambda_{\max} - \lambda_{\min}$  on peut faire correspondre le nombre total d'éléments  $N$  de la barrette,

et  $\Delta\lambda_{\max} - \Delta\lambda_{\min}$  devra alors correspondre à au moins un élément, d'où la relation :

$$\delta_{\max} = \lambda_{\text{He-Ne}}^N$$

Pour une barrette comprenant 2048 photodiodes (le maximum que l'on puisse trouver chez les constructeurs) et sachant que la longueur d'onde de la raie de référence est : 633 nm (laser He-Ne), nous obtenons une différence de marche maximum de l'ordre de 1,3 mm. Nous avons donc fixé la différence de marche de l'interféromètre à 1 mm.

Ce paramètre étant fixé, il déterminera le pouvoir de résolution de l'appareil qui sera égal à  $1.6 \cdot 10^5$  [la relation  $R = \frac{\sigma}{\Delta\epsilon} \cdot \delta$ , pour  $\lambda = 625 \mu$  ( $\sigma = 1,6 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ ) et  $\Delta\epsilon = 10^{-2}$ ]

### B - CALCUL DU DOMAINE SPECTRAL DES MESURES DE L'APPAREIL

Ce paramètre est important pour la définition du spectrographe à utiliser ; son calcul se base sur la connaissance de la différence de marche  $\delta$  de l'interféromètre que nous venons de fixer à 1 mm. En effet, pour un tel interféromètre, la période des cannelures pour la longueur minimum du spectre est  $\frac{\lambda_{\min}^2}{\delta}$  ; si nous considérons qu'un échantillonnage de  $\sim 4$  points est nécessaire pour définir chaque période, le pas de la

barrette devra correspondre à  $\Delta\lambda = \frac{\lambda_{\min}^2}{4\delta}$  d'où le spectre enregistré

$$\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = N \frac{\lambda_{\min}^2}{4\delta} \sim 500 \frac{\lambda_{\min}^2}{\delta}$$

ce qui donne pour  $\lambda_{\min} = 550 \text{ nm}$

$$\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = 151,25 \text{ nm}$$

Nous pouvons donc couvrir le spectre de 550 nm à 700 nm, ce qui correspond aux longueurs d'ondes données par un laser à colorant fonctionnant avec l'ensemble des rhodamines (560 - 580 - 610 et 640).

Nous pouvons également vérifier qu'une variation de la différence de marche  $\lambda_{\text{He-Ne}}$  entraîne une variation du nombre de franges d'une quantité égale à un quart. En effet, nous avons :

$$\Delta P_{\max} - \Delta P_{\min} = \lambda_{\text{He-Ne}} \left( \frac{1}{\lambda_{\max}} - \frac{1}{\lambda_{\min}} \right) \sim 0.25$$



CHAPITRE IV

DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL



#### IV - DESCRIPTION DE LA PARTIE OPTIQUE DE L'APPAREIL

Dans ce chapitre, nous décrirons successivement et indépendamment les deux éléments principaux de l'appareil : le spectrographe et le sigmamètre.

Nous en donnerons les caractéristiques et définirons leurs conditions d'utilisation. Ce n'est qu'ensuite que nous décrirons l'ensemble de ces deux éléments couplés.

##### A - LE SPECTROGRAPHE

Le type de spectrographe que nous avons choisi est un spectrographe à réseau holographique concave à champ plan qui a été conçu tout spécialement en vue d'une utilisation avec un détecteur multicanal tel qu'une barrette plane de photodiodes ou un tube vidicon. Ce réseau donne de la fente d'entrée un spectre étalé sur une surface rigoureusement plane coïncidant avec le plan du détecteur. Ce type de spectrographe a aussi l'avantage d'avoir un montage optique très simple, composé uniquement d'un réseau, d'une fente et de la barrette de photodiodes.

Compte tenu de l'influence prépondérante des caractéristiques de la barrette de photodiodes sur celles du spectrographe, nous allons commencer ce paragraphe par la description de cette barrette.

### 1. La barrette de photodiodes

Il s'agit d'un réseau linéaire composé de 2048 photodiodes équidistantes (modèle RL2048H de chez RETICON). La figure 4 représente la géométrie des éléments photosensibles. La surface de chaque photodiode élémentaire est un rectangle de  $7 \mu$  de largeur sur  $300 \mu$  de hauteur. Le pas est de  $15 \mu$  ce qui donne à l'ensemble une dimension totale de  $300 \mu \times 30,72 \text{ mm}$ .

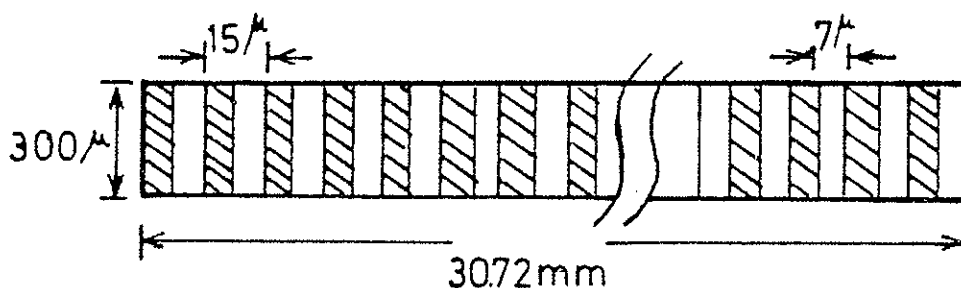


Figure 4

Chaque photodiode fait partie d'un circuit intégré qui permet de traiter son signal. Ce circuit permet également de sortir chacune des 2048 informations sous forme séquentielle, comme nous le verrons dans le sous-paragraphe suivant :

#### a) *Principe du fonctionnement*

La figure 5 représente un schéma électrique de principe équivalent de la barrette. Les capacités  $c$  de ce schéma, placées en parallèle avec les photodiodes sont initialement chargées ; si la barrette



est éclairée par un rayonnement quelconque, ces capacités redéchargeront alors avec une vitesse proportionnelle au flux lumineux reçu par les photodiodes correspondantes.

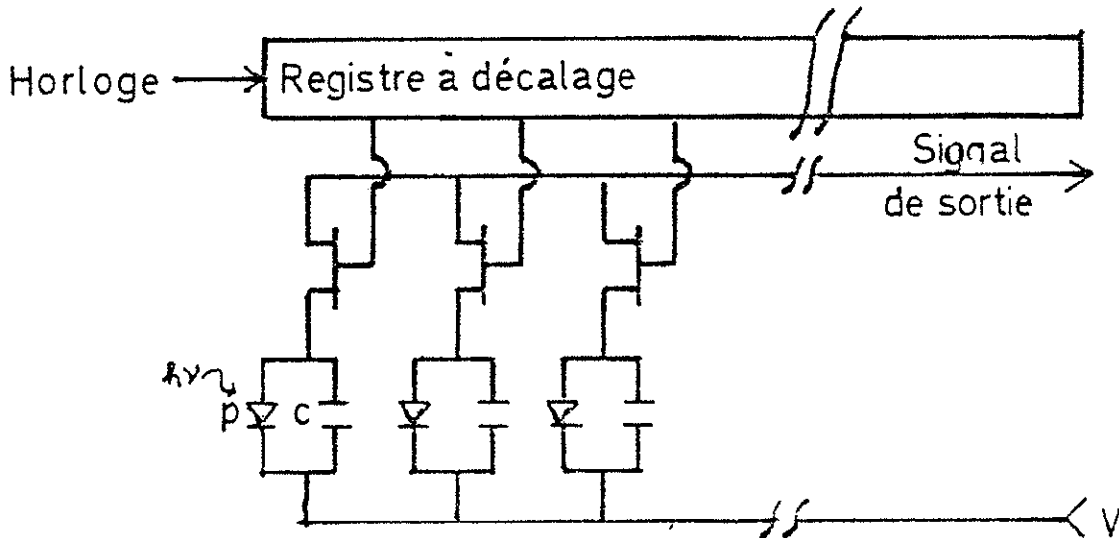


Figure 5

Schéma électrique du principe de la barrette de photodiodes.

Un registre à décalage permet de recharger successivement et périodiquement chaque capacité (donc de lire la charge perdue par chaque capacité). On obtient alors un signal de recharge proportionnel à l'énergie lumineuse reçue par le détecteur pendant l'intervalle de temps entre deux lectures. La photo 1 représente ce signal de recharge tel qu'on peut l'observer en sortie de la barrette sur l'écran de l'oscilloscope. Ce signal est ensuite échantillonné et bloqué, afin de pouvoir le traiter numériquement.

Dans ces conditions, nous pouvons considérer la barrette comme une plaque photographique dont le grain  $g$  est égal à  $15\mu$  ( $g$  étant par

définition la limite de résolution de l'émulsion de la plaque).

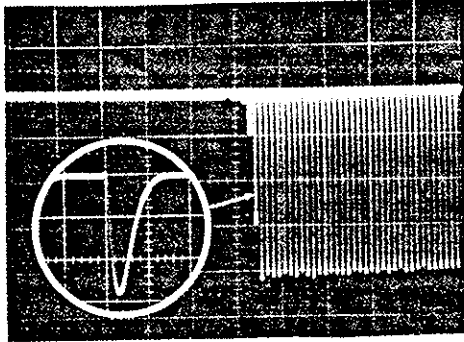


Photo 1

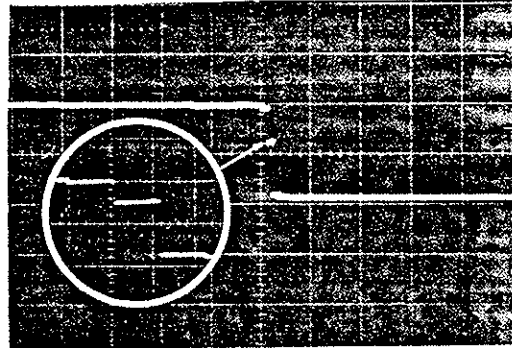


Photo 2

### B) Caractéristiques opto-électroniques de la barrette

La figure 6 montre la réponse spectrale relative des photodiodes en fonction de la longueur d'onde. Par rapport à d'autres photodiodes de même type (Jonction P-N de Silicium), celles-ci maintiennent une bonne réponse jusqu'à la fin de la région bleue du spectre visible. La figure 7 représente la sensibilité de ces photodiodes présentée ici par la charge électrique que l'on a en sortie pour chaque élément en fonction de l'éclairement. Notons enfin que l'amplitude du signal de chaque élément présente une fluctuation dont la racine carrée de l'écart quadratique moyen est égale à 1/1000 de la valeur maximum de cette amplitude.

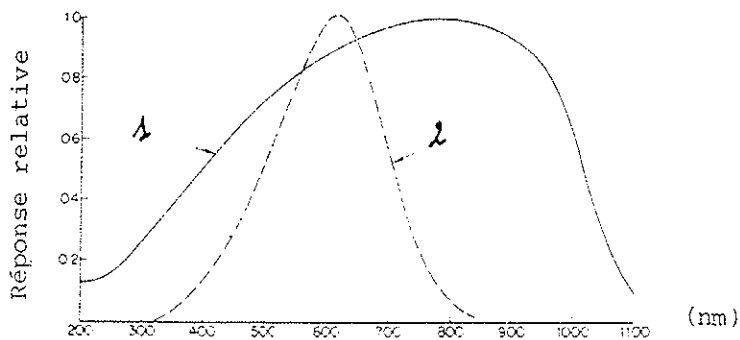


Figure 6

- 1) La réponse spectrale relative des éléments de la barrette en fonction de la longueur d'onde
- 2) Répartition spectrale relative d'une source lumineuse de test.

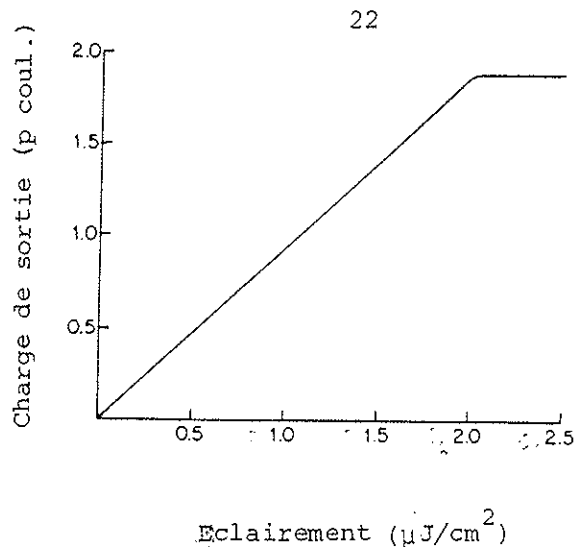


Figure 7

Le signal de charges par cellule en fonction de l'éclairement produit par la source de lumière dont la répartition spectrale est représentée sur la figure 6.

## 2. Les caractéristiques du disperseur

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la largeur du domaine spectral que l'appareil peut analyser par le spectrographe est égale à  $\sim 150$  nm.

Ce domaine spectral est divisé par les photodiodes de la barrette en petits éléments spectraux ; chacun d'eux est égal à  $0,78 \text{ \AA}$ . Cette valeur  $0,78 \text{ \AA}$  représente l'élément spectral minimum résolu du spectrographe.

Compte tenu de ces données et des possibilités de réalisation des réseaux holographiques concaves à champ plan, nous avons monté sur notre appareil un réseau étudié et réalisé par INSTRUMENTS S.A. (J. Yvon) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- . Diamètre du réseau : 50 mm
- . Nombre de traits/mm : 400
- . Distance fente d'entrée - réseau : 308 mm
- . Hauteur de fente : 0.3 mm
- . Distance réseau - spectre : 460 mm

- . Domaine spectral : 540-700 nm
- . Longueur du spectre : 30.72 mm (fixée par la largeur de la barrette)
- . Flux diffracté (ordre 1) : 30 à 50 % pour  $\lambda = 5400 - 7000 \text{ \AA}$

Monté dans les conditions représentées par la figure 8, ce réseau donne une résolution de  $0.9 \text{ \AA}$  dans la région spectrale choisie 540-700 nm en utilisant une fente d'entrée de largeur  $9 \text{ \mu m}$ .

### 3. Détermination des meilleures conditions d'utilisation du spectrographe

Comme nous l'avons vu dans le principe de l'appareil, ce spectrographe est destiné à analyser d'une part des spectres de raies provenant soit d'une lampe spectrale, soit de laser, d'autre part un spectre cannelé provenant d'une source de lumière blanche dont le faisceau traverse préalablement l'interféromètre. En fait, ce sera ce dernier cas qui déterminera les meilleures conditions d'utilisation du spectrographe. Ainsi allons-nous l'analyser en premier, puis nous donnerons des exemples des signaux obtenus à l'aide des sources des raies.

#### a) L'analyse du spectre cannelé.

La photo 3 représente un oscillogramme typique de spectre cannelé vu par la barrette de photodiodes. L'écart entre les cannelures est ici de l'ordre de  $10 \text{ cm}^{-1}$ . Notre problème est de déterminer les positions du maximum de chaque cannelure par rapport à l'ensemble des éléments de la barrette. Il est évident que cette détermination est meilleure quand l'amplitude de la modulation du spectre cannelé est maximum. Cette amplitude de modulation est fonction de la largeur de la fente d'entrée, c'est-à-dire de la résolution  $\Delta\sigma_R$  du spectrographe ; il faudra alors, comme dans tout spectrographe, chercher le meilleur compromis entre luminosité et résolution.

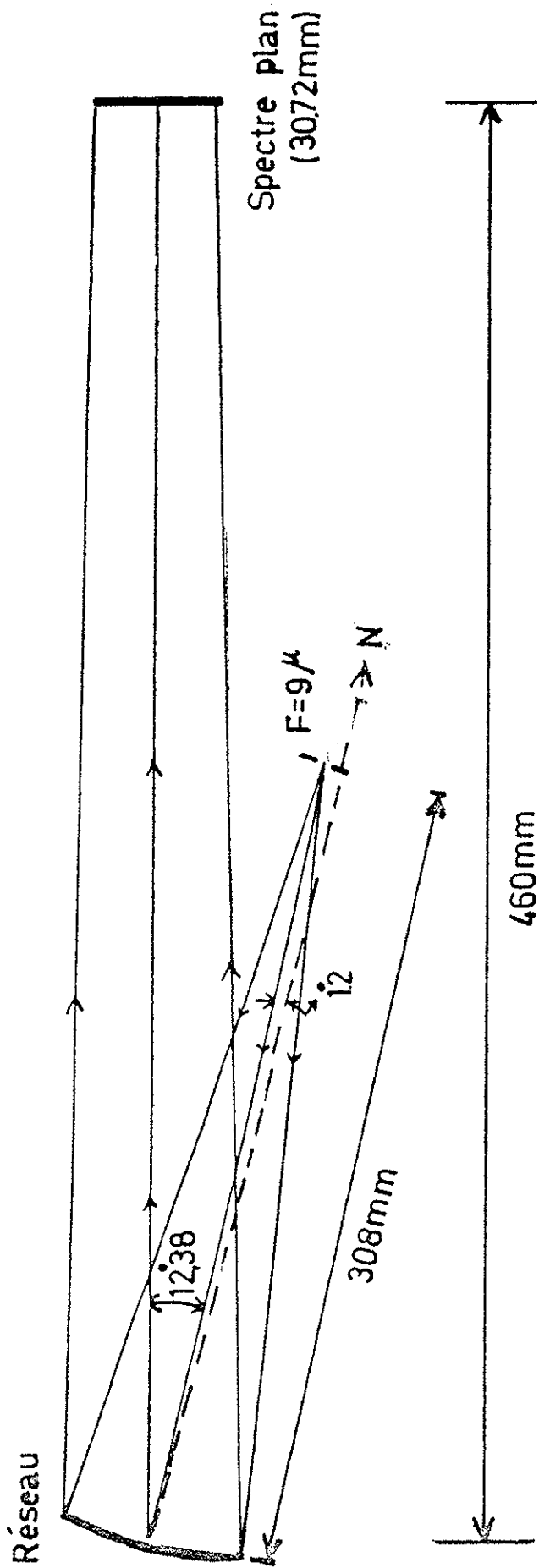


FIGURE (8)

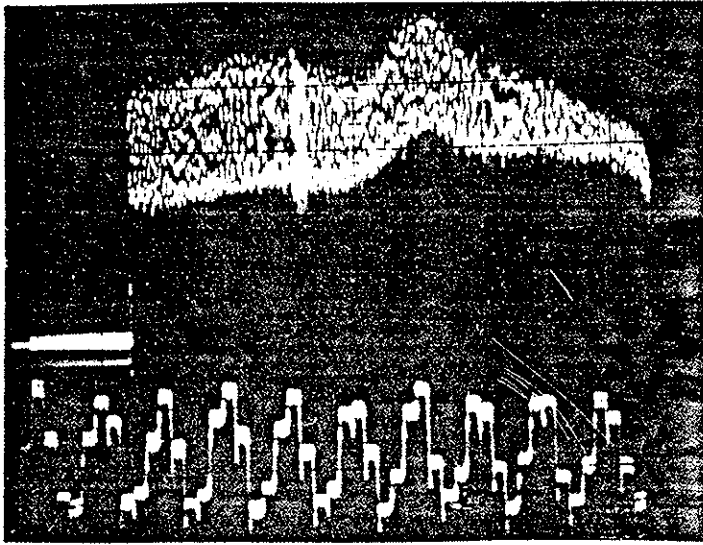


PHOTO 3

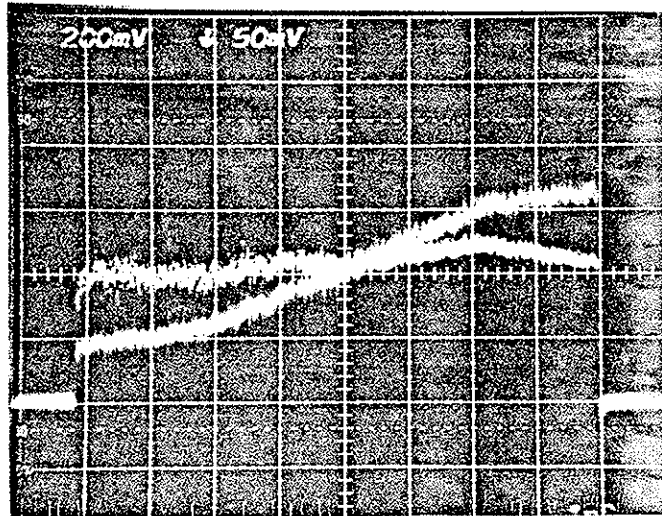


PHOTO 4

Afin de simplifier le calcul de cette amplitude (mais bien sûr sans une perte importante de précision), nous pouvons négliger l'effet de la diffraction due au réseau par rapport à l'effet de la largeur de la fente d'entrée sur la valeur de  $\Delta\sigma_R$ .

Dans ces conditions, il suffit pour effectuer ce calcul de considérer le produit de convolution entre la fonction  $(1 + \cos 2\Delta\delta\sigma)$  représentant la variation de la brillance spectrale du spectre cannelé et la fonction  $\text{Rect}\left[\frac{\sigma}{\Delta\sigma_R}\right]$  représentant la brillance au niveau de la barrette quand le spectrographe est éclairé par un rayonnement monochromatique.

Nous trouvons :

$$\begin{aligned}
 F(\sigma) &= (1 + \cos 2\pi\delta\sigma) * \text{Rect}\left(\frac{\sigma}{\Delta\sigma_R}\right) \\
 &= \int_{\sigma - \frac{\Delta\sigma_R}{2}}^{\sigma + \frac{\Delta\sigma_R}{2}} (1 + \cos 2\pi\delta\sigma) d\sigma' \\
 F(\sigma) &= \Delta\sigma_R \left[ 1 + \frac{\sin(\pi\delta \Delta\sigma_R)}{\pi\delta \Delta\sigma_R} \cos 2\pi\delta\sigma \right]
 \end{aligned}$$

D'où nous calculons l'amplitude modulation  $\Delta F = F(\sigma)_{\max} - F(\sigma)_{\min}$ .

Nous trouvons :

$$\Delta F = \frac{2}{\pi\delta} \sin(\pi\delta\Delta\sigma_R)$$

qui est maximum pour  $\pi\delta(\Delta\sigma_R) = \frac{\pi}{2}$ , c'est-à-dire pour

$$\Delta\sigma_R = \frac{1}{2\delta}$$

Pour cette valeur, le contraste  $c$  défini par  $\frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}}$  est égal à 66 %.

Le signal mesuré à la sortie de la barrette sera en fait la convolution de  $F(\sigma)$  par une fonction rectangle  $\text{Rect}\left(\frac{\sigma}{\Delta\sigma_d}\right)$  représentant la dimension transversale de chaque détecteur, échantillonné ensuite avec un pas variable en nombre d'ondes (la dispersion du réseau étant approximativement linéaire en longueur d'onde) de l'ordre de  $(2,6 \text{ cm}^{-1})$  dans le pire des cas, c'est-à-dire du côté bleu du spectre. L'opération de convolution par un créneau dont la largeur est de, au maximum,  $1,3 \text{ cm}^{-1}$  c'est-à-dire  $\approx \frac{1}{8}$  de la période, n'apporte pas de diminution sensible du contraste des franges ; par contre, l'échantillonnage a pour effet de moduler légèrement l'amplitude du signal obtenu sur l'oscilloscope.

La source de lumière blanche que nous avons choisie pour former ce spectre possède une brillance spectrale  $B(\lambda)$  variable approximativement linéairement dans le domaine spectral 540-700 nm (voir figure 9). Cette variation est amplifiée par la réponse spectrale des photodiodes de la barrette dont la courbe est montrée sur la figure 6.

Afin de compenser cette variation, nous avons réalisé un amplificateur pour le signal de la barrette, à gain variable. Le résultat de cette compensation est montré sur la photo 4. Cet amplificateur sera décrit ultérieurement.

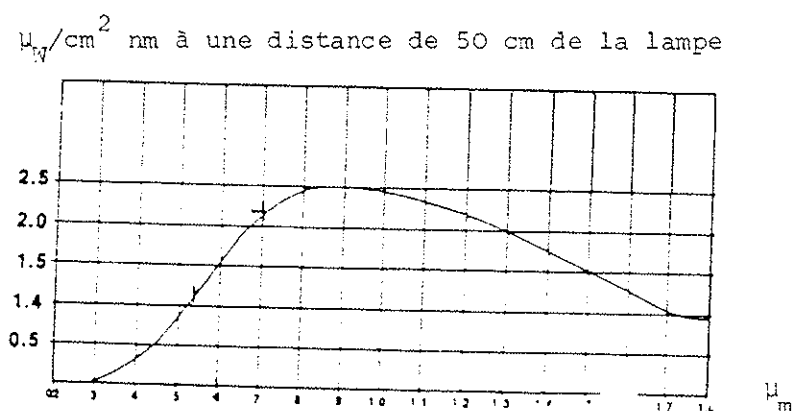


Figure 9

Le flux total pour une lampe (100 W, 3200° K)



### B) L'analyse des raies spectrales

La photo 5 représente le signal de la barrette de photodiodes pour la raie  $\lambda = 6099,14$  du Cd. Compte tenu de la finesse de cette raie, ce signal permet de déterminer la largeur à mi-hauteur de la fonction d'appareil du spectrographe. La photo montre que cette largeur est  $< 2.5$  éléments, c'est-à-dire  $< 2 \text{ \AA}$ .

Pour déterminer la position du maximum d'une telle raie ou d'une cannelure, nous avons considéré que celle-ci peut être approximée au voisinage du sommet par un polynôme de deuxième degré :

$$y - y_0 = A + B (x - x_0)^2$$

telle que l'abscisse du maximum représente la position de la raie par rapport à l'origine  $x_0$ .

Si nous déterminons les trois ordonnées  $y_{-1}$ ,  $y_0$  et  $y_1$  telle que l'abscisse  $x$  du maximum soit entre  $x_{-1}$  et  $x_1$  (figure 10), il est facile alors de montrer que l'abscisse  $x$  est donnée par la relation :

$$x - x_0 = \frac{y_{+1} - y_{-1}}{2(y_{+1} - 2y_0 + y_{-1})}$$

en supposant que le pas entre les échantillons  $y_i$  est égal à l'unité.

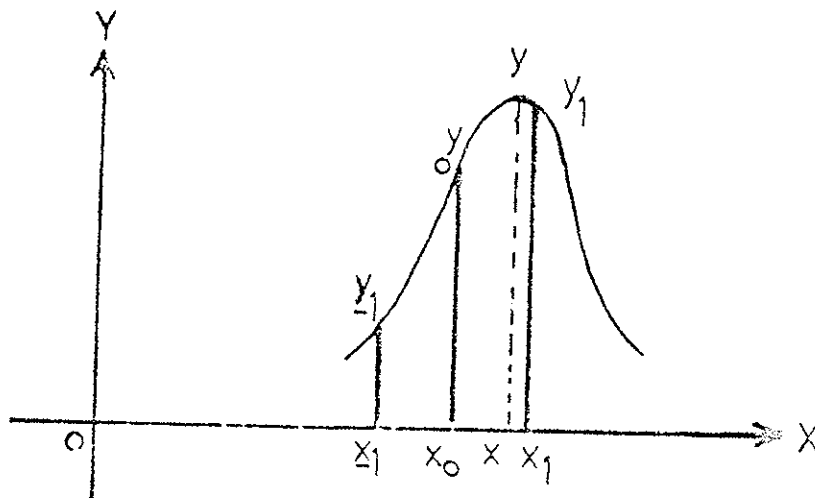


Figure 10

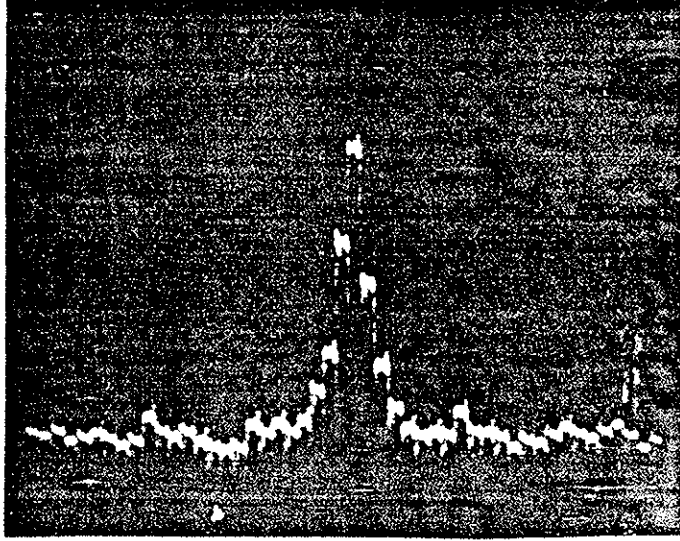


PHOTO 5

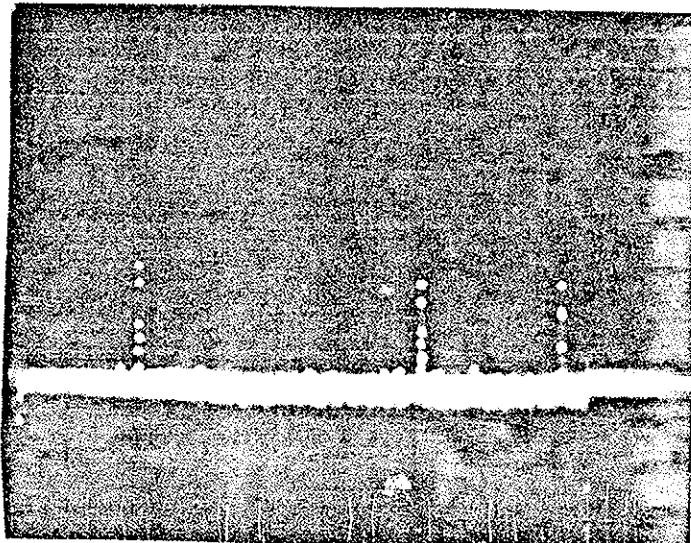


PHOTO 6

La dérivation de cette relation par rapport aux variables  $y_i$  nous permet d'évaluer l'erreur  $\Delta x$  commise sur l'abscisse  $x$  ; nous obtenons :

$$\Delta x \sim \frac{3}{2} \frac{\Delta y}{y_{\max}}$$

où  $\Delta y$  est l'erreur commise sur l'amplitude du signal donné par chaque élément ; l'expérience montre que  $\frac{\Delta y}{y_{\max}}$  est toujours au moins égale à 10 %, ce qui conduit à une erreur sur la position des raies de l'ordre de 0.15 pas.

La photo 6 représente le signal de la barrette lorsque le spectrographe est illuminé par la lampe spectrale que nous avons choisie pour étalonner l'appareil. Il s'agit d'une lampe à He, qui possède deux raies situées à l'intérieur du domaine spectral étudié (540 - 700 nm) :

$\lambda_1 = 5875,62$   $\lambda_2 = 7065,19$ . La raie jaune de cette lampe étant plus intense que la raie rouge, situation inverse de la précédente, nous avons été amenés à compliquer sensiblement l'amplificateur à gain variable, celui-ci est double afin de pouvoir être adapté à chaque situation. Signalons que nous avons essayé tout d'abord une lampe à Hg qui possède deux raies mieux situées que celles à He ( $\lambda_1 = 546$  nm,  $\lambda_2 = 691$  nm), mais malheureusement, nous avons constaté que l'intensité de la raie 691 est beaucoup trop faible et sa largeur spectrale est trop grande pour que l'on puisse déterminer sa position avec une bonne précision.

Enfin, notons que compte tenu de la fluctuation de l'amplitude  $\Delta y$  du signal mentionné ci-dessus, il suffit, pour convertir les échantillons en nombres binaires, d'utiliser un convertisseur analogique/numérique à 8 bits. En effet, un tel convertisseur ne présente qu'une erreur absolue de  $\frac{1}{255}$ , largement petite devant  $\Delta y$ .

## B - LE SIGMAMETRE

Le principe de cet élément a déjà été décrit dans l'introduction. En particulier, il est composé d'une partie optique relativement complexe (figure 2) qui nécessite un soin tout particulier dans la réalisation. Il faut signaler par exemple que chacun des prismes qui composent le bloc doit être réalisé à la cale d'angle avec une précision meilleure que  $10^{-5}$  radian.

Nous avons cherché dans ce nouvel appareil à éliminer en grande partie les difficultés de réalisation, afin de faire de l'instrument un prototype éventuellement industrialisable.

### 1. L'interféromètre ; principe du bloc séparateur de faisceau ; calcul de ses paramètres.

Celui-ci est composé, comme le montre la figure 11, d'un bloc optique compact qui comporte une face séparatrice  $L_2$  et une face A sur laquelle le faisceau vient se réfléchir totalement. C'est sur cette face que se produit le déphasage  $\Delta\psi$  entre les composantes du faisceau polarisées respectivement parallèlement et perpendiculairement au plan de la figure. Les deux miroirs  $M_1$  et  $M_2$  de l'interféromètre sont montés sur une même base en Invar ; le miroir  $M_1$  est ajustable, tandis que le miroir  $M_2$  est porté par une céramique piézo-électrique. Mis à part le bloc séparateur, le principe du système est identique à celui décrit dans le chapitre I.

Le bloc séparateur de faisceau est composé de trois lames (A, B et C) à faces parallèles identiques en dimensions. Grâce à cette juxta-

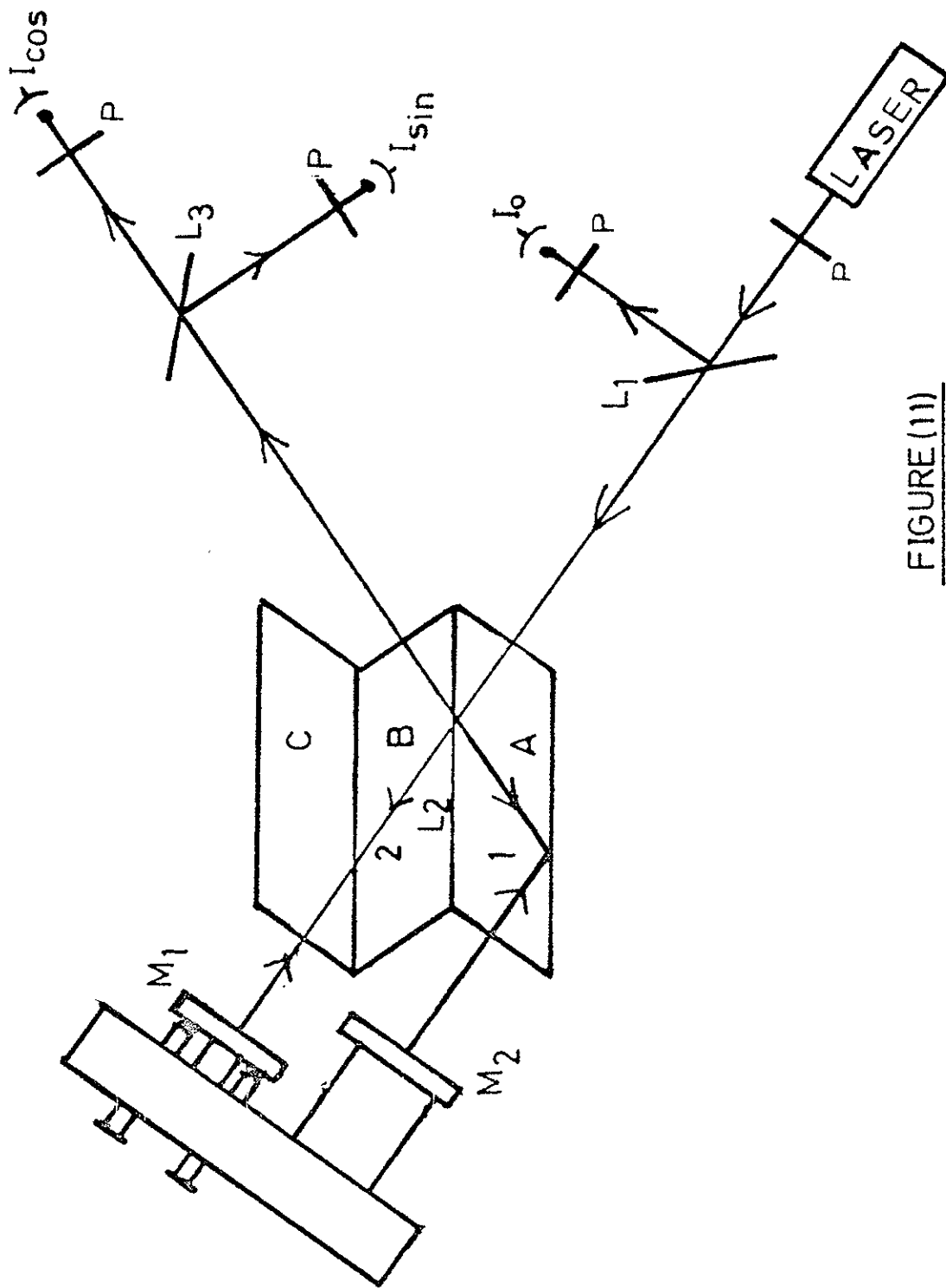


FIGURE (11)

position de ces trois lames et à leur montage sous contrôle interférométrique, dont nous verrons la réalisation par la suite, les deux faisceaux 1 et 2, séparés par la couche  $L_2$ , parcourent le même chemin optique dans le verre du bloc rendant ainsi l'appareil achromatique.

L'angle  $\theta$  des lames A, B et C est fixé par le déphasage  $\Delta\psi$  que l'on désire obtenir à la réflexion totale. Il est calculé à l'aide de la formule de Fresnel :

$$\operatorname{tg} \frac{\Delta\psi}{2} = \frac{\cos\theta \sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\sin^2\theta} \quad (1)$$

où  $n$  est l'indice de réfraction relative du verre du bloc.

Le verre que nous avons choisi est un verre SOVIREL de la famille BSC (Boro-Silicat Brown) de type B16-14, qualité Astro. Ce verre, en effet, possède des qualités optiques et physiques excellentes (par exemple, il est homogène, peu dispersif et il a une biréfringence négligeable). Son indice  $n$  pour  $\lambda = 620$  nm (le milieu du domaine spectral (540-700)) est égal à 1.51536; pour cette valeur et pour  $\Delta\psi = \frac{\pi}{4}$  la formule (1) nous donne  $\theta = 55,10^\circ$ .

Nous pouvons alors calculer les deux déphasages  $2\psi_{||}$  et  $2\psi_{\perp}$ , que les deux polarisations  $||$  et  $\perp$  subissent lors de leurs deux réflexions totales dans le bloc ; à l'aide des deux formules suivantes :

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_{||}}{2} = \frac{n^2 \sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\cos\theta} \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\psi_{\perp}}{2} = \frac{\sqrt{\sin^2\theta - \frac{1}{n^2}}}{\cos\theta} \quad (3)$$

ce qui donne pour  $\lambda = 620 \text{ nm}$

$$2\psi_{||} = 251.62^\circ = 4.39 \text{ r}$$

$$2\psi_{\perp} = 161.62^\circ = 2.83 \text{ r}$$

Ces deux valeurs nous permettent de déterminer l'origine des phases (ou des excédents fractionnaires) mesurées par le sigmamètre. En effet, les deux signaux issus de ce dernier sont proportionnels aux deux quantités :

$$S_{||} = \cos(2\pi\delta\sigma + 2\psi_{||}) \quad (4)$$

$$S_{\perp} = \cos(2\pi\delta\sigma + 2\psi_{\perp}) \quad (5)$$

en remplaçant  $\psi_{||}$  et  $\psi_{\perp}$  par leurs valeurs en radiant et  $\delta\sigma$  par l'ordre de l'interférence  $N + \varepsilon$ , les quantités (4) et (5) deviennent

$$S_{||} = -\sin 2\pi(\varepsilon + \varepsilon_0)$$

$$S_{\perp} = \cos 2\pi(\varepsilon + \varepsilon_0)$$

où l'origine  $\varepsilon_0$  des excédents fractionnaires mesurés est égale à 0.449.

Nous devons maintenant vérifier que la dispersion du verre n'entraîne que des variations négligeables, d'une part du déphasage  $\Delta\psi$  et d'autre part de l'origine  $\varepsilon_0$ .

Compte tenu des valeurs de l'indice de réfraction  $n$  du verre nous trouvons, pour  $\lambda_1 = 540 \text{ nm}$  et  $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$

$$2 \Delta\psi_1 = 90,32^\circ$$

$$2 \Delta\psi_2 = 89,96^\circ$$

c'est-à-dire une variation  $0.36^\circ$  quand  $\lambda$  varie d'une extrémité à l'autre du domaine spectral considéré, ce qui est négligeable du fait que cette variation n'entraîne qu'une erreur de  $0.28^\circ$  sur la mesure de la phase donnée par le sigmamètre {5}. Cette erreur est beaucoup plus petite que  $3.6^\circ$  l'incertitude que nous estimons avoir sur nos mesures.

L'origine  $\varepsilon_0$ , calculée elle aussi pour les mêmes valeurs de  $\lambda$ , prend les deux valeurs suivantes :

$$\varepsilon_{01} = 0.450$$

$$\varepsilon_{02} = 0.448$$

Elle ne varie donc pas plus de  $2 \text{ ‰}$ , ce qui est aussi très négligeable.

## 2. Réalisation et montage des différents éléments du bloc optique : achromatisme.

Le bloc optique de l'interféromètre a été conçu de telle façon que sa réalisation ne présente pas de difficultés particulières. La composition originale de ce bloc en trois lames à faces parallèles identiques permet d'autre part la réalisation de plusieurs ensembles simultanément facilitant ainsi l'industrialisation de l'appareil.

La réalisation des éléments du bloc comporte trois étapes représentées sur la figure 12 :



1°/ réalisation d'une lame à faces planes et parallèles, ce qui peut être aisément effectué avec une précision de  $\lambda/20$  ;

2°) polissage de deux faces opposées formant chacune avec les faces précédentes un dièdre d'angle  $\theta = 55,10^\circ$ . La précision sur le parallélisme de ces deux faces n'est pas critique ; elles peuvent donc être polies indépendamment ;

3°) découpage du bloc dans les plans perpendiculaires aux faces polies pour former trois éléments en forme de parallélépipèdes identiques.

Avant l'assemblage des divers éléments, l'un d'eux a été traité d'une couche semi-réfléchissante 47 %, 47 % de type (DIACHROVEX) conçue pour être placée entre deux lames transparentes.

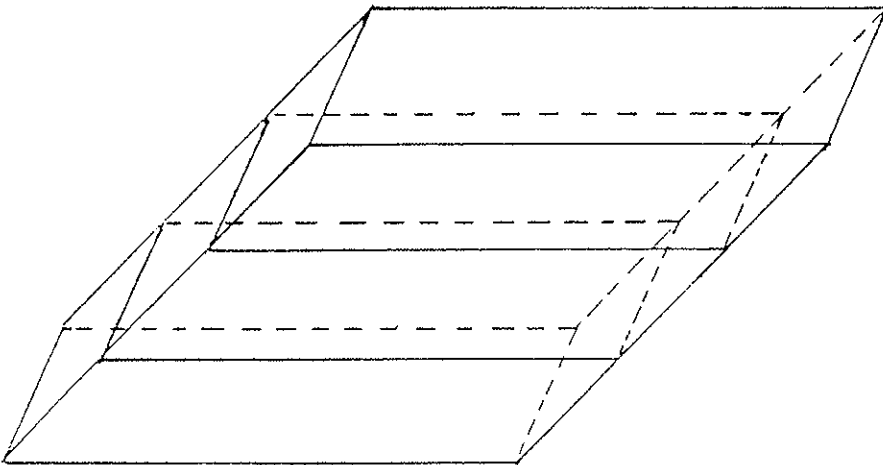


Figure 12

L'assemblage du bloc a été effectué sous contrôle interférométrique. Nous avons d'abord collé par adhérence moléculaire les deux lames entre lesquelles se trouve la couche séparatrice ; ensuite, pour coller la troisième lame, nous avons utilisé le montage présenté sur la figure 13.

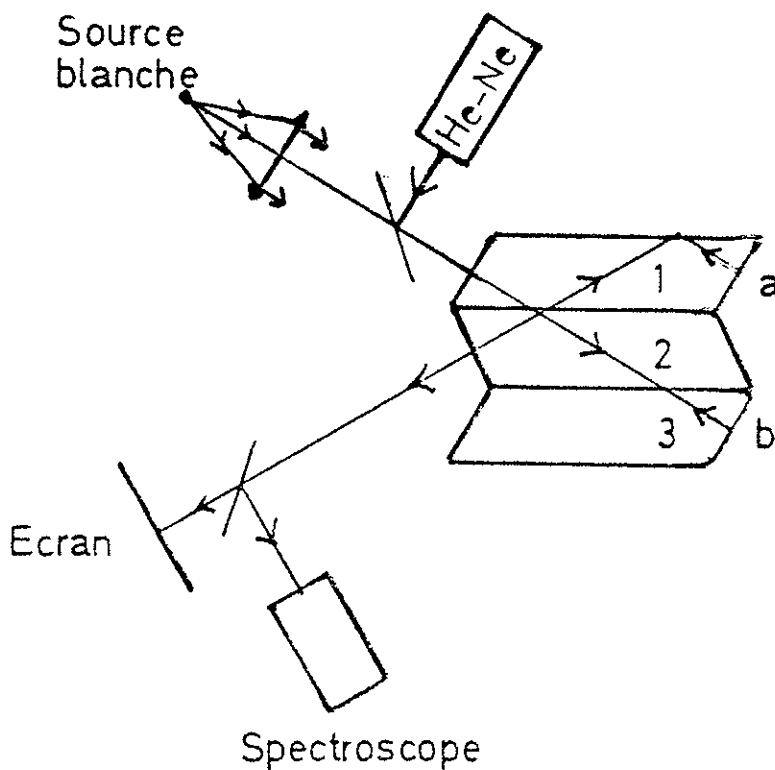


Figure 13

Le but de cette opération est de positionner la lame (3) de telle façon que les chemins optiques dans le verre du bloc pour les deux voies de l'interféromètre soient parfaitement identiques. Sinon, un défaut d'achromatisme, dû à la dispersion du verre, introduira une erreur de phase dépendant de la longueur d'onde.

Pour cela, on utilise le fait que le bloc optique doit alors, lui-même, constituer un interféromètre dont les miroirs sont les faces (a) et (b), que celui-ci doit être parfaitement réglé et de D.D.M. nulle.

La lame (3) est préalablement positionnée en l'appliquant sur la face de la lame (2) par l'intermédiaire d'une fine lame d'eau distillée. Un faisceau laser est envoyé dans l'interféromètre ainsi constitué afin d'ajuster le parallélisme des faces (a) et (b). Simultanément, un faisceau de lumière blanche traverse cet interféromètre, puis est analysé par un spectroscope. On observe alors des cannelures dans le spectre ; il suffira ensuite, tout en conservant l'alignement, de faire glisser la lame (3) par rapport à l'ensemble des deux autres, afin d'augmenter l'intervalle entre deux cannelures consécutives et, finalement, atteindre une D.D.M. voisine de 0. L'adhérence moléculaire entre les deux faces se produit alors tout naturellement par l'évaporation de l'eau.

La photo 7 représente l'interféromètre monté sur son support définitif. Nous distinguons le bloc séparateur de faisceau et les deux miroirs, l'un fixé sur une céramique et l'autre réglable.

### 3. Adaptation des différentes sources lumineuses à l'interféromètre ; alignement.

Comme nous l'avons vu précédemment, l'interféromètre est traversé par deux faisceaux de lumière de nature complètement différente : un faisceau de lumière blanche issu d'une source étendue et un faisceau de lumière issu d'une source laser. De ce fait, nous avons été amenés à étudier séparément chacun de ces deux faisceaux.



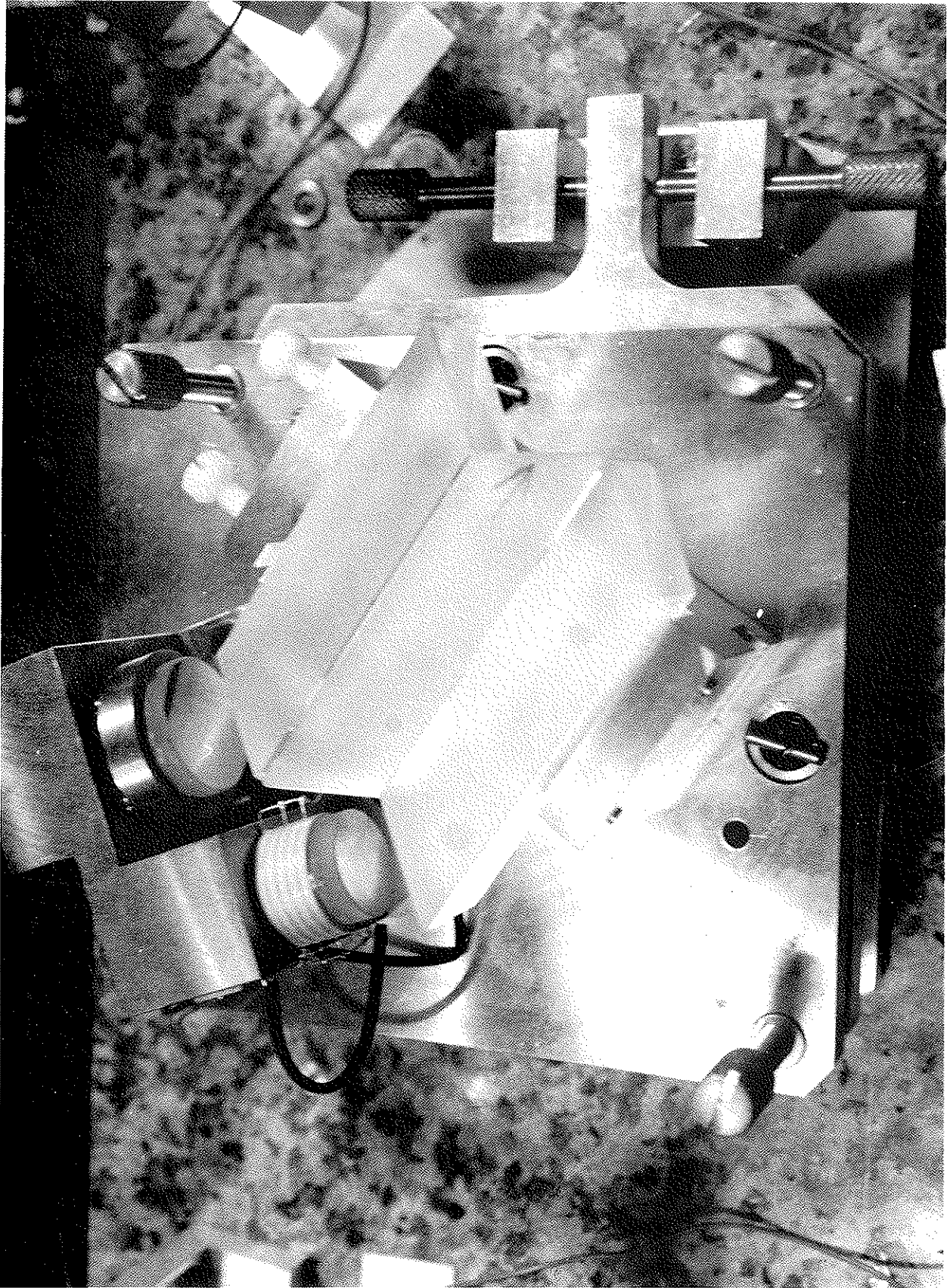


PHOTO 7



$\alpha$ ) *Le faisceau de lumière blanche*

L'adaptation de ce faisceau à l'interféromètre consiste à déterminer la valeur optimale de son ouverture, afin de réaliser le meilleur compromis entre résolution et luminosité, c'est-à-dire, dans notre cas, la plus grande amplitude du signal de franges en sortie de l'interféromètre.

Pour cela, il faut calculer le flux lumineux total transmis par un interféromètre de Michelson quand il est éclairé par une source étendue d'ouverture angulaire  $\Omega_0$ .

Ce flux est donné par {6}

$$\underline{\phi}(\sigma) = B_0 A \left[ \frac{\Omega_0}{2} + \frac{\sin \sigma \delta_0 \frac{\Omega_0}{2}}{\sigma \delta_0} \cos 2\pi\sigma\delta_0 \left(1 - \frac{\Omega_0}{4\pi}\right) \right]$$

où  $B_0$  est la brillance de la source et  $A\Omega_0$  est l'étendue du faisceau.

Pour une ouverture infiniment petite, cette relation se réduit à :

$$\frac{B_0 A \Omega_0}{2} (1 + \cos 2\pi\delta_0 \sigma)$$

On observe alors que l'utilisation d'un faisceau d'ouverture finie a deux effets :

1°/ il introduit un déphasage supplémentaire :  $\sigma\delta_0 \frac{\Omega_0}{2}$  dépendant de  $\sigma$ , qui peut être assimilé à une diminution de la D.D.M.  $\delta_0$  de la quantité

$$\frac{\delta_0 \Omega_0}{4\pi} .$$

2°/ il multiplie l'amplitude de la modulation  $\cos 2\pi\sigma\delta_0$  par un facteur  $\frac{\sin \sigma\delta_0 \frac{\Omega_0}{2}}{\sigma\delta_0}$ . Cela a pour conséquence de réduire le contraste des

franges observées. D'autre part, cette amplitude sera maximum pour  $\sigma \delta_0 \frac{\Omega_0}{2} = \frac{\pi}{2}$ . Dans cette condition, la D.D.M. mesurée à partir des signaux que donne l'interféromètre de la source de lumière blanche diffèrera de  $\delta_0$  de  $\frac{\lambda}{4}$ , ce qui est tout juste acceptable pour permettre une prédétermination assez précise de la D.D.M.  $\delta_0$ . Nous verrons par la suite que l'angle solide pratiquement utilisé est choisi beaucoup plus faible, ce qui fait que nous pourrons considérer cet effet comme négligeable.

### β) Le faisceau de lumière d'un laser

Le faisceau provenant du laser est un faisceau gaussien qui pourra être considéré comme un faisceau parallèle par l'interféromètre, pourvu que sa divergence soit suffisamment faible. On peut montrer {5} que le vecteur d'onde  $k$  de la radiation vue par l'interféromètre diffère de la vraie valeur d'au plus une quantité égale à  $\frac{1}{Z_0}$  où  $Z_0$  est le paramètre confocal du laser ( $Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$  où  $Z_0 =$  la dimension transversale minimum du faisceau). La précision de notre instrument étant de l'ordre de  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ , on devra alors avoir :

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2\pi Z_0} < \frac{1}{10} \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{d'où } Z_0 > 1,6 \text{ cm.}$$

Compte tenu de ce que les paramètres confocaux des lasers courants sont de l'ordre du mètre, ce type d'effet est donc négligeable. D'autre part, l'interféromètre sera éclairé par deux faisceaux laser différents : le faisceau du laser He-Ne de l'étalonnage et le faisceau du laser de mesure. Ceci posera le problème de l'alignement de ces deux faisceaux. En effet, un mauvais alignement fait que ces deux faisceaux



parcourront deux chemins optiques différents dans l'interféromètre ; ce qui fait changer la différence de marche de l'interféromètre. Ce changement se traduira par une erreur sur la mesure de l'excédent fractionnaire.

Afin d'évaluer ce type d'erreur, nous considérons deux lasers dont les faisceaux font un petit angle  $\theta_1$  et  $\theta_2$  avec l'axe de l'interféromètre. Si  $\delta_0$  est la D.D.M. sur l'axe, chacun des deux faisceaux verra une D.D.M. respectivement égale à  $\delta_0 \cos\theta_1$  et  $\delta_0 \cos\theta_2$  ; il s'en suivra une erreur associée à la différence des D.D.M. :  $\delta_0 \left( \frac{\theta_1^2}{2} - \frac{\theta_2^2}{2} \right)$ . Si chacun des faisceaux est défini à  $\theta$  près, cette erreur sera au maximum égale à  $\delta_0 \frac{\theta^2}{2}$ . Afin de conserver la précision de mesure à  $\frac{0.01}{\delta}$  nous devons avoir :

$$\delta_0 \frac{\theta^2}{2} < \frac{\lambda}{100}$$

soit pour  $\delta_0 = 1 \text{ mm}$        $\lambda = 0.54 \mu$

$$\theta < 3 \cdot 10^{-3}$$

Il suffit, pour réaliser cette condition, de faire passer les différents faisceaux lasers par deux trous de diamètre 1,5 mm et séparés d'une distance de 60 cm. En effet, dans ces conditions, l'angle entre les faisceaux qui passent par ces deux trous est inférieur à  $\frac{1.5}{600}$  soit  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ r.}$

#### 4. Système électronique de détection des signaux optiques donnés par l'interféromètre

Ce système est constitué de trois photodiodes (type UDT 450) qui convertissent les signaux optiques donnés par l'interféromètre en signaux électriques (voir figure 14) ; ces trois détecteurs sont suivis de trois échantillonneurs bloqueurs qui permettent de traiter les signaux obtenus

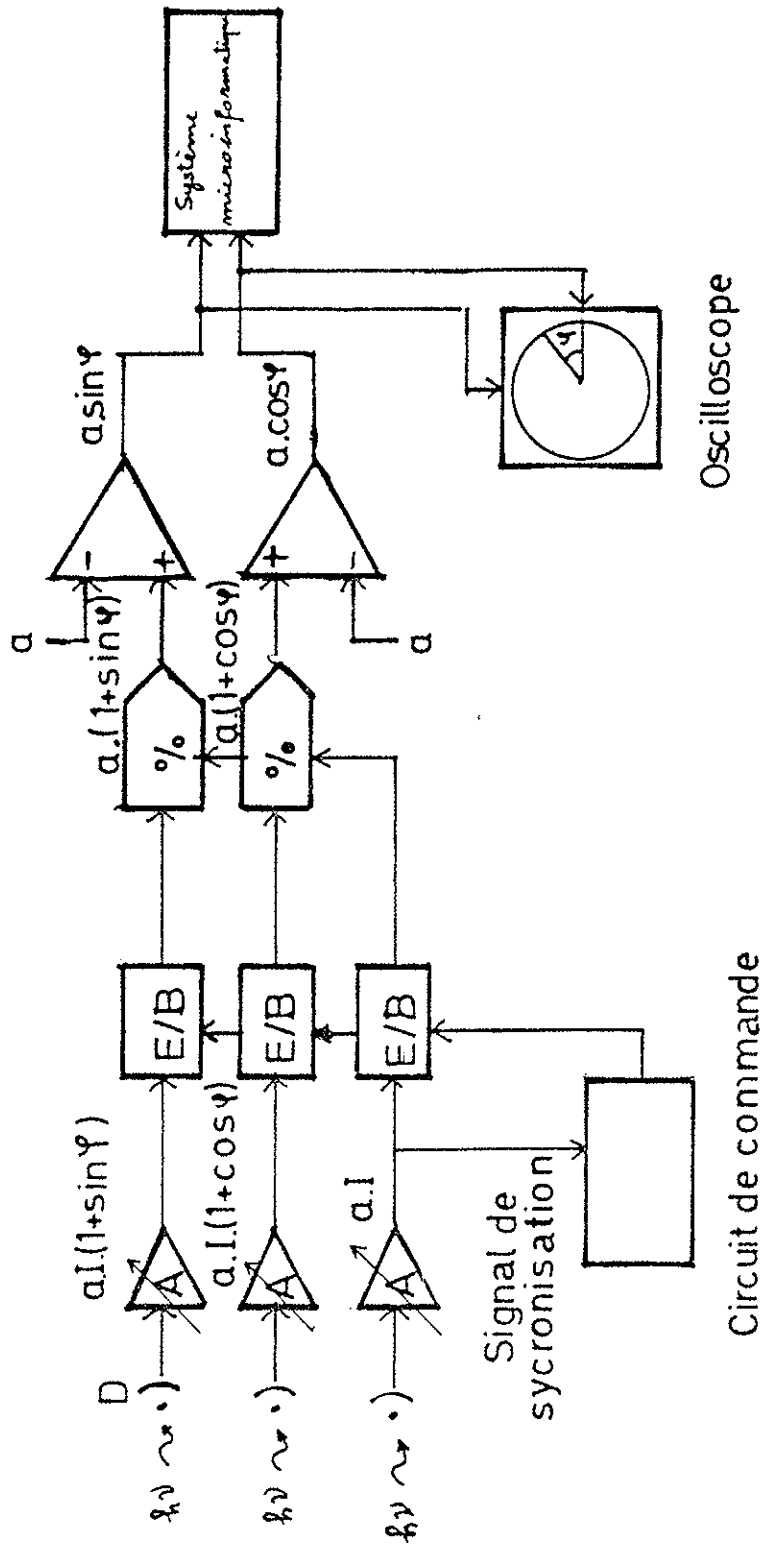


FIGURE (14)

lorsque la source laser, dont on désire mesurer la fréquence, fonctionne en impulsion. Ces trois composants sont commandés par un ensemble électronique qui permet, suivant le type du laser considéré, soit d'échantillonner et bloquer les impulsions, soit laisser passer les signaux continus.

Les signaux sont ensuite traités analogiquement : 1°/ par deux diviseurs pour éliminer les fluctuations de l'intensité du laser, 2°/ par deux amplificateurs différentiels qui permettent d'éliminer la composante constante moyenne des deux signaux.

Nous obtenons alors en sortie de ce système deux signaux proportionnels aux deux quantités  $\sin\phi$  et  $\cos\phi$ . Le réglage de ce système s'effectue à l'aide d'un oscilloscope ; sur son écran, nous pouvons visualiser un cercle en appliquant un signal de dents de scie sur la céramique portant un des miroirs de l'interféromètre. La photo 8 montre ce cercle, obtenu à l'aide d'une source laser continue. La photo 9 montre simultanément le signal d'impulsion obtenu en sortie d'un détecteur ainsi que le résultat de son traitement par les échantillonneurs/bloqueurs, cela lorsque le laser fonctionne en impulsion. La photo 10 représente le cercle obtenu avec un tel laser ; les fluctuations de puissance du laser d'une impulsion à l'autre étant de l'ordre de 10 à 20 %, on peut remarquer que notre système de compensation fonctionne relativement bien.

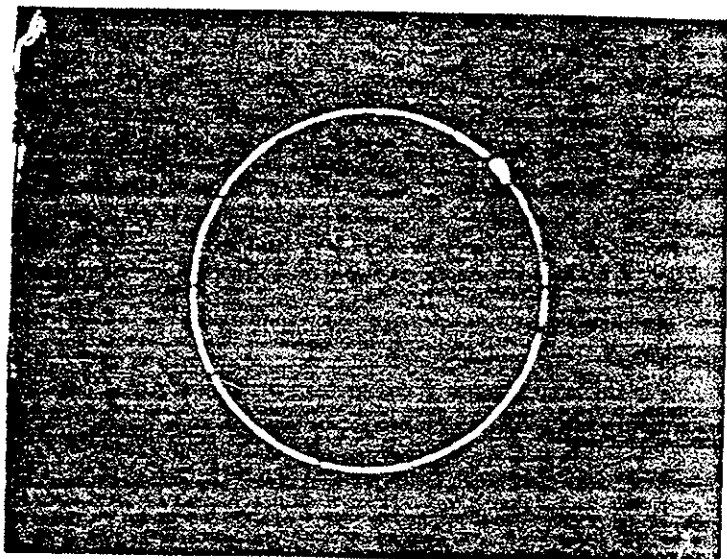


PHOTO 8

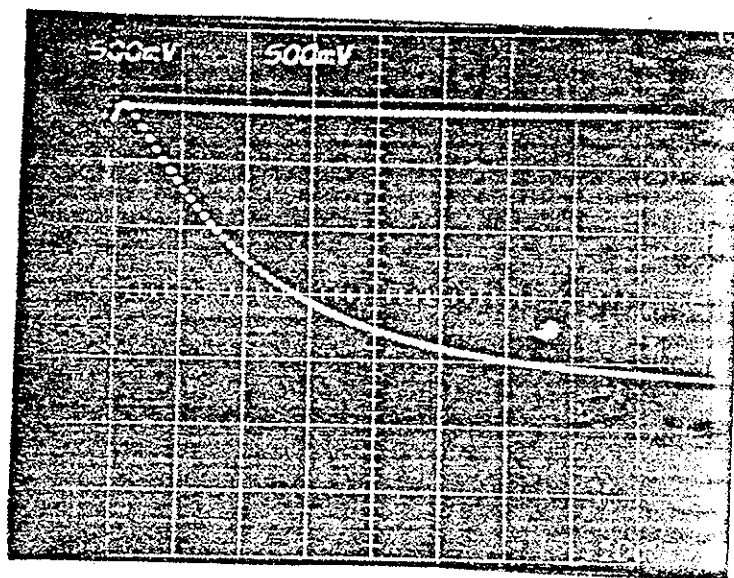


PHOTO 9

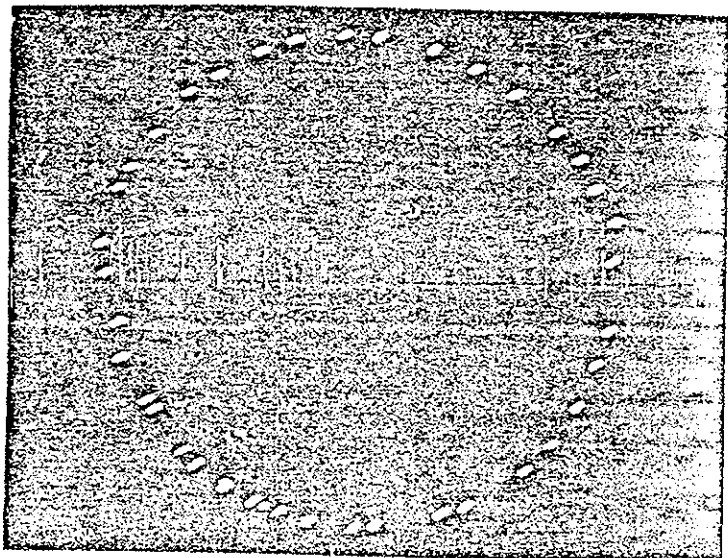


PHOTO 10

C - PRESENTATION DE L'ENSEMBLE OPTIQUE DE L'APPAREIL : COUPLAGE ENTRE  
LES DIFFERENTS ELEMENTS

Le schéma de la figure 15 représente l'organisation des différents éléments constituant la partie optique de l'appareil. Ces éléments sont fixés sur un marbre de dimension 70 x 40 x 4 cm. La hauteur de cet ensemble est de 13 cm.

La lame séparatrice  $S_1$  (transmission ou  $T = 50\%$ ) permet d'envoyer dans le système les deux faisceaux lumineux provenant d'une part du laser He-NE, fixé sur le marbre et, d'autre part d'un laser extérieur dont on veut mesurer le nombre d'ondes. A partir de  $S_1$  chacun de ces deux faisceaux suit le même trajet optique, fixé par deux trous identiques  $T_1$  et  $T_2$  de diamètre égal à 1,5 mm placés à une distance de 60 cm, grandissant ainsi leur alignement à mieux que  $2.5 \cdot 10^{-3}$ ; la polarisation de ces faisceaux est définie par un polariseur  $P_4$ , et une fraction de leur intensité est envoyée sur le détecteur  $D_1$ , de référence, par l'intermédiaire d'une lame non traitée  $S_2$ .

La lame séparatrice  $S_3$  ( $T = 80\%$ ) envoie les faisceaux des lasers dans l'interféromètre; en sortie, le faisceau transmis est envoyé sur deux détecteurs  $D_2$  et  $D_3$  à l'aide des lames  $S_5$  ( $T = 80\%$ ) et  $S_6$  ( $T = 50\%$ ); chacun de ces détecteurs analyse une polarisation bien définie du faisceau à l'aide des polariseurs  $P_2$  et  $P_3$ . La partie réfléchie de l'interféromètre est focalisée sur la fente  $F$  du spectrographe à l'aide de la lame  $S_3$  et la lentille  $L_2$ .

L'adaptation du faisceau lumineux provenant de la source blanche est réalisée par l'intermédiaire de la lentille  $L_1$ . Ce faisceau

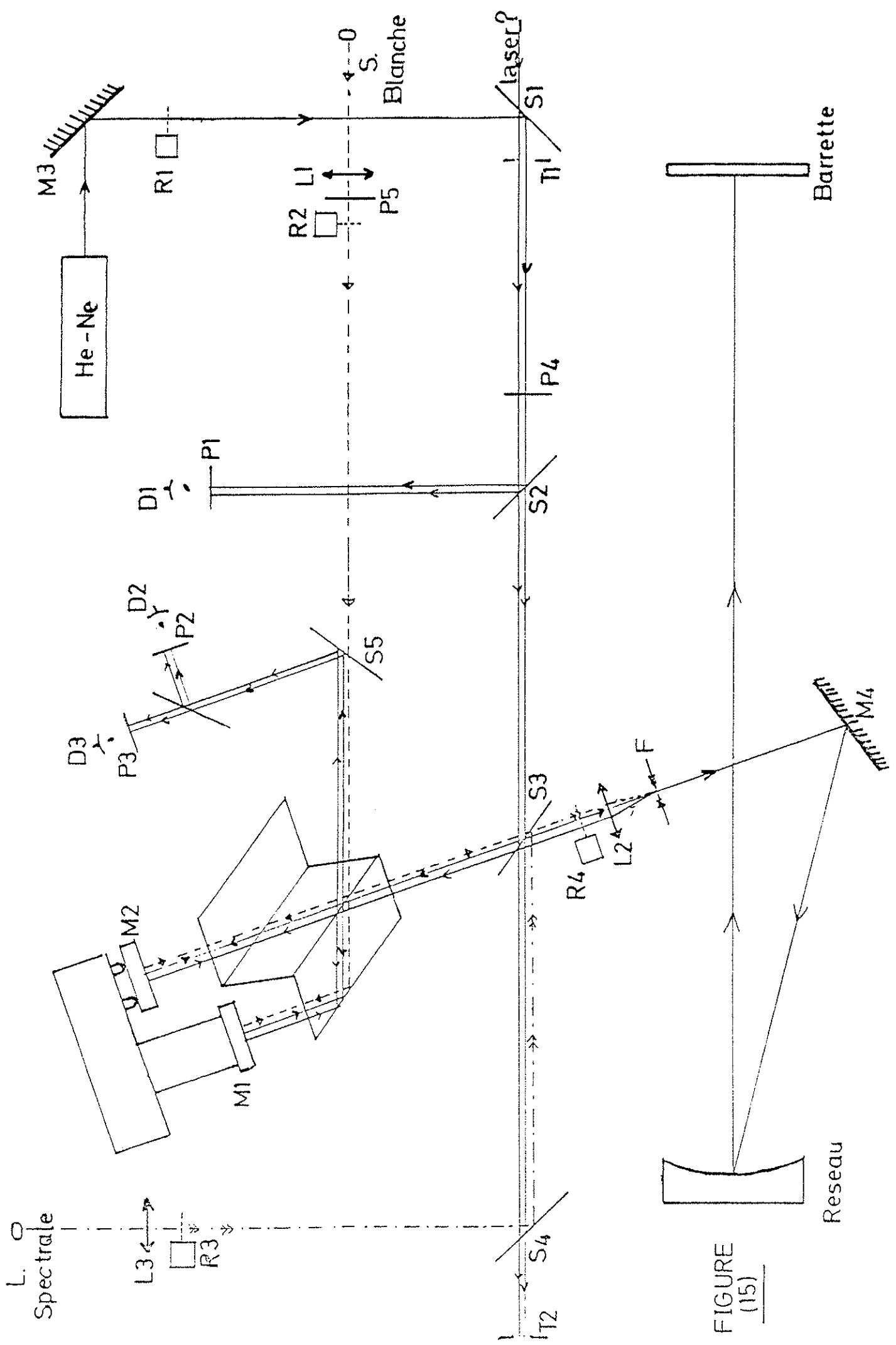


FIGURE (15)

suit l'inverse du trajet optique suivi par les faisceaux des lasers ; il traverse l'interféromètre pour être ensuite focalisé, comme les faisceaux des lasers, par la lentille  $L_2$  sur la fente  $F$  du spectrographe.

Enfin, le faisceau lumineux de la lampe spectrale est collimaté par la lentille  $L_3$  ; il se réfléchit successivement sur les deux lames  $S_4$  ( $T = 20\%$ ) et  $S_3$ , et il est focalisé ensuite sur la fente  $F$  comme tous les autres faisceaux.

Les valeurs des distances focales des lentilles  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  ( $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$ ), ainsi que la surface de la section du faisceau de lumière blanche, sont déterminées en tenant compte des paramètres du système déjà fixés : il s'agit de l'étendue géométrique de l'optique du spectrographe et de l'angle solide  $\Omega$  du faisceau admissible par l'interféromètre. Nous savons que, d'une part, l'étendue linéaire du spectrographe est, dans sa plus grande dimension, de l'ordre de

$$\frac{0.3 \times 50}{308} = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$$

et que, d'autre part, l'angle solide  $\Omega$  de la source vue par l'interféromètre doit être inférieure à  $\pi \frac{\lambda}{\delta_0}$  (paragraphe B.3)  $= 1,7 \cdot 10^{-3}$  ( $\lambda = 0.54 \mu$ ,  $\delta_0 = 1 \text{ mm}$ ). On en conclut que le diamètre  $D$  du faisceau de lumière blanche au niveau de la lentille  $L_1$  doit être tel que

$$D \times \sqrt{1.7 \cdot 10^{-3}} > 4.8 \cdot 10^{-2}$$

c'est-à-dire

$$D > 1.16 \text{ mm}$$

Pour des raisons de commodité, nous avons fixé la distance focale de  $L_2$  à 2 cm. Nous pouvons alors montrer que pour couvrir tout le

réseau du spectrographe, le diaphragme placé sur  $L_2$  doit être  $\geq 3.25$  mm. Finalement, le rapport  $\frac{d}{f_1}$  entre la plus grande dimension de la source de lumière blanche et la focale de la lentille  $L_1$  doit être tel que l'image de la source couvre la hauteur utile de la fente d'entrée du spectrographe, c'est-à-dire 0.3 mm

$$\frac{d}{f_1} = \frac{0.3}{f_2}$$

En choisissant une source (halogène) de dimension 1.7 x 1.3 mm, nous obtenons :

$$f_1 = 11 \text{ cm.}$$

La valeur de la distance focale de la lentille  $L_3$  n'est pas critique, compte tenu de l'étendue que présente la lampe spectrale (nous avons utilisé une lentille de distance focale à 10 cm).

L'ensemble comporte également quatre relais, commandés par le système micro-informatique de l'appareil ; trois d'entre eux ( $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ ) permettent d'introduire dans l'appareil respectivement soit le faisceau du laser He-Ne, soit celui de la lampe de lumière blanche, soit celui de la lampe spectrale. Le relais  $R_4$ , placé à l'entrée du spectrographe, porte un atténuateur qui n'entre en action que pour les faisceaux lasers, afin de ne pas saturer les photodiodes de la barrette.

La photo 11 représente tout l'ensemble optique de l'appareil. Les éléments principaux de cet ensemble sont numérotés. Nous trouvons successivement :



1. la barrette de photodiodes,
2. le réseau holographique concave à champ plan,
3. la fente d'entrée du spectrographe,
4. l'interféromètre,
5. les trois détecteurs des faisceaux du sigmamètre,
6. la lampe spectrale à He,
7. le tube du laser He-Ne,
8. la position de la source de la lumière blanche.



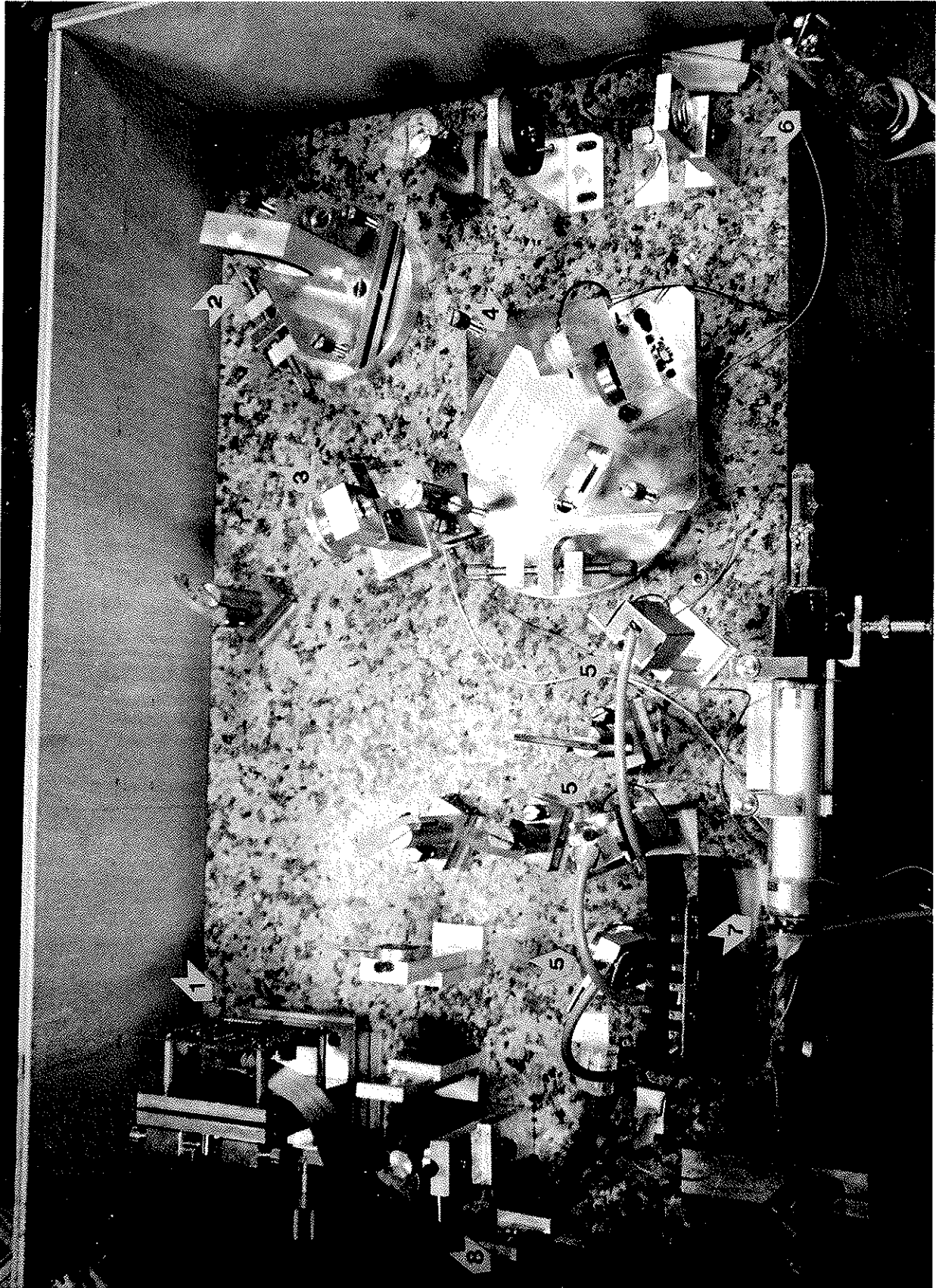


PHOTO 11



CHAPITRE V

DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE DE L'APPAREIL



## V - DESCRIPTION DU SYSTEME MICRO-INFORMATIQUE

### DE L'APPAREIL

On appelle système micro-informatique tout système informatique construit autour d'un microprocesseur.

Ce type de système, d'encombrement réduit, peut effectuer des tâches très variées comme, par exemple : l'acquisition et le traitement numérique de données, la régulation de grandeurs physiques et le contrôle de processus. Cette diversité est utilisée dans un large champ d'applications (par exemple : instrumentation, télécommunications et automobiles).

Dans ce chapitre, nous allons décrire notre système qui, comme tout système informatique, se compose de deux parties distinctes appelées conventionnellement le matériel et le logiciel. Le matériel est constitué de tout ce qui est solide dans le système (circuits intégrés et unités périphériques) ; tandis que le logiciel est constitué de deux sortes de programmes :

Premièrement, les programmes d'utilisation qui sont, soit des programmes de commande et de contrôle des tâches à exécuter, soit des programmes de traitement numérique. Un programme principal commande le

déroulement des mesures et des calculs et fait appel à des sous-programmes qui exécutent des tâches répétitives.

Deuxièmement, un programme de test, dit moniteur, qui sert à vérifier le bon fonctionnement des autres programmes et leur exécution.

Nous commencerons par la présentation des différentes tâches que le microprocesseur aura à effectuer pour notre application particulière. Ensuite, dans un deuxième paragraphe, nous décrirons le matériel du système ainsi que les sous-programmes qui commandent le fonctionnement de certains composants. Enfin, nous présenterons le programme principal et les sous-programmes du traitement numérique.

#### A - LES FONCTIONS DU MICROPROCESSEUR DANS L'APPAREIL

Ces fonctions sont de trois types :

1. le pilotage du fonctionnement de l'appareil,
2. la commande d'un système d'acquisition de données,
3. le traitement numérique de ces données.

##### 1. Le pilotage du fonctionnement de l'appareil

Le fonctionnement de l'appareil doit se faire, comme nous l'avons vu au chapitre II, en deux étapes : on effectue d'abord l'étalonnage pour, ensuite, mesurer le nombre d'ondes du laser inconnu.

Pendant la première étape, le microprocesseur met en mémoire successivement le spectre de la lampe spectrale, le spectre cannelé et les valeurs de deux signaux  $\sin(2\pi\epsilon)$  et  $\cos(2\pi\epsilon)$ . Afin de permettre à l'utilisateur d'effectuer des réglages éventuels, entre chaque acquisition, le microprocesseur doit interrompre le programme, fournir un



message à l'utilisateur et attendre un ordre de celui-ci pour poursuivre ensuite le programme.

Pendant la deuxième étape, le microprocesseur doit d'une part afficher en permanence la valeur du nombre d'ondes qu'il a calculé, et d'autre part il doit permettre à l'utilisateur d'arrêter l'exécution du programme et de le reprendre ensuite sur son ordre. Ceci, chaque fois que l'utilisateur veut intervenir pour une raison quelconque, par exemple quand il veut changer le laser.

Le microprocesseur doit commander, de plus, quatre relais, dont trois permettent de couper ou faire passer les différents faisceaux introduits dans l'appareil et, le quatrième, d'atténuer l'intensité du faisceau laser qui entre dans le spectrographe.

## 2. La commande du système d'acquisition de données

Le système d'acquisition de données de l'appareil est constitué par trois chaînes de composants dont chacune permet la détection et la mise en mémoire d'un signal bien déterminé : les deux signaux  $\sin(2\pi t)$  et  $\cos(2\pi t)$  du sigmamètre et le signal de la barrette du spectrographe.

Sur la figure 16, nous avons présenté un schéma de principe d'une telle chaîne d'acquisition.

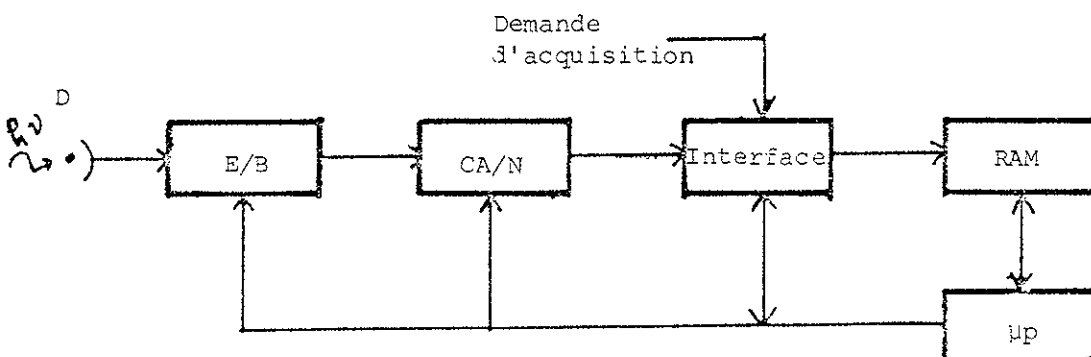


Figure 16

Schéma de principe d'une chaîne d'acquisition de données.

D = Détecteur  
 E/B = Echantillonneur/Bloqueur  
 CA/N = Convertisseur Analogique/Numérique  
 RAM = Mémoire servant au stockage des données  
 $\mu$ p = microprocesseur.

Après avoir reçu une demande d'acquisition, transmise par l'interface, le microprocesseur envoie des signaux à des instants précis pour commander le fonctionnement des deux composants : l'E/B et le CA/N, ainsi que pour mettre en mémoire les données acquises.

### 3. Le traitement numérique des données

Il s'agit pour le microprocesseur de traiter numériquement les données saisies par le système. Ce traitement, dans notre cas, remplit des fonctions très différentes :

- . détermination des adresses des maximums du spectre cannelé, des raies de références et de la raie du laser de nombre d'ondes inconnu ;
- . comptage du nombre de maximum entre deux raies données (soit les deux raies de références, soit une raie de références et la raie d'un laser) ;
- . calcul de la différence de marche de l'interféromètre et du nombre d'ondes du rayonnement laser.

Sur la figure 17, nous avons présenté un organigramme général des différents calculs, en montrant les relations entre eux.

## B - LE MATERIEL DU SYSTEME

Les constituants du matériel de notre système micro-informatique sont :

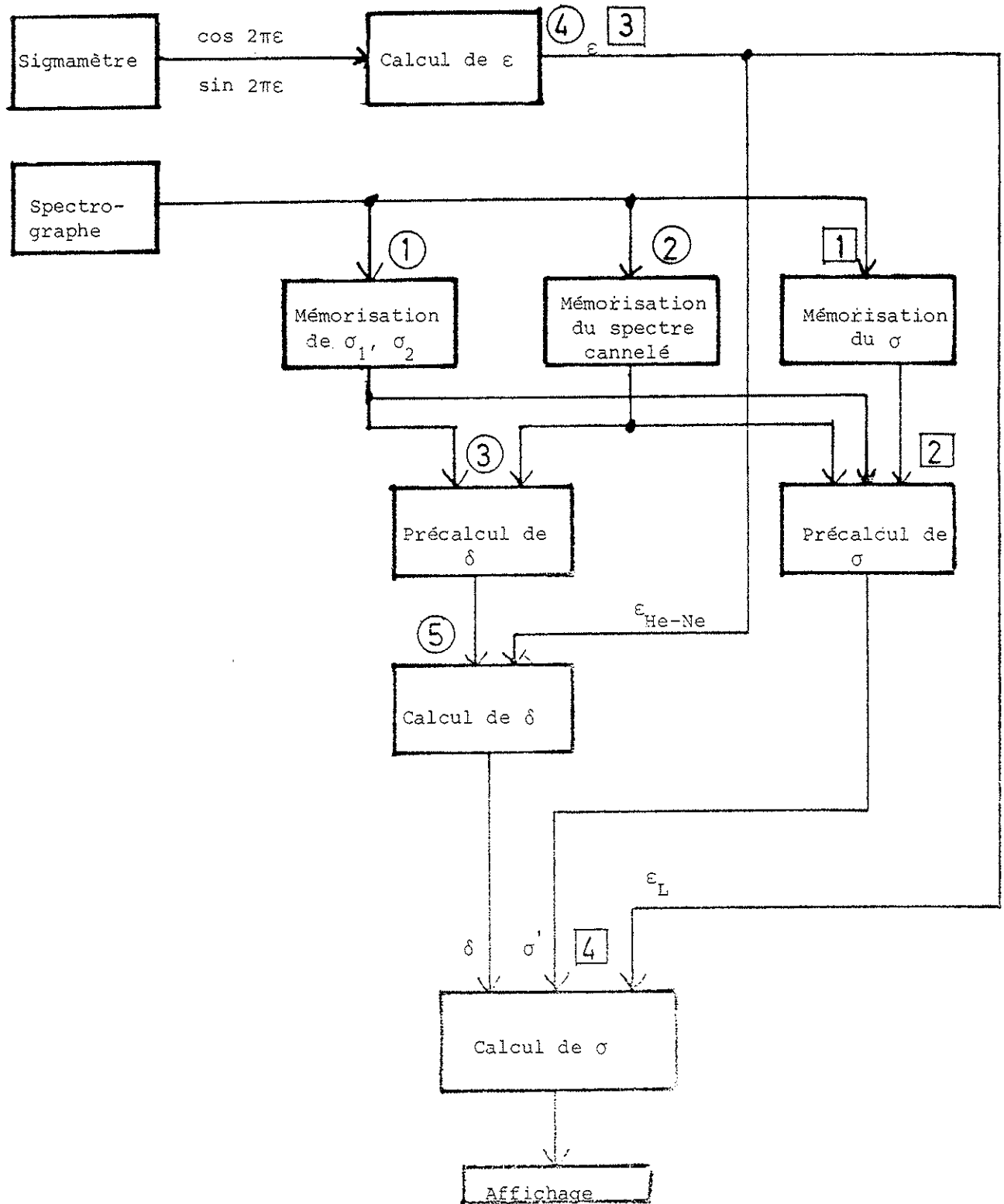


Figure 17

1. Une unité centrale : le microprocesseur et les mémoires,
2. Un interface parallèle d'entrée/sortie,
3. Des unités périphériques d'acquisition de données.

Sur la figure 18, nous avons représenté le schéma de principe de l'architecture de ce matériel.

### 1. L'unité centrale

L'unité centrale est composée du microprocesseur et des mémoires.

#### a) *Le microprocesseur*

Nous avons choisi le 6809 de Motorola qui présente de nombreux avantages par rapport aux microprocesseurs ( $\mu p$ ) de sa catégorie ( $\mu p$  à 8 bits) ; sur ce  $\mu p$  notamment, la multiplication est câblée, les autres opérations arithmétiques peuvent s'effectuer sur des nombres de 16 bits, et son architecture interne comprend de nombreux registres.

Le microprocesseur est relié aux autres constituants du système par plusieurs lignes d'entrée ou de sortie. Ces lignes peuvent se regrouper en quatre groupe distincts :

1°/ Le bus de données : c'est un ensemble de 8 lignes bidirectionnelles permettant la transmission des données au sens large, c'est-à-dire soit les données numériques, soit les codes d'instructions du microprocesseur ;

2°/ Le bus d'adresses : il est composé de 16 lignes unidirectionnelles, ce qui permet au microprocesseur d'adresser  $2^{16}$  mémoires ;

3°/ Le bus de contrôle : il est constitué de 5 lignes destinées à transmettre les commandes des opérations d'entrée/sortie. Nous en avons utilisé 4 : la ligne R/W qui transporte les ordres de lecture ou d'écri-

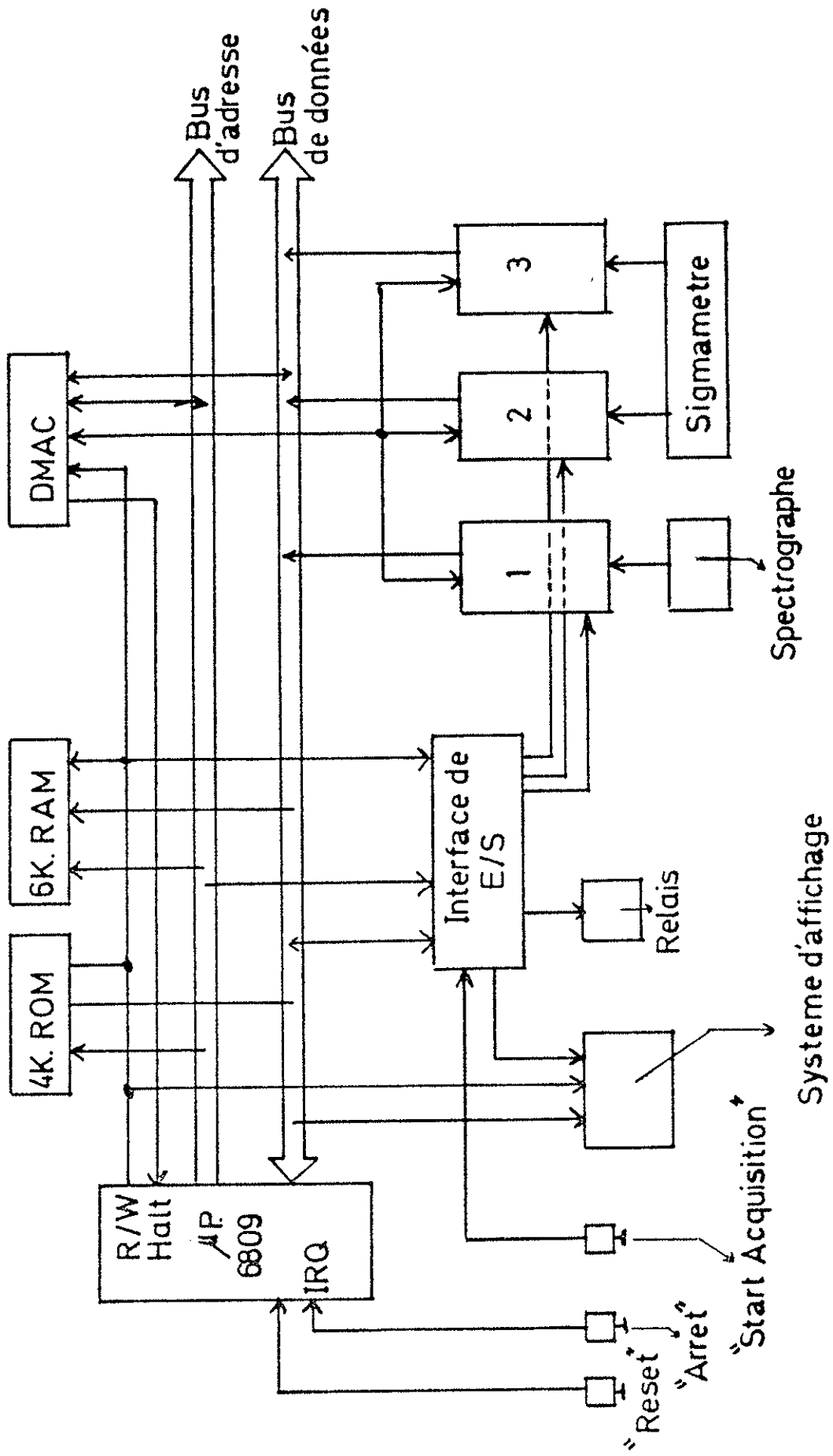


FIGURE (18)

ture dans les mémoires, la ligne HALT qui permet aux unités périphériques d'envoyer au microprocesseur une demande pour avoir un accès direct aux mémoires, et les deux lignes désignées par (BA, BS) dont la combinaison permet au microprocesseur d'envoyer aux unités périphériques un signal appelé "autorisation de DMA". Ces deux derniers signaux seront décrits ultérieurement ;

4°/ Quatre lignes de commande d'interruption ; nous en avons utilisé deux : la commande "RESET" d'initialisation et la commande d'interruption IRQ (Interrupt Request).

### 8) Les mémoires

Dans notre système, nous avons utilisé deux types de mémoires :

1°/ Des mémoires dites mortes ou ROM (Read Only Memory), dont le contenu n'est pas effacé par une coupure de courant ; elles contiennent le logiciel résident. Le volume total de ces mémoires est de 4 K octets (1 K octet  $\equiv 2^{10} \times 8$  bits) dont 2 pour le moniteur.

2°/ Des mémoires dites vives ou RAM (Random Access Memory) qui sont temporaires. Leur capacité est de 6 K octets ; elles ont été utilisées pour la mise au point des programmes et servent à stocker les résultats intermédiaires du calcul et les acquisitions numériques des signaux.

## 2. L'interface d'entrée/sortie, son utilisation dans le pilotage du fonctionnement de l'appareil

Cet élément du système est destiné à transmettre les commandes provenant du microprocesseur et à les adapter aux unités périphériques. Dans notre système, cet élément est le circuit Motorola 6821 appelé PIA (Peripheral Interface Adapter). Le PIA comprend une partie A et une

partie B identiques entre elles, mais dont les adresses sont différentes. La sortie vers la périphérie de ce circuit se fait à travers 16 lignes bidirectionnelles groupées en deux ensembles indépendants appelés le port A (PA) et le port B (PB). Le circuit possède également quatre lignes de commande, deux pour chaque port, désignées par CA1, CA2, CB1 et CB2, qui permettent au microprocesseur de communiquer avec les unités périphériques.

L'organisation interne du PIA est représentée par la figure 19 .  
Les parties A et B possèdent chacune trois registres de 8 bits.

- 1°/ un registre de contrôle (CRA ou CRB), dont la valeur de chaque bit détermine une fonction spécifique du PIA ;
- 2°/ un registre de direction de transfert (DDRA ou DDRB), dont chaque bit sert à fixer le sens de l'échange dans une ligne d'entrée/sortie du port concerné ;
- 3°/ un registre de données (ORA ou ORB) : ce registre sert de tampon pour l'échange des données entre le microprocesseur et les unités périphériques, Cet échange d'informations se fait de façon simultanée sur les 8 bits de ce registre ; le PIA est de ce fait un interface d'entrée/sortie parallèle.

Les deux registres (DDRA, ORA ou DDRB, ORB) ont la même adresse ; on les distingue par la valeur du deuxième bit du registre de contrôle correspondant.

Ce circuit a été utilisé pour commander toutes les unités périphériques du système. Nous décrivons dans le paragraphe suivant son utilisation dans trois cas particuliers ; son utilisation, dans la commande des unités périphériques d'acquisitions de données, sera décrite ultérieurement.

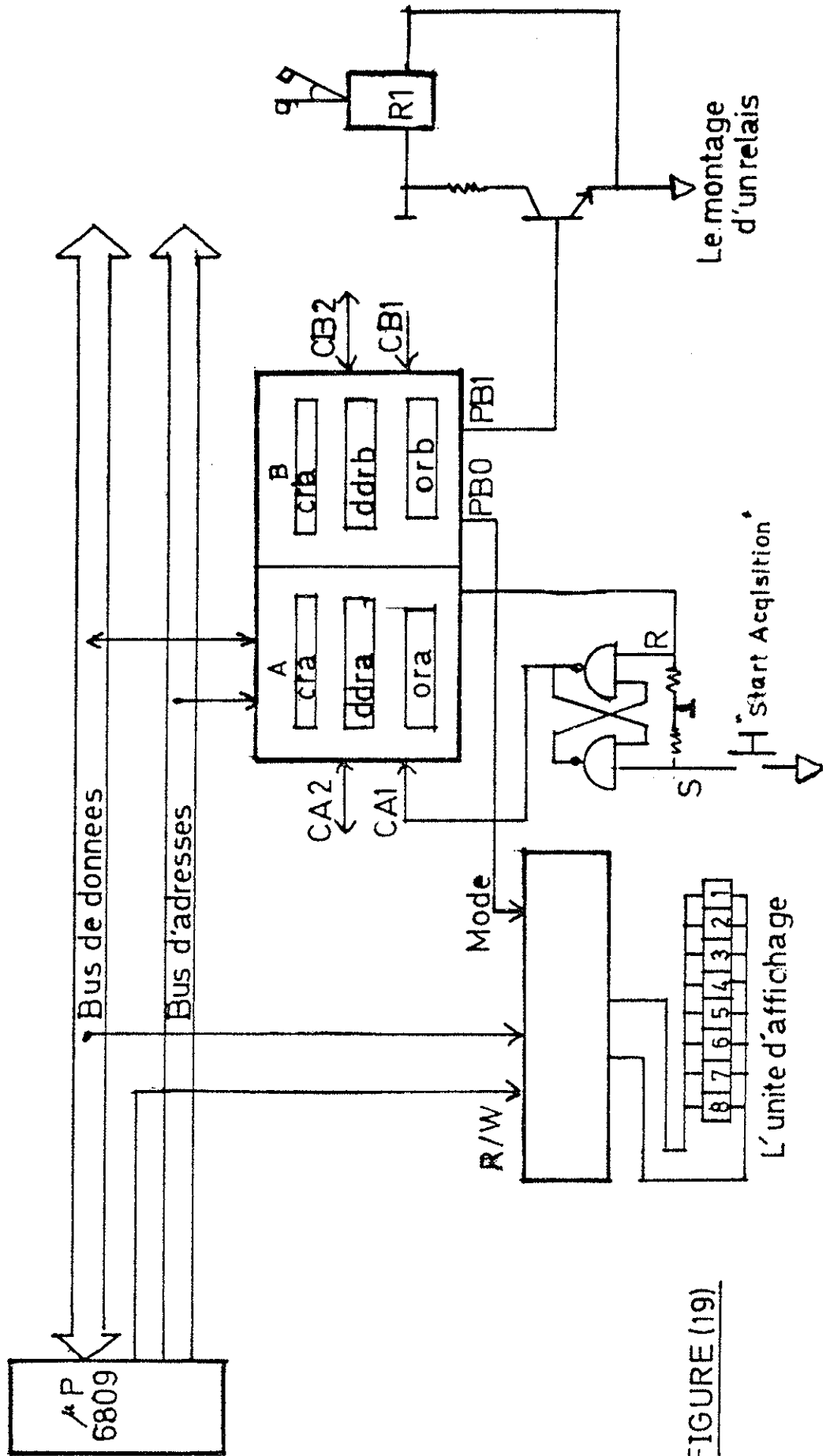


FIGURE (19)



*α) La commande des relais*

Cette commande est réalisée très facilement à l'aide des quatre sorties du port B. Le schéma électronique de commande de l'un de ces quatre relais se trouve sur la figure 19. Quand le microprocesseur met à l'état 1 la sortie PB1 du port B, le relais 1 se ferme pour couper le passage du faisceau lumineux.

Pour effectuer cette commande, il suffit en effet d'écrire au bon moment dans le registre ORB une valeur bien déterminée, de telle façon qu'elle ne change que la valeur du deuxième bit d'ORB (bit correspondant à la sortie PB1).

*β) Le dialogue entre le système et l'utilisateur ; la commande "start-acquisition" et l'unité d'affichage*

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe A de ce chapitre, le système doit pouvoir dialoguer avec l'utilisateur lors des changements de sources lumineuses, par exemple ; le système fonctionne alors en mode conversationnel. Ce dialogue consiste à afficher d'abord un message pour rappeler à l'utilisateur le type de source à utiliser, ensuite le système attend que l'utilisateur lui réponde en envoyant la commande de début du processus d'acquisition de données ; c'est la commande "start acquisition".

L'unité d'affichage est constituée de deux composants : une barrette de huit afficheurs et un circuit intégré spécialisé pour contrôler les opérations d'affichage. Ce circuit qui peut recevoir les données en série, venant directement du bus de données, nous a permis de simplifier sensiblement le montage électronique de cette unité. Sur la figure 19 se trouve un schéma de principe de ce montage. En entrée, le circuit de contrôle d'affichage n'a besoin que de deux signaux de commande : le

signal R/w du microprocesseur et un signal de commande appelé "Mode" qui est émis par la sortie PBO du PIA. Ces deux signaux commandent la lecture, par le circuit d'affichage, successivement : d'un mot de contrôle de 4 bits, et de 8 octets correspondant chacun à l'allumage d'un afficheur ; celui-ci est composé de 7 segments et d'un point décimal. Le mot de contrôle de 4 bits détermine le type de décodage que le circuit doit utiliser pour déchiffrer les données du message. Ces données, en effet, peuvent se présenter sous trois formes différentes que nous décrivons ci-dessous.

L'opération d'affichage s'effectue de la manière suivante : le microprocesseur, à l'aide d'un sous-programme, envoie une impulsion positive sur l'entrée "Mode" du circuit ; pendant la durée de cette impulsion, le microprocesseur émet sur le bus de données les 4 bits du mot de contrôle ; puis, à la fin de cette impulsion, il envoie successivement les 8 octets correspondant au message à afficher (figure 20)

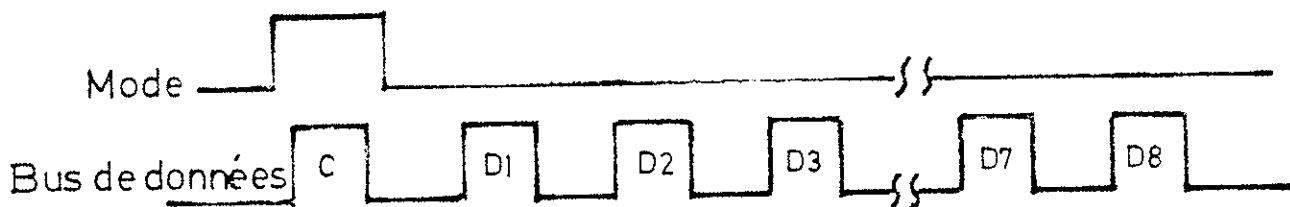


Figure 20

Le diagramme de temps des signaux de commande du contrôleur d'affichage

C  $\equiv$  mot de contrôle

D<sub>1</sub>  $\equiv$  un octet.

Suivant la valeur du mot de contrôle, les octets qui le suivent peuvent avoir les trois significations suivantes :

1°/ Les huit bits des octets correspondent aux différents sigments et au point décimal d'un afficheur. Cette correspondance est montrée sur la figure 21 ; elle permet la visualisation de plusieurs lettres ou signes différents. Pour cela, nous avons utilisé ce type de codage pour

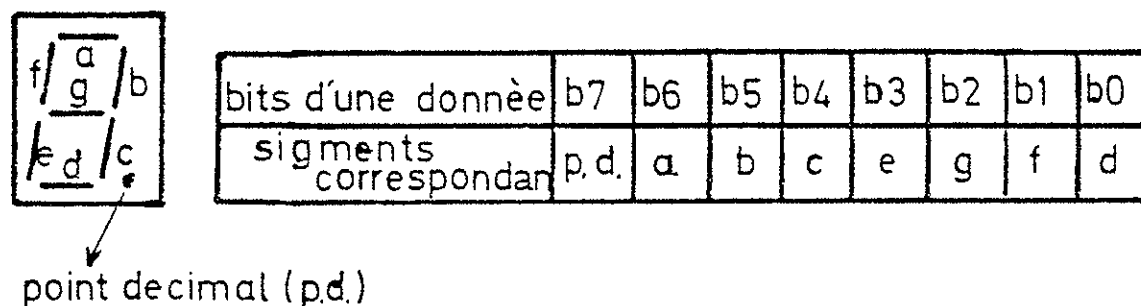


Figure 21

afficher les messages qui correspondent aux changements de sources lumineuses. Ces messages sont :

"SPECTRE , S. BLANCHE, HE-NE, et LASER".

2°/ Seuls 5 bits de chaque mot sont décodés par le circuit ; il affiche en hexadécimales la valeur des quatre premiers bits et il allume le point décimal suivant la valeur du 8ème bit. Nous remarquons que ce type de décodage est bien adapté pour afficher des nombres décimaux. Nous l'avons donc utilisé pour visualiser les valeurs numériques des nombres d'ondes calculés par l'appareil.

3°/ Nous ne présentons cette dernière forme que pour mémoire, car cette forme est identique à la précédente, mis à part que les lettres (A, B, C, D, E et F) du code hexadécimal sont remplacées respectivement par (-, E, H, L, P et blanc).

L'organigramme du sous-programme d'affichage, que nous avons mis au point, est représenté sur la figure 22. Ce sous-programme possède deux entrées différentes suivant le type du message à afficher : message numérique ou message alphabétique.

- Affichage de message numérique :

Un nombre réel  $N$  est représenté en virgule flottante sous la forme suivante :

$$N = M 10^E$$

où la mantisse  $M$  est codée en D.C.B. (Décimal Codé Binaire), et est composée de 6 octets ; l'exposant  $E$  est un octet codé en binaire (c'est-à-dire  $E$  est compris entre -128 et 127. La position de la virgule est telle que  $M$  est un nombre fractionnaire plus petit que 1. Par exemple, le nombre  $N = 6328,17270$  sera représenté par les 6 octets suivants :

06	32	81	72	70	00000100
↑	└──────────────────┘				
la position de la virgule	l'exposant en binaire				

Compte tenu du code que nous avons choisi pour les messages numériques, pour lequel le circuit d'affichage ne décode que 5 bits de chaque octet, le nombre en virgule flottante doit être traité pour pouvoir être déchiffré correctement par le circuit travaillant dans ce code.

Dans l'organigramme de la figure 22, nous avons représenté un nombre par :

$$N \equiv \{0.X_1, X_2 X_3, X_4 X_5, X_6 X_7, X_8 X_9 ; E_1 E_2\}$$

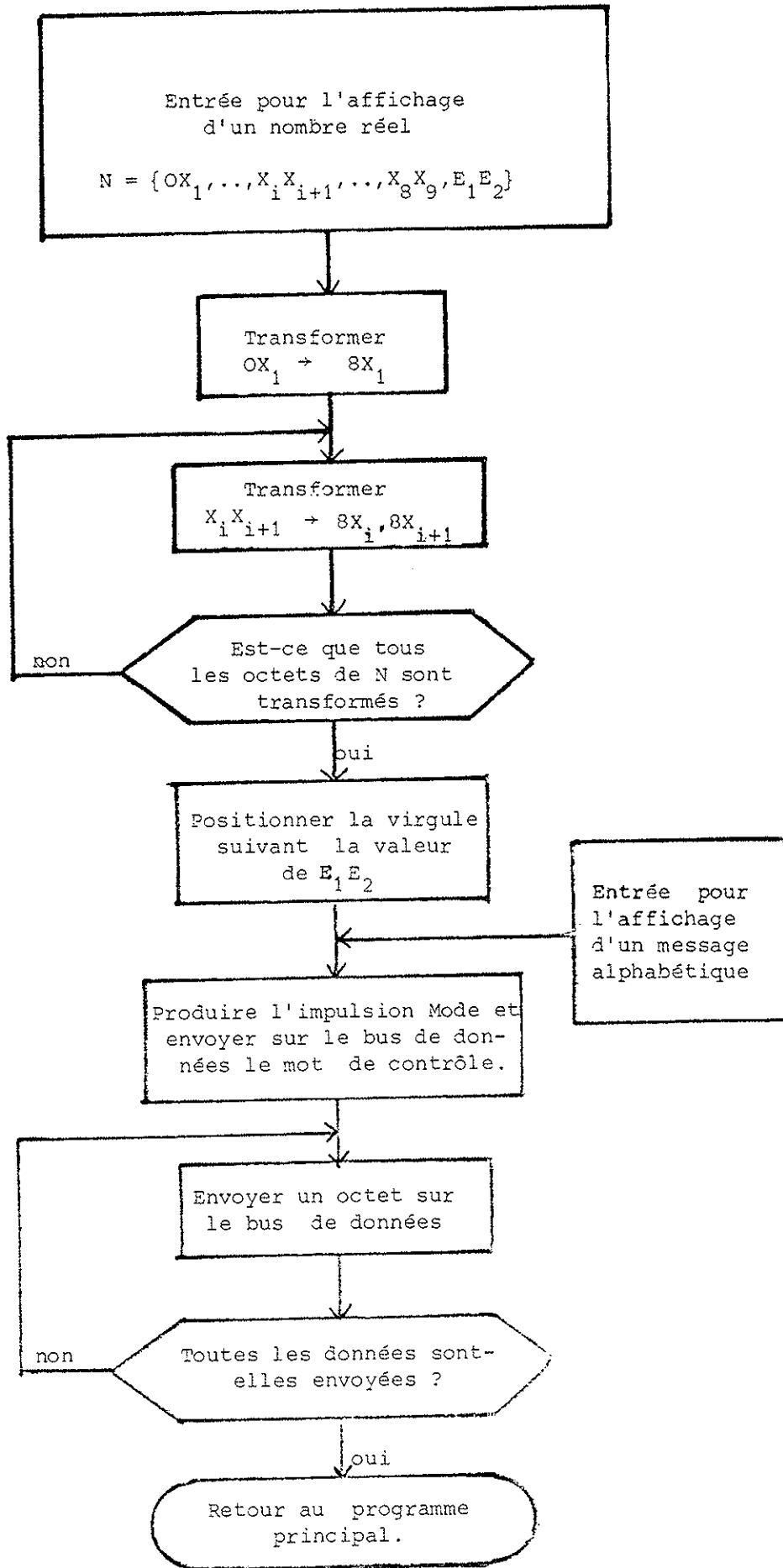


Figure 22

où  $O.X_1$  est le premier octet de  $N$ , composé d'une part de 4 bits nuls : 0, et d'autre part des 4 bits représentant le premier nombre décimal de la mantisse de  $N : X_1$ .

$X_1 X_{i+1}$  est l'octet représentant le  $i^{\text{ème}}$  et  $i^{\text{ème}} + 1$  nombres décimaux de  $N$ .

$E_1 E_2$  est l'octet de l'exposant de  $N$ .

Le traitement de ce nombre  $N$  consiste à transformer les 8 octets de sa mantisse en 9 octets sous la forme

$$bX_1, bX_2, \dots, bX_9$$

où  $b$  est la représentation binaire d'un octal qui prend la valeur 0 s'il y a un point décimal à afficher, sinon il vaut 8.

Nous commençons par transformer le premier octet  $O X_1$  en  $8 X_1$ . Ensuite, on entre dans une boucle afin de mettre tous les autres octets de la mantisse de  $N$  sous la forme  $8 X_i$  sans tenir compte de la position de la virgule. Enfin, nous terminons ce traitement par positionner la virgule de  $N$ , en mettant à zéro les 4 bits de poids fort de l'octet ( $8 X_{E_1 E_2 - 1}$ ). Notons que ce traitement n'est valable que pour les nombres plus grands que 1, ce qui est toujours notre cas.

La suite de l'organigramme est consacrée à la commande du circuit d'affichage et l'envoie sur le bus de données de 8 octets les plus à gauche du nombre  $N$  à afficher.

- Affichage d'un message alphabétique : cet affichage s'effectue sans traitement préalable. Les 8 octets correspondant à un message sont enregistrés dans une zone bien déterminée des mémoires ROM du système.

Le sous-programme d'affichage en langage d'Assembleur correspondant à l'organigramme de la figure 22 est présenté sur la page 18 de l'annexe.

#### *Y) La commande de l'amplification du signal de la barrette.*

Comme nous l'avons signalé au chapitre précédent, une amplification à gain variable a été réalisée pour compenser la perte du signal due, soit à la courbe de brillance de la source blanche, soit à une trop grande différence entre les intensités des deux raies de références de la lampe spectrale à He. Malheureusement, cette compensation n'est pas la même pour ces deux lampes ; il faut, en effet, amplifier, suivant la lampe utilisée, soit du côté vert du spectre (source blanche), soit du côté rouge (lampe spectrale).

Le principe de cette amplification est simple : on introduit une résistance variable dans la contre-réaction d'un amplificateur opérationnel. Cette résistance variable est la résistance "Drain-Source" d'un transistor à effet de champ (figure 23) ; elle est commandée par des signaux en "dents de scie" synchronisés avec le signal de la barrette de photodiodes. Les signaux peuvent avoir, soit une pente positive, auquel cas le gain de l'amplification sera continûment croissant entre la partie verte et la partie rouge du spectre analysé, soit une pente négative, auquel cas ce sera l'inverse. Le choix entre ces deux signaux est commandé par la sortie PA5 du PIA à travers un commutateur électronique (4).

### 3. Les unités périphériques d'acquisition de données

Le système possède trois canaux d'acquisition : un pour le signal venant de la barrette de photodiodes et deux pour les signaux

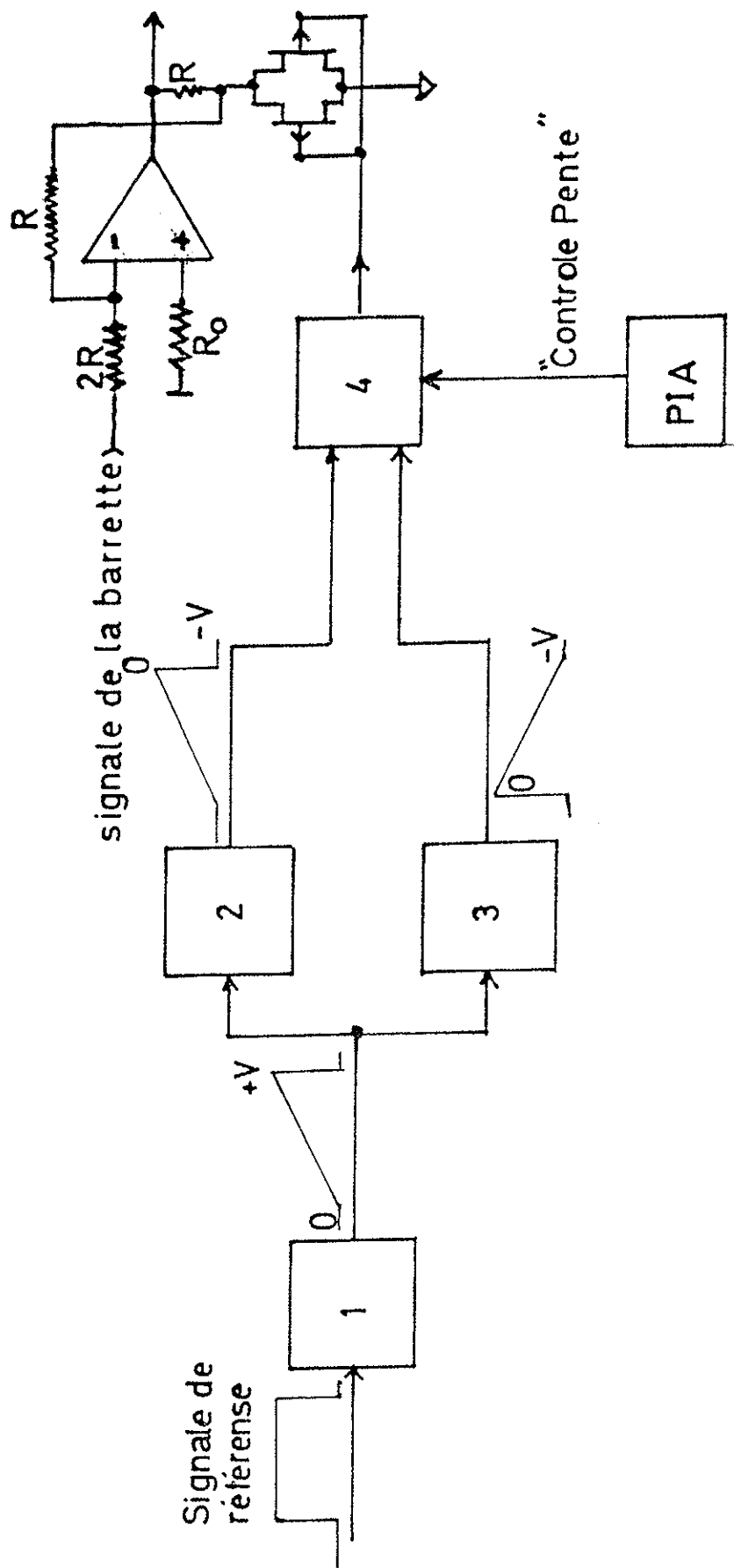


FIGURE (23)



$\cos 2\pi\epsilon$  et  $\sin 2\pi\epsilon$  venant du sigmamètre.

L'acquisition se fait par le transfert des données venant des unités périphériques vers les mémoires RAM de l'unité centrale.

En général, ce transfert nécessite la lecture de la donnée par le microprocesseur, puis son écriture en mémoire. De sorte qu'un seul transfert nécessite 10 à 15 périodes d'horloge pour le microprocesseur, soit, dans notre cas, un temps de l'ordre de 15  $\mu\text{sec}$ . Cependant, les échantillons du signal de la barrette arrivant au rythme de un échantillon toutes les 4  $\mu\text{sec}$ ., il sera nécessaire d'accélérer le transfert en ne le faisant pas passer par les registres internes du microprocesseur.

Un tel type de transfert s'appelle "transfert par accès direct à la mémoire" ou DMA (Direct Memory Access) ; il est géré par un composant spécialisé programmable appelé DMAC (DMA Cotroller).

Dans le paragraphe suivant, nous décrirons le principe de fonctionnement de ce circuit, qui peut contrôler le transfert de quatre unités périphériques différentes. Pour cette raison, nous l'avons utilisé également pour les deux canaux relatifs aux deux signaux provenant du sigmamètre, bien qu'un transfert rapide de type DMA ne soit pas nécessaire. Nous présenterons ensuite les unités périphériques d'acquisition de données.

*a) Le transfert de données par accès direct à la mémoire : le DMAC.*

Comme nous venons de le signaler ci-dessus, ce type de transfert est géré par le circuit DMAC. Quand ce circuit reçoit une "demande de transfert" provenant de l'unité périphérique sollicitant la mémoire de l'unité centrale, il répercute cette demande au microprocesseur par un

signal "demande de DMA". L'instruction en cours alors s'achève. Puis, le microprocesseur informe le circuit DMAC, par un signal appelé "autorisation de DMA", qu'il lui abandonne le contrôle des bus de données et d'adresses. Le circuit DMAC envoie alors à l'unité périphérique l'information "autorisation de transfert" et prend le contrôle des opérations pour assurer un transfert unité périphérique - mémoire (ou l'inverse).

Le circuit DMAC que nous avons utilisé est le contrôleur DMA MOTOROLA 6844. Ce contrôleur possède trois modes de transfert DMA ; parmi eux nous avons choisi celui qui est le mieux adapté à notre système, c'est-à-dire celui qui donne la plus grande rapidité de transfert. Dans ce mode, appelé DMA groupé, le microprocesseur est arrêté pendant toute la durée du transfert ; le DMAC peut alors effectuer le transfert de deux façons différentes suivant que les données arrivent sur le bus à un rythme synchrone ou asynchrone de l'horloge du système. Dans le premier cas, le transfert s'effectue à la vitesse maximum ( $10^6$  données/seconde). Dans le second cas, il est mis en attente et ne commandera le transfert que lorsque les données à transférer seront présentes sur le bus.

Dans le paragraphe suivant, nous allons voir que l'acquisition de données par le contrôleur DMA nécessite une parfaite synchronisation entre les échantillons du signal de la barrette de photodiodes et les différents signaux de commande de transfert par DMA. La figure 24 présente le diagramme de temps des différents signaux correspondant au transfert DMA groupé.

Nous faisons les remarques suivantes :

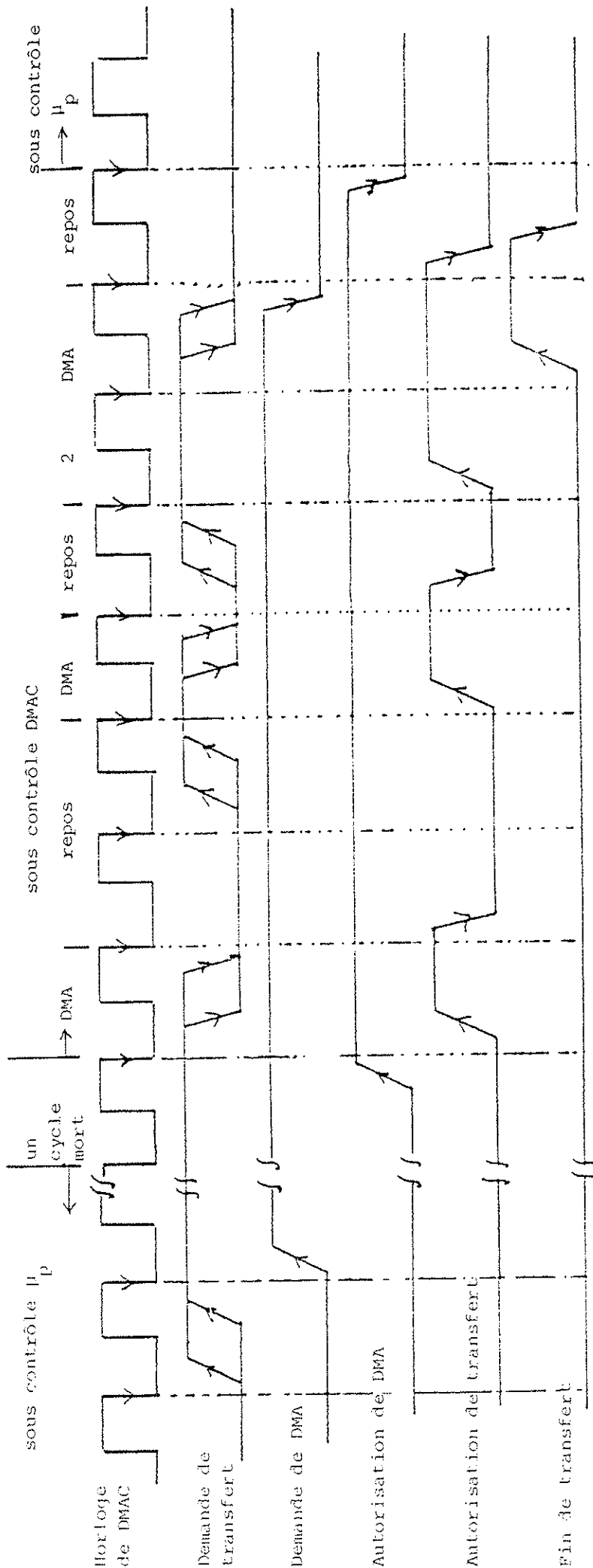


Figure 24

- . Le processus de transfert est synchronisé sur les transitions négatives des impulsions de l'horloge ;
- . une autorisation de transfert est émise à condition que l'état logique de deux signaux "autorisation de DMA" et "demande de DMA" soit à "1" ;
- . une impulsion est émise par le DMAC pour signaler la fin de transfert. Ceci est produit quand un registre compteur , interne au DMAC, qui, au début du transfert contient le nombre des données à transférer, arrive à zéro.

B) *L'unité périphérique d'acquisition du signal de la barrette de photodiodes*

Cette unité d'acquisition comprendra principalement un convertisseur analogique/numérique, un registre tampon entre le convertisseur et le bus de données, et le contrôleur DMA. L'"échantillonneur/bloqueur" (E/B) est contenu dans le circuit électronique associé à la barrette.

Le problème principal de cette acquisition est la réalisation de la parfaite synchronisation entre le signal de la barrette et les signaux de commande d'un transfert de type DMA. Ce problème de synchronisation vient de ce que le processus d'acquisition est déclenché par la commande "start acquisition" d'une façon asynchrone avec le signal de la barrette.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé deux signaux de commande émis par les circuits électroniques de la barrette appelés "start out" et "shunt plus". Le premier est une impulsion qui déclenche la "lecture" des signaux optiques reçus par les photodiodes de la barrette. Le deuxième est un signal de référence dont les impulsions

positives coïncident avec les échantillons du signal. Entre l'impulsion "start out" et le premier échantillon, il y a 4 transitions positives du signal "shunt plus".

Nous avons représenté l'organigramme qui montre le déroulement du processus de l'acquisition du signal de la barrette sur la figure 25. Sur la figure 26, nous avons représenté un schéma de principe du montage électronique de l'unité périphérique de l'acquisition de ce signal.

Le PIA reçoit, comme nous l'avons vu au paragraphe B.2.β, la commande "start acquisition". Un sous-programme commande au microprocesseur d'envoyer une demande de transfert au DMA par une des lignes de sorties du PIA. Cette demande est transmise par un circuit logique représenté par le rectangle 4 de la figure 26. Le DMAC envoie alors une demande de DMA au microprocesseur qui répond par le signal "autorisation de DMA". La transmission de ce signal au DMAC suit alors les étapes a, b et c de l'organigramme précédent ; ces étapes sont réalisées par les trois ensembles de circuits logiques représentés par les rectangles 1, 2 et 3 de la figure 26. Le DMAC, à ce moment-là, reçoit continuellement des demandes de transfert synchronisées par le signal "start plus" et transmises par le circuit logique 4.

Si la source lumineuse utilisée est un laser fonctionnant en régime impulsionnel, le processus d'acquisition doit être complété. En effet, les photodiodes de la barrette sont éclairées avec la lumière dispersée par le spectrographe et sont lues les unes après les autres par le système. Donc, si la lecture de ces photodiodes débute avant l'arrivée de l'impulsion lumineuse, le résultat peut être erroné. Nous avons conçu notre système électronique de sorte qu'une lecture

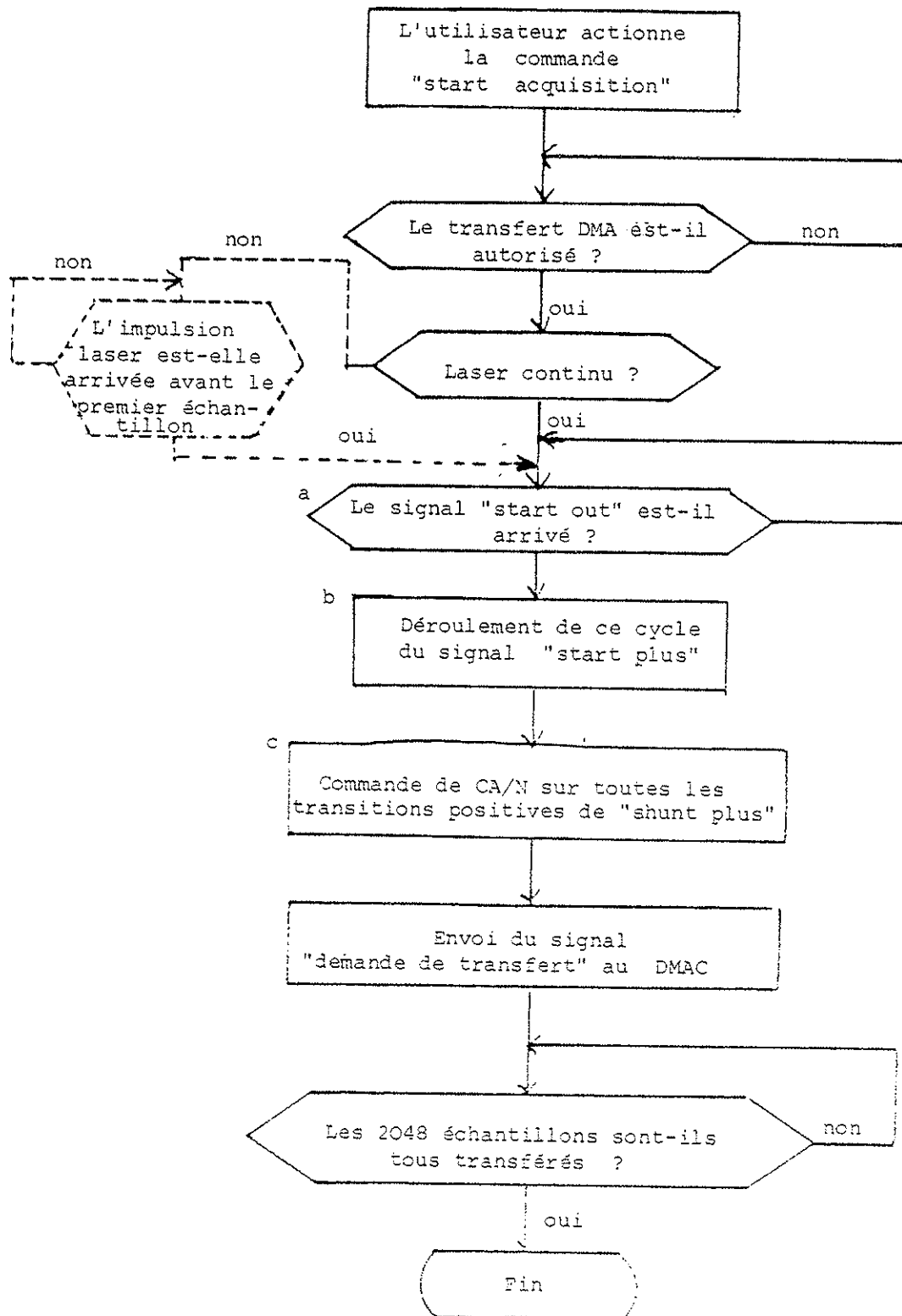


Figure 25

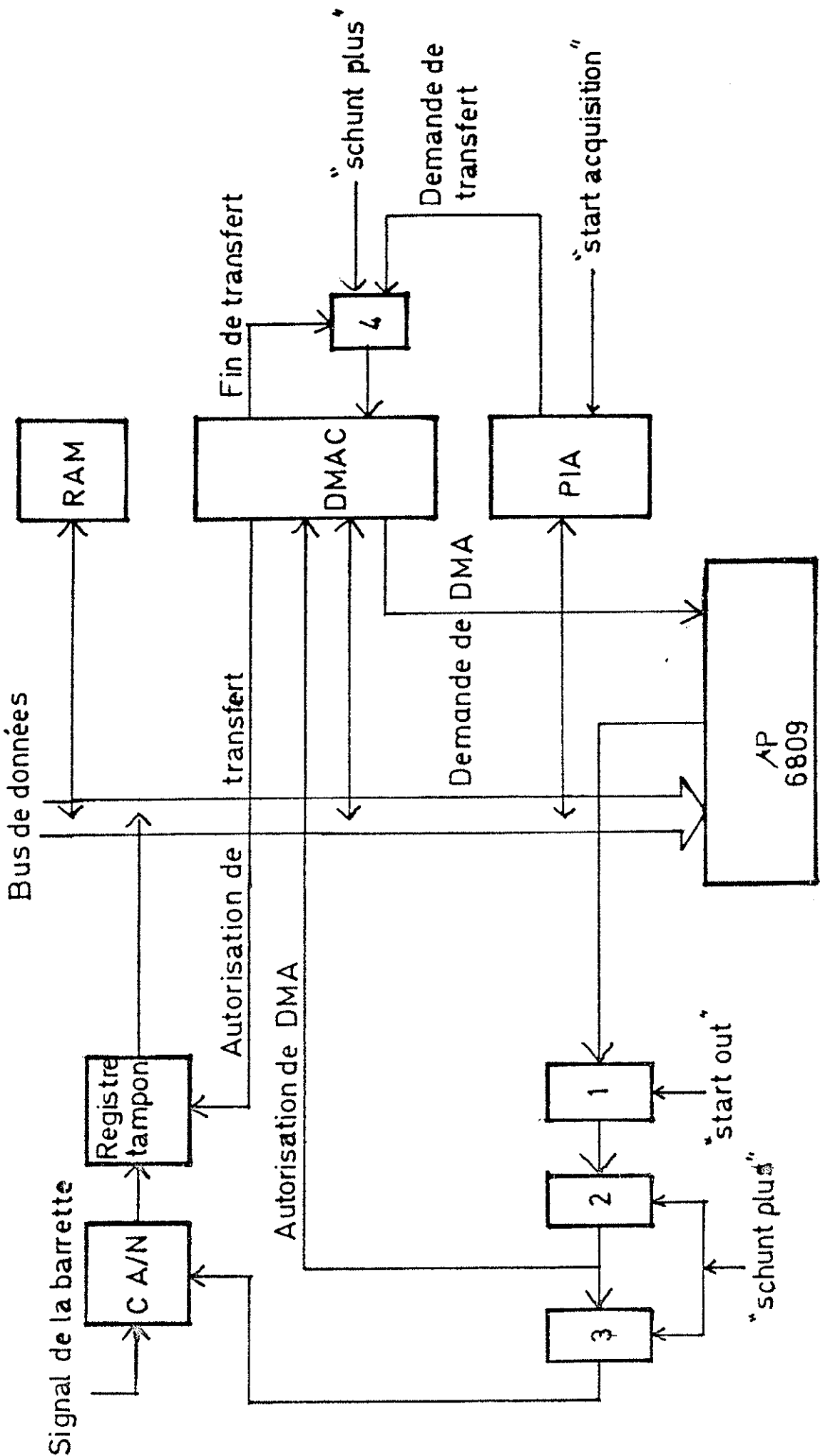


FIGURE (26)

n'est prise en compte que si elle débute alors qu'une photodiode de référence est déjà éclairée par une impulsion du laser.

Cette condition supplémentaire est dessinée en pointillé sur l'organigramme de la figure 25.

*γ) Les unités périphériques d'acquisition des signaux  $\sin 2\pi\epsilon$  et  $\cos 2\pi\epsilon$ .*

Ces deux unités d'acquisition sont composées de deux chaînes symétriques. La figure 27 représente un schéma de principe de l'une d'entre elles : l'unité d'acquisition du signal  $\cos 2\pi\epsilon$ .

Le convertisseur analogique/ numérique (CA/N) utilisé est conçu pour être connecté directement sur le bus de données du système. Le processus d'acquisition est déclenché par la commande "start acquisition"; un sous-programme se charge alors de faire envoyer deux impulsions pour commander successivement l'échantillonneur/bloqueur (E/B) et le CA/N. La demande de transfert est émise alors par la combinaison des deux signaux : commandes de conversion et de fin de conversion. Les deux circuits logiques (1 et 2) sont les mêmes que les circuits (1 et 2) de la figure 24. Le circuit logique (3) permet d'une part la transmission de la commande de conversion du CA.N et d'autre part le maintien du résultat de la conversion sur le bus de données jusqu'à la fin du transfert du signal  $\cos 2\pi\epsilon$ .

Les photos 12, 13 et 14 représentent les différents constituants du matériel du système. La photo 12 représente d'une part l'électronique associée à la barrette de photodiodes (la carte à gauche), et d'autre part l'amplificateur à gain variable et l'électronique des relais



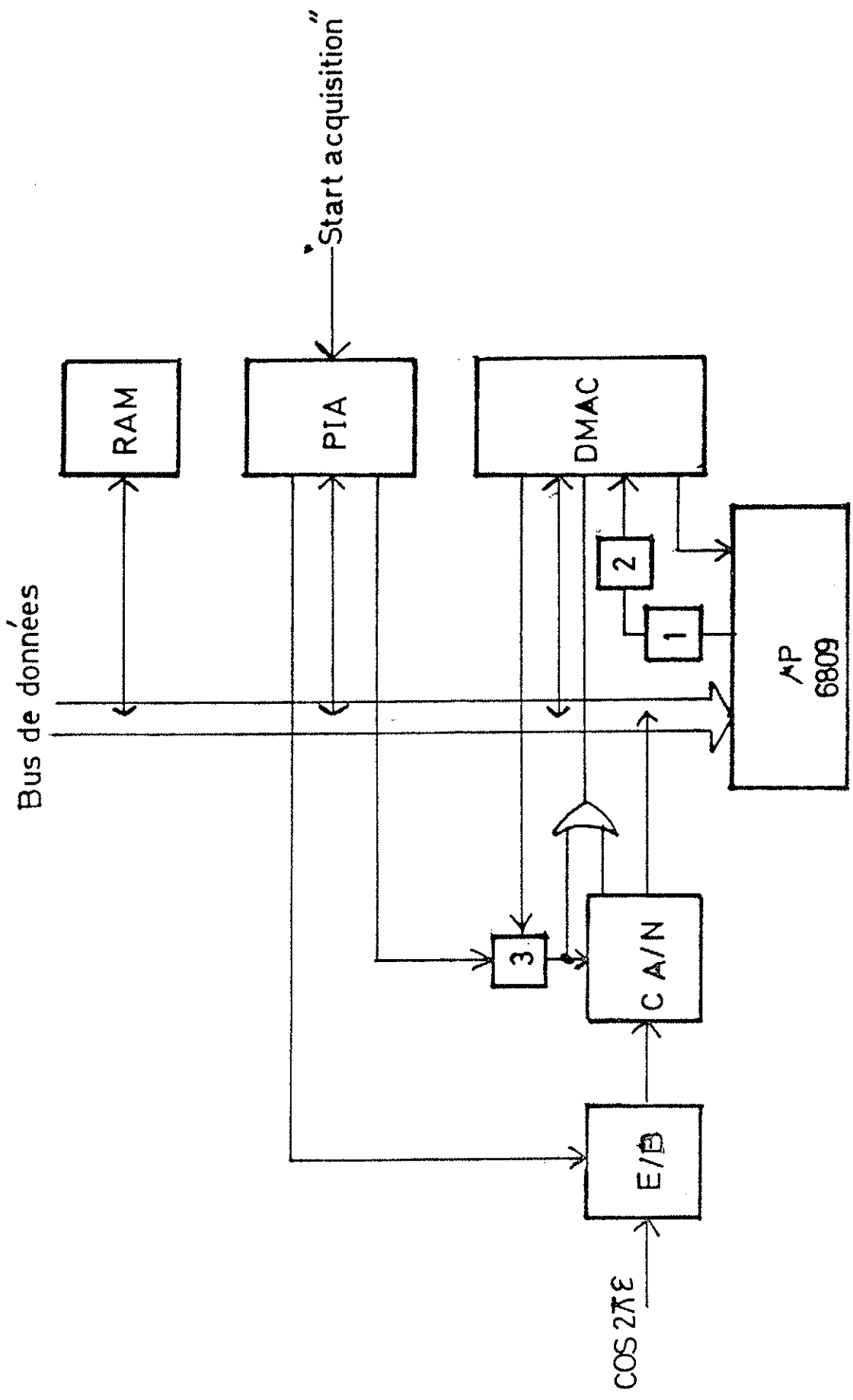


FIGURE (27)



PHOTO 12

L'Interface Barrette.  
Système  
Microinformatique.

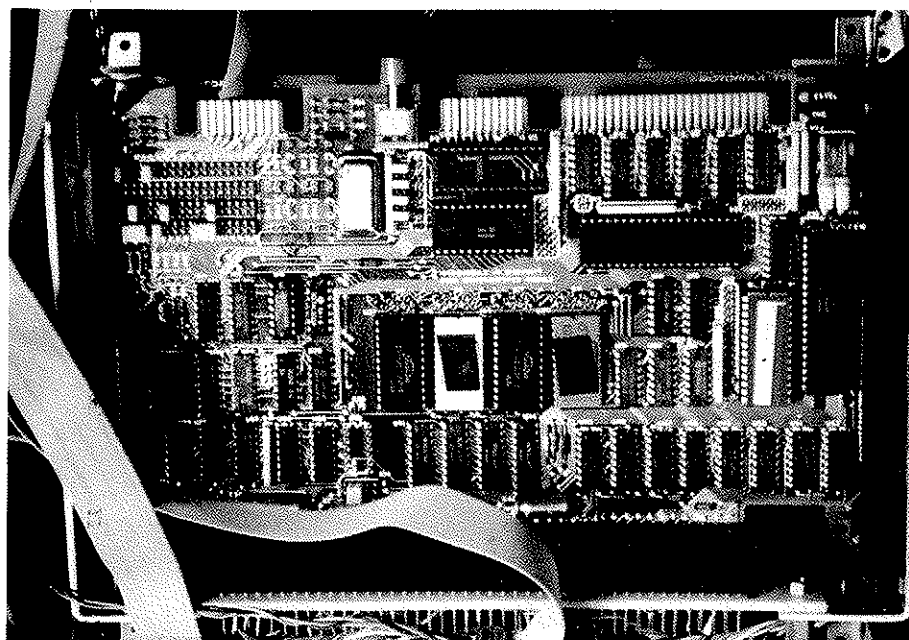
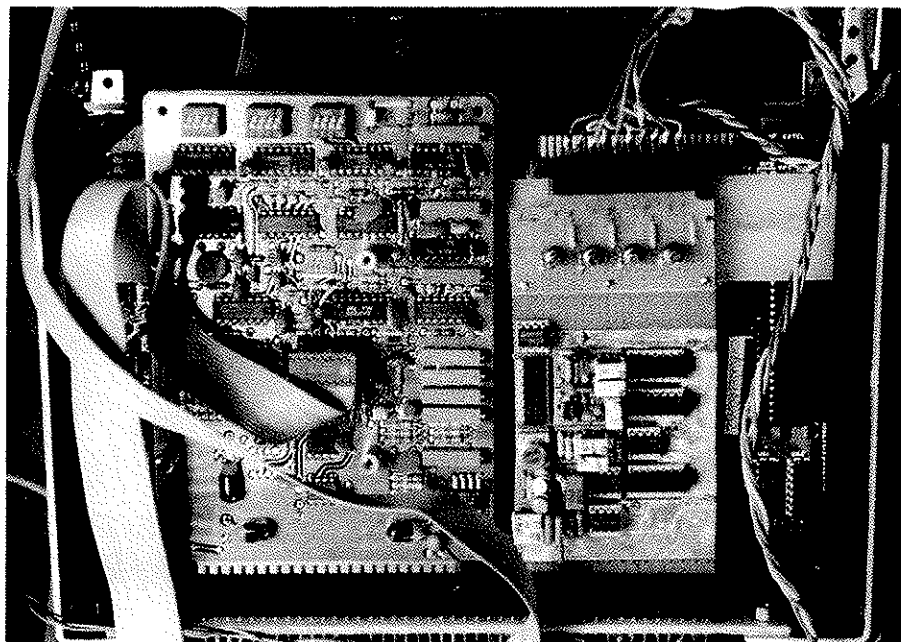


PHOTO 13

L'Unité Centrale.

PHOTO 14

Le Système  
d'acquisition  
de données.

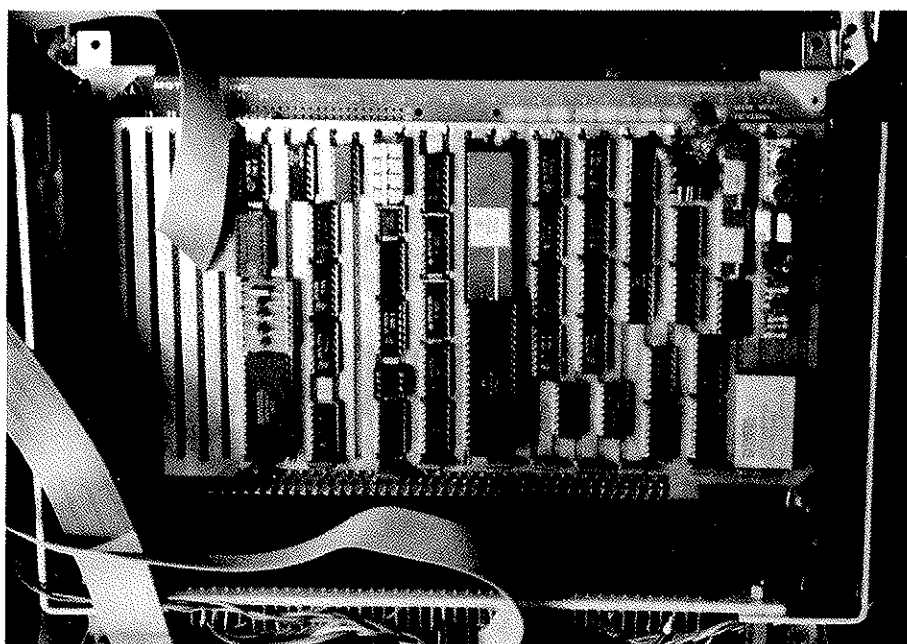






PHOTO 15



(la carte à droite). La photo 13 représente l'unité centrale, c'est-à-dire le microprocesseur et les mémoires. La photo 14 représente les unités périphériques du système.

La photo 15 représente l'appareil avec ces deux parties optique et électronique.

### C - LE PROGRAMME PRINCIPAL ET LES SOUS-PROGRAMMES DE TRAITEMENT NUMERIQUE

Le langage de programmation que nous avons choisi est l'assembleur qui permet de minimiser le temps de compilation et d'optimiser le temps d'exécution du programme. Cette rapidité sera nécessaire pour l'introduction de l'appareil dans une boucle d'asservissement d'une fréquence d'un laser.

Nous nous limitons, dans ce paragraphe, à la description de l'organigramme du programme principal et celles de deux sous-programmes (SP) de traitement particulièrement significatif dans notre application. Le premier SP calcul l'excédent fractionnaire  $\varepsilon$  à partir de deux quantités  $\sin 2\pi\varepsilon$  et  $\cos 2\pi\varepsilon$ , et le second transforme un nombre binaire de 16 bits non signé en 5 chiffres DCB.

Nous avons mis en annexe les textes du programme principal et ses SP, sauf ceux du calcul des quatre opérations mathématiques de base (+, -, ./, et x) qui sont bien connus.

#### 1. L'organigramme du programme principal

Nous avons représenté sur les figures 28 A, B, C, D et E l'organigramme des différentes étapes de l'exécution du programme principal (PP).

Etape A : c'est l'étape d'initialisation et de choix de fonctionnement (figure 28 A). Après avoir mis en marche le système, le programme teste une des entrées du PIA : si cette entrée est à zéro, le système suit le programme que nous avons mis au point et qui se trouve dans les mémoires ROM. Si cette entrée est à 1, l'utilisateur peut modifier ce programme. Dans ce cas, le système est sous contrôle d'un moniteur, celui-ci aidera l'utilisateur à tester l'exécution d'un programme (mis dans les mémoires RAM) en travaillant pas à pas ou en mettant des points d'arrêt après ou avant les opérations à tester. A la fin de cette phase de mise au point, l'utilisateur, s'il veut exécuter son programme sans l'aide du moniteur, doit enregistrer son programme dans des mémoires ROM.

Le début de chacune des étapes suivantes possède une partie de programme commune : c'est la "préparation à l'acquisition", dans laquelle le PP programme le DMAC, affiche un message pour signaler la source lumineuse à utiliser, positionne convenablement les relais et, finalement, attend la commande "start acquisition". Nous n'avons représenté cette partie commune qu'une seule fois sur la figure 28 B encarts 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

Etape B (figure 28 B) : dans cette étape, le PP fait l'acquisition et le traitement numérique du signal de la lampe spectrale. Comme nous venons de le signaler, au début de cette étape le PP exécute la "préparation à l'acquisition" qui, pour programmer le DMAC et afficher le message "SPECTRE", fait appel à deux SP : "DMAC" et "AFFDIG". Ensuite, le PP entre dans une boucle pour attendre la commande "start acquisition".



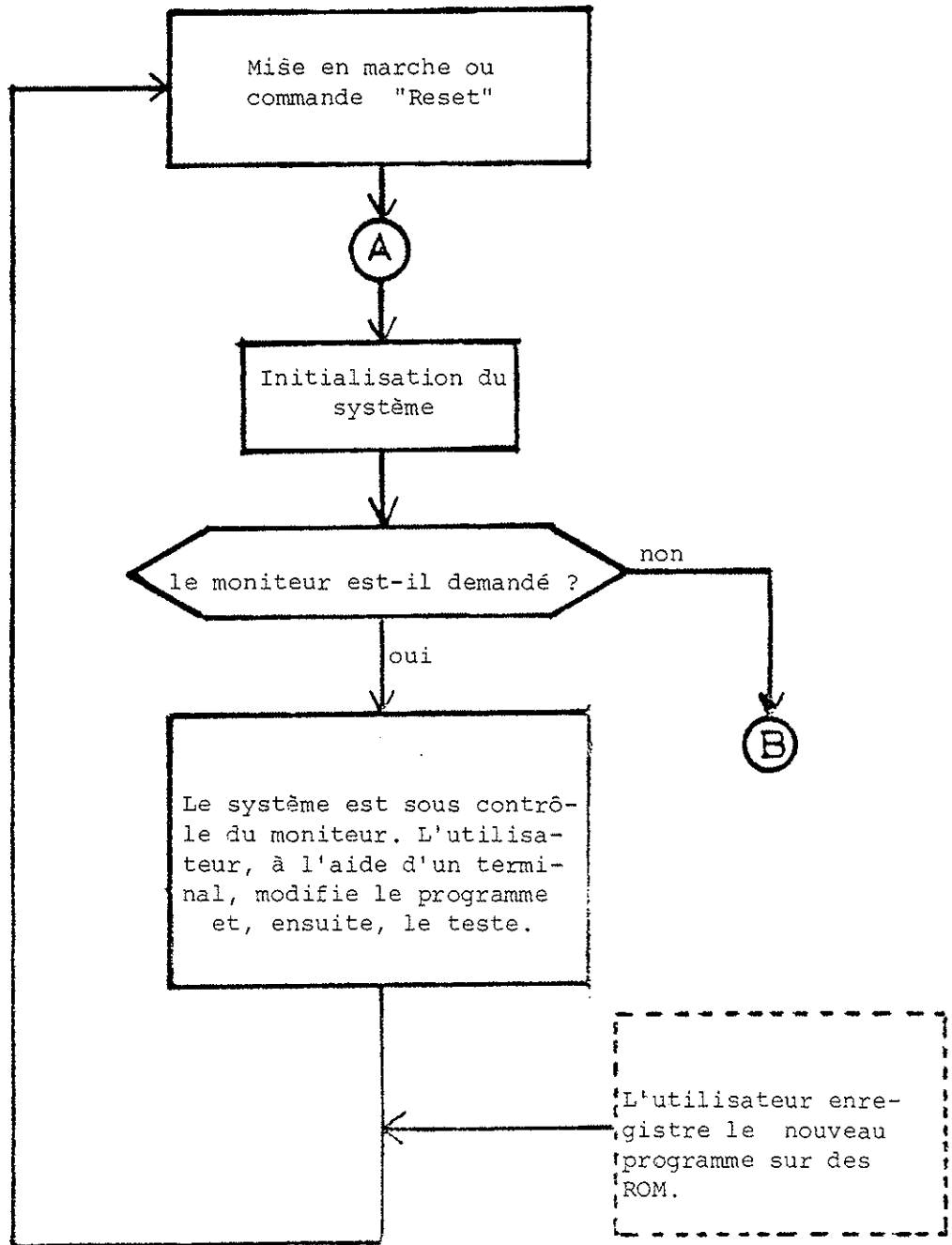


Figure 28 A

L'étape d'initialisation et de choix de fonctionnement.

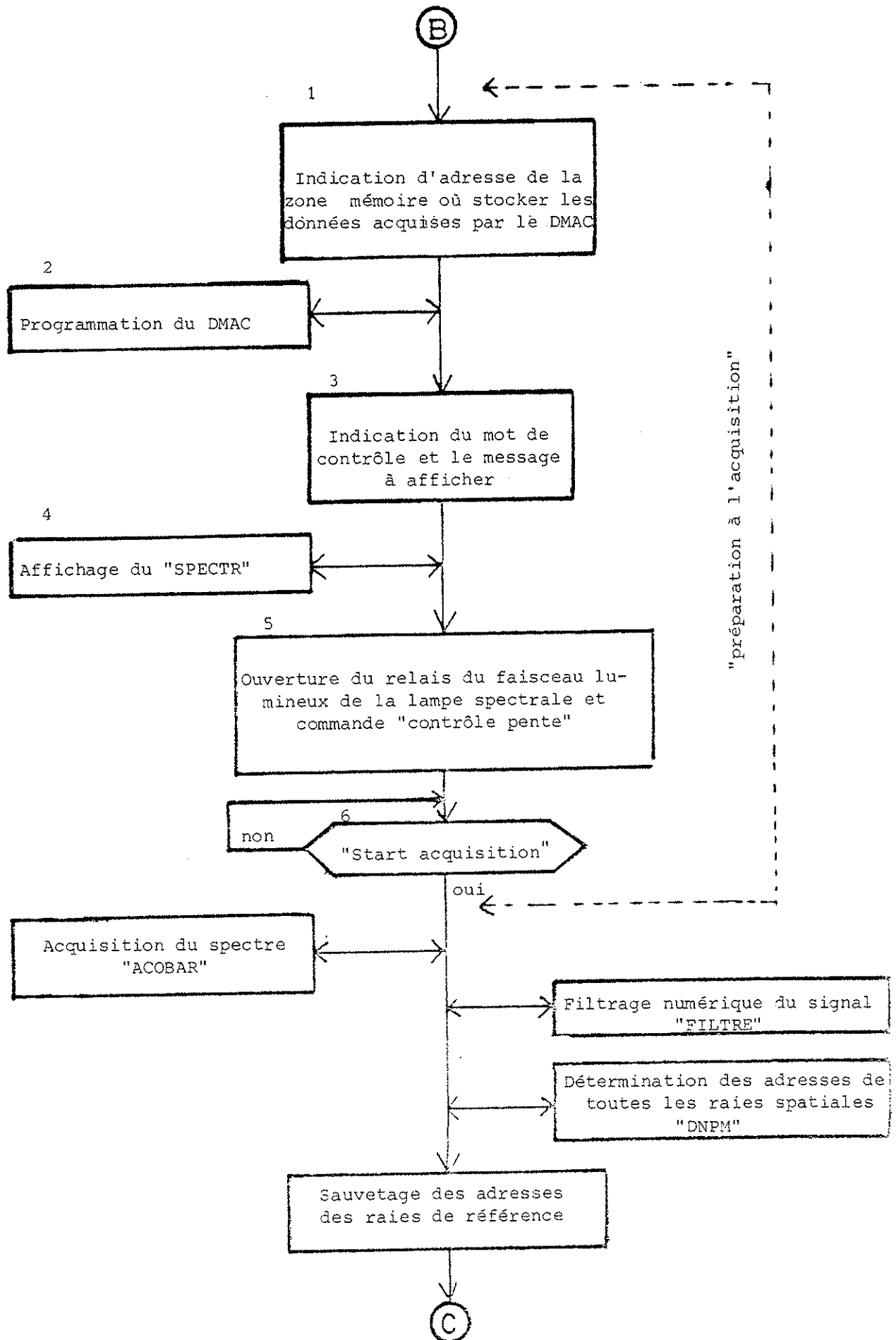


Figure 28 B

Acquisition et traitement du spectre.

Puis le PP, après avoir reçu la commande d'acquisition, transfère le signal de la barrette à l'aide d'un SP "ACQBAR". Puis, en appelant un SP "FILTRE", il met à zéro toutes les valeurs inférieures ou égales à 7 du signal reçu. Cette opération permet de distinguer les maximums du signal reçu de ceux du bruit de fond qui l'accompagne. Enfin, à l'aide de "DNPM" (Détermination du Nombre et des Positions des Maximums), le PP détermine l'adresse de toutes les raies spectrales du signal, et il garde seulement en mémoire les adresses des deux raies de références, c'est-à-dire celle de la première et celle de la dernière raie, désignées respectivement par  $\rho_1$  et  $\rho_2$ .

Etape C (figure 28 c) : dans cette étape, le PP fait l'acquisition du signal d'un spectre cannelé. Il commence par programmer le DMAC, puis il affiche le message "S. BLANCHE" et, ensuite, il ouvre le relais du faisceau de la lumière blanche et ferme celui de la lampe spectrale. Sur ordre de l'utilisateur, le PP fait l'acquisition du signal du spectre cannelé, puis il fait appel à plusieurs SP afin de déterminer la différence des ordres d'interférences pour les deux positions des raies de référence : "DNPM", "CALFRC" et "CLNBM". Pour calculer l'excédent fractionnaire  $\varepsilon_1$ , "DNPM" détermine les adresses des deux maximums du spectre cannelé ( $M_{11}$ ,  $M_{12}$ ) qui suivent la raie  $\rho_1$ , et "CALFRC" en déduit la valeur de  $\varepsilon_1$

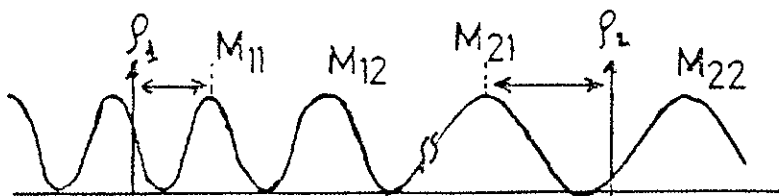


Figure 29

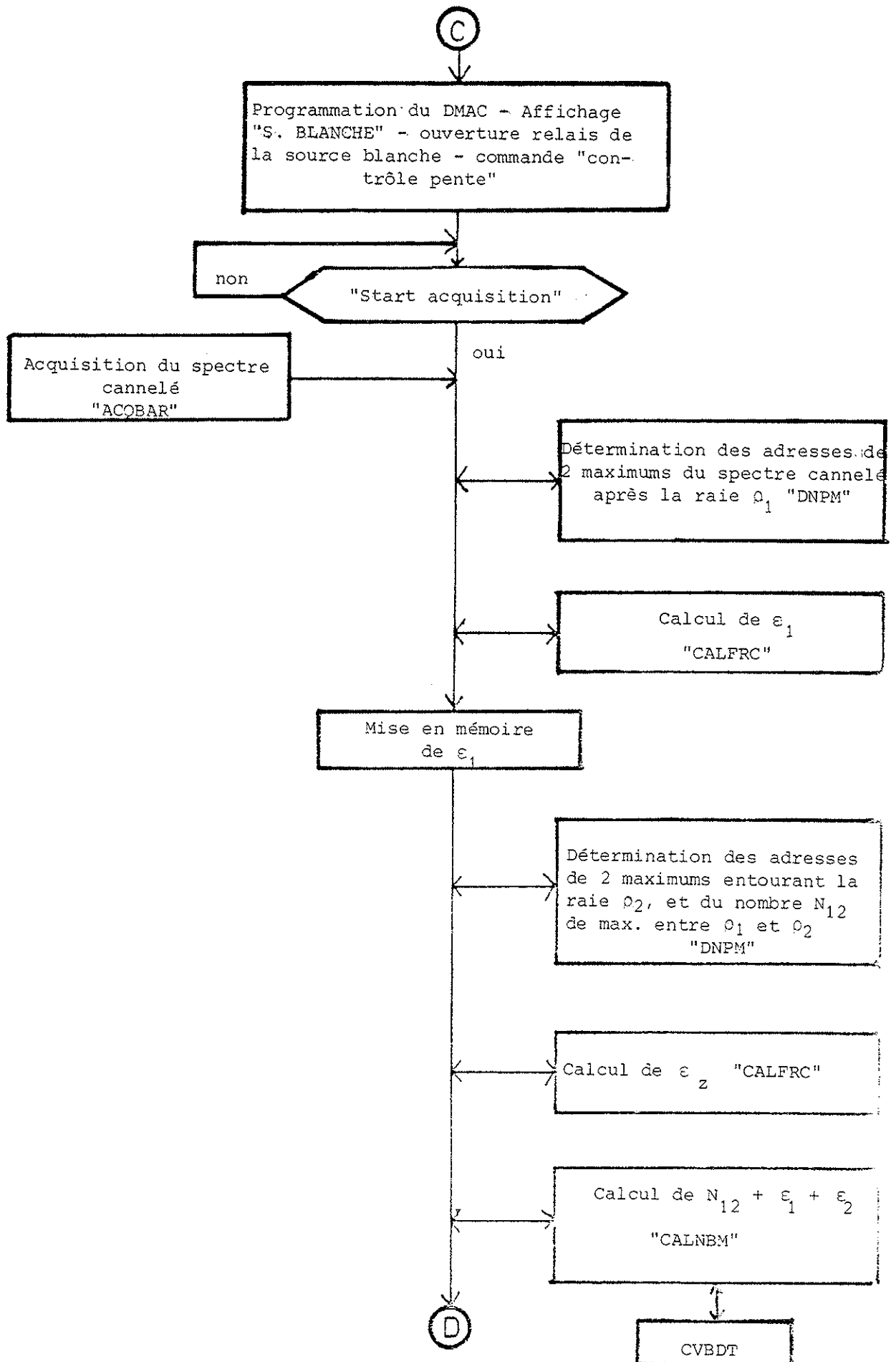


Figure 28 C

Acquisition et traitement du spectre cannelé.

Ensuite "DNPM", dans un nouvel appel, détermine le nombre de maximums  $N_{12}$  entre les deux raies  $\rho_1$  et  $\rho_2$  et les adresses des deux maximums du spectre cannelé entourant  $P_2$  ( $M_{21}$ ,  $M_{22}$ ) ; ce qui, à l'aide de "CALFRC", permet de calculer le complément de l'excédent fractionnaire  $\epsilon_2$  (figure 29). Enfin, le dernier SP "CLNBM" calcule le nombre  $N_{12} + \epsilon_1 + \epsilon_2$  ; ce SP utilise un autre SP "CVBTD" qui convertit un nombre binaire non signé de 16 bits en 5 digits DCB ; cette conversion est nécessaire pour transformer le nombre de maximums  $N_{12}$  représenté en binaire en représentation DCB, opération nécessaire pour poursuivre les calculs.

Etape D (figure 28 D) : dans cette étape, le PP calcule la différence de marche  $\delta$  de l'interféromètre de Michelson du sigmamètre. Après avoir exécuté la partie "préparation à l'acquisition" déjà signalée, l'utilisateur voit le message "He-Ne" sur les afficheurs. Après avoir reçu la commande "start acquisition", le PP transfère les deux signaux  $\sin 2\pi\epsilon$  et  $\cos 2\pi\epsilon$  provenant du sigmamètre vers les mémoires. Cette acquisition est effectuée à l'aide de "ACQSIN". Puis le PP appelle un SP dit "EPS" afin de calculer l'excédent fractionnaire  $\epsilon_{\text{He-Ne}}$  ; ce SP "EPS" utilise un autre SP qui calcule la fonction  $\text{Arctg}(x)$ . Cette fonction peut être approximée par la relation {7} :

$$\text{arctg } x = \frac{x}{1 + 0,28 x^2} + \theta(x) \quad \text{pour } |x| \leq 1$$

$$\text{ou } |\theta(x)| \leq 5 \cdot 10^{-3}$$

Cette incertitude  $\theta(x)$  est inférieure à celle prévue pour notre appareil qui est 1 % de  $2\pi$  soit  $7 \cdot 10^{-2}$ . Rappelons que "EPS" sera

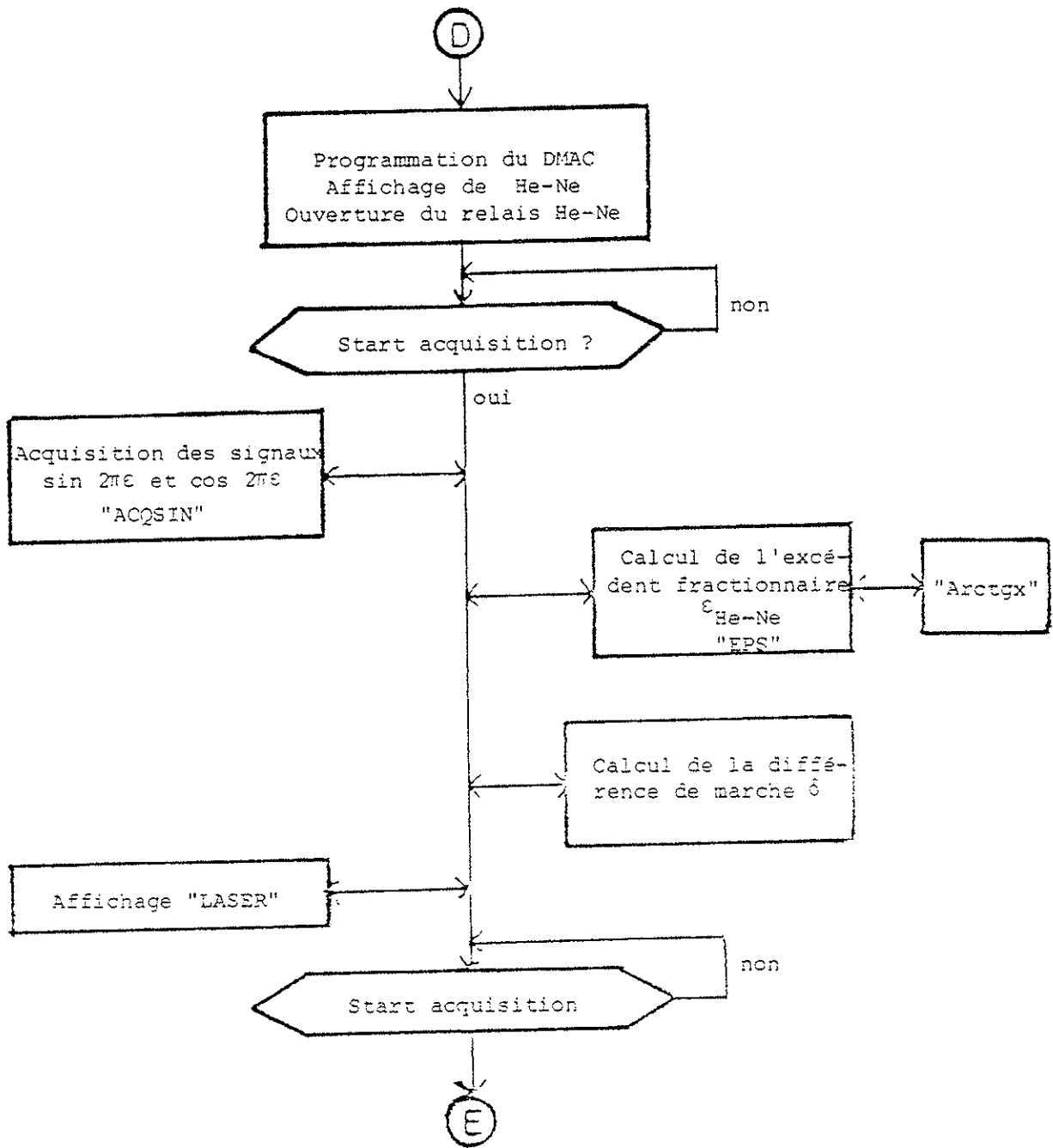


Figure 28 D

Calcul de la D.D.M.  $\delta$

décrit dans le paragraphe suivant. Ensuite le PP calcule la différence de marche  $\delta$  et, enfin, il affiche le message "LASER" pour indiquer que le système est prêt à commencer la mesure ; il attend alors la commande "start acquisition" pour exécuter la dernière étape de cet organigramme.

Etape E (figure 28 E) : Dans cette étape, le PP mesure et affiche le nombre d'ondes du laser. Les SP utilisés dans cette étape ont déjà été décrits dans les étapes précédentes. Le PP demande leur exécution dans l'ordre montré sur la figure 28 E. Cette étape est perpétuellement recommencée jusqu'à ce que l'utilisateur interrompe les mesures en appuyant sur la commande "Arrêt". Cette commande fait appel à un SP d'interruption où le système attend la commande "start acquisition" pour continuer la mesure.

## 2. L'organigramme du sous-programme "EPS"

La fonction de ce sous-programme est de calculer l'excédent fractionnaire  $\epsilon$  à partir des deux signaux  $\sin 2\pi\epsilon$  et  $\cos 2\pi\epsilon$  provenant du sigmamètre. Sur la figure 30, nous avons représenté l'organigramme de ce calcul. Le SP compare les valeurs absolues de  $\sin 2\pi\epsilon$  et  $\cos 2\pi\epsilon$  et, suivant leurs grandeurs respectives, calcule en exécutant les opérations montrées sur l'organigramme de la figure 29.

## 3. L'organigramme du sous-programme "CVBTO"

Le but de ce sous-programme est de convertir un nombre binaire de 2 octets en un nombre en DCB de 5 chiffres ayant chacun 4 bits. Cette conversion est nécessaire parce que nos signaux sont décodés en

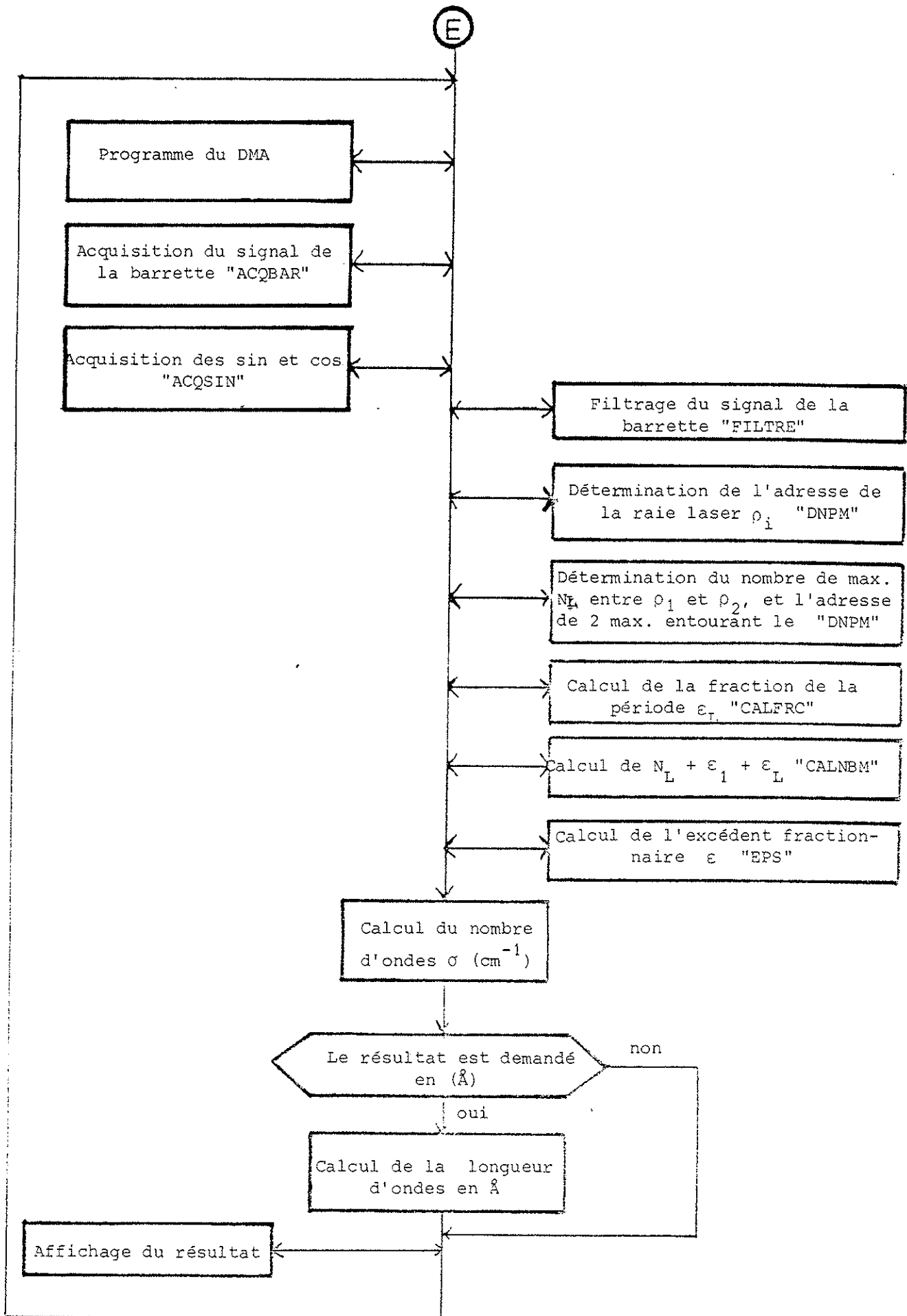


Figure 28 E

Mesures de la raie laser



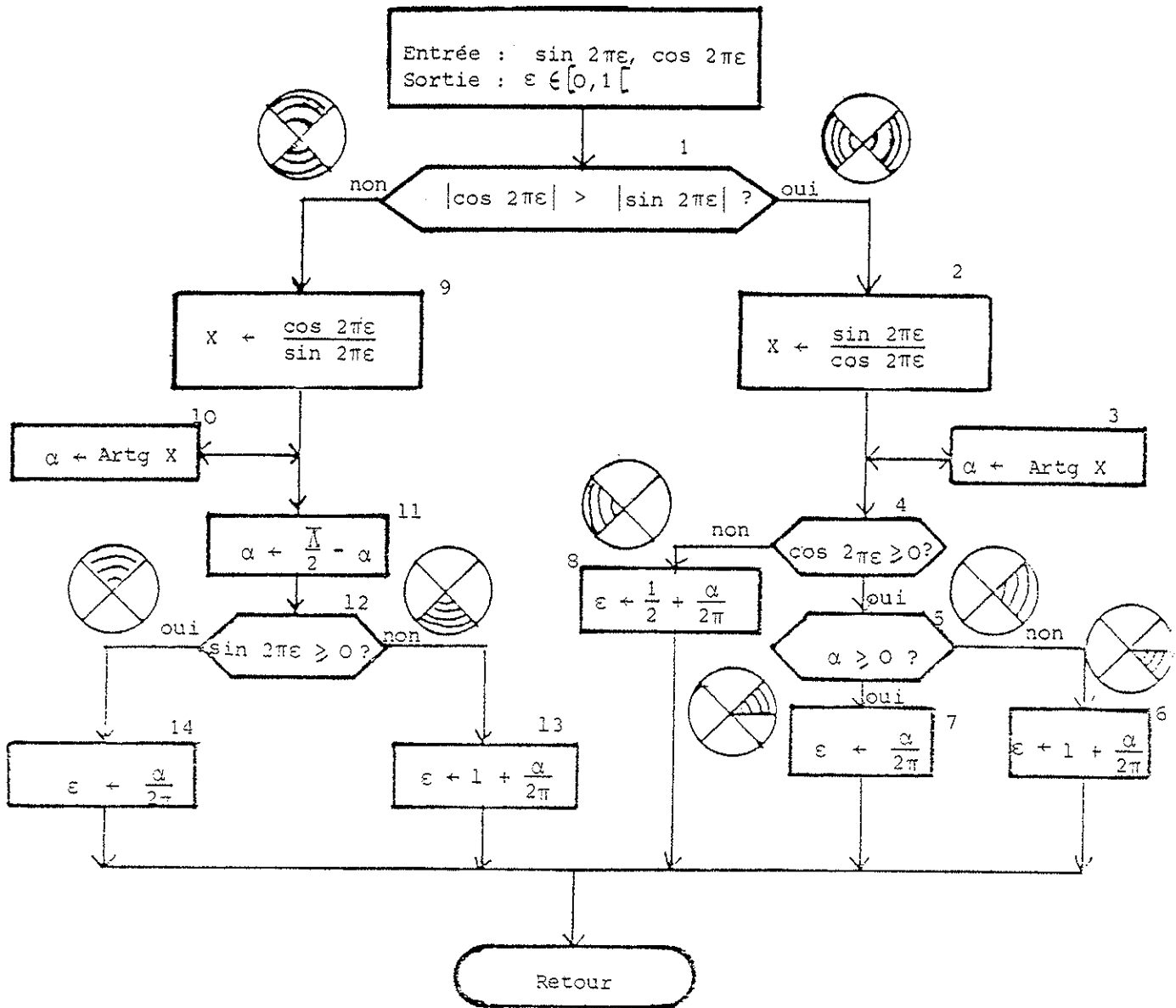


Figure 30

Calcul de l'excédent fractionnaire "EPS"

nombres binaires, alors que les opérations arithmétiques sont programmées en nombres DCB.

Sur la figure 31, nous trouvons l'organigramme de ce SP.





CHAPITRE VI

RESULTATS EXPERIMENTAUX



## VI - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous présentons dans ce chapitre quelques expériences qui ont permis de tester les propriétés de l'instrument. Dans ce but, nous lui avons envoyé d'une part le faisceau d'une source laser continue et, d'autre part celui d'une source fonctionnant en impulsion.

### A. EXPERIENCE FAITE AVEC UNE SOURCE CONTINUE

Cette source, dont la fréquence est parfaitement connue à la précision des mesure, a été soit un laser He-Ne fonctionnant à 611,8 nm, soit un laser à colorant monomode dont la fréquence a été calée sur l'une ou l'autre des raies de résonance  $D_1$  et  $D_2$  d'une lampe à sodium. Ce calage a été effectué de façon assez précise en observant la fluorescence émise par la lampe chaude mais éteinte lorsque la fréquence du laser est parfaitement accordée.

Nous avons ainsi pu observer que la longueur d'onde du rayonnement laser mesurée à l'aide de notre appareil fluctue d'une mesure à l'autre autour de la valeur vraie sans cependant s'en écarter de plus de 0.03 Å. Il faut signaler que l'instrument n'était pas localement situé proche des sources (relativement encombrantes), ce qui imposait

le transport du faisceau sur des distances de 5 m et plus, apportant ainsi une source de fluctuation du signal supplémentaire. De toute façon, l'incertitude des mesures est, dans ce cas particulier, inférieure à  $0,1 \text{ cm}^{-1}$  limite que nous nous étions fixée .

#### B. EXPERIENCE EFFECTUEE A L'AIDE D'UNE SOURCE PULSEE

La source laser que nous avons utilisée fonctionnant en impulsions est une source monomode asservie et balayable. Sa fréquence, tout comme celle du laser continu, a été accordée sur l'une ou l'autre des transitions  $D_1$  et  $D_2$  du sodium. Nous avons observé que la précision des mesures est environ deux fois moins bonne ( $0,06$  à  $0,07 \text{ \AA}$ ) que celle obtenue avec les lasers fonctionnant en continu. Nous pouvons attribuer cette différence au fait que le rayonnement pulsé (qui est obtenu après amplification dans des cellules à colorant) est spatialement moins uniforme que le faisceau continu et que, de ce fait, les détecteurs sont plus sensibles à des micro-fluctuations de la position du faisceau. Ces fluctuations seraient certainement fortement réduites par l'utilisation d'une optique d'entrée utilisant une fibre optique placée au foyer d'un objectif.



CONCLUSION



## CONCLUSION

Nous avons réalisé un instrument de mesure absolue de nombre d'ondes de rayonnement laser, que celui-ci fonctionne en régime continu ou impulsionnel. Il est relativement simple d'emploi et, surtout, complètement autonome en ce qui concerne la calibration ; aussi, cet instrument devrait pouvoir être utilisé avec profit dans beaucoup d'expériences mettant en oeuvre des lasers à colorant accordables (en particulier des lasers fonctionnant en impulsion).

Comme tout appareil de ce type, il est évidemment susceptible de perfectionnement. Notamment, comme nous l'avons déjà signalé, une optique d'entrée à fibre optique permettrait d'accroître la stabilité des signaux, donc la précision des mesures. D'autre part, moyennant quelques modifications minimales, il pourrait être utilisé dans une boucle d'asservissement de laser, afin de le piloter en fréquence.

L'augmentation de la résolution par adjonction d'un second sigma-mètre est également envisageable. Cependant, cela le ferait changer de classe d'instruments. Il ferait partie des instruments qui nécessitent, pour leur calibration, une ou plusieurs raies de références, elles-mêmes stabilisées et qui sont, de ce fait, très délicats à utiliser.



REFERENCES

- {1} - J.L. HALL et S.A. LEE, App. Phys. Lett. 29, 367 (1976)
- J. CACHENAUT, C. MAN, P. CERESZ, A. BRILLET, F. STOECKEL, A. JOURDAN, et F. HARTMANN, Rev. de Phys. Appl. 14, 685 (1979)
- {2} - P. JUNCAR et J. PINARD, Opt. Commun. 14, 438 (1975)
- P. JUNCAR et J. PINARD, à paraître dans Rev. Sci. Instrum. 53, (7) Juil. (1982)
- {3} - R.L. BYER, J. PAUL et M.D. DUCAN, Laser Spect. III, Springer-Verl., 414 (1977)
- N. KONISHI, T. SUZUKI, Y. TAIRA, H. KOTO et T. KASUYA, Appl. Phys. 25, 311 (1981)
- {4} - J.J. SNYDER, Laser Spect. III, Springer Verl., 419 (1977)
- J.J. SNYDER, Proceedings of the Los Alamos Conference on Optics (1981)
- {5} P. JUNCAR, Thèse de 3ème cycle, Orsay (1976)
- {6} P. BOUSQUET, Spectroscopie Instrumentale, 188, Edition Dunod (1969)
- {7} M. ABRAMOURITZ et I.A. STEGUM, Handbook of Mathematical Functions, 81, Edition Dover (1970)



ANNEXE





```

00010 00001          NPA  MAND
00020 00002 0102    ORG  #0102
00030 00003          OFT   S
00040 20004          *****
00050 00005          *PROGRAMME DE TRAITEMENT ET DE
00060 00006          *CALCUL DE L'APPAREIL M.A.N.C.
00070 00007          *MESUREUR ABSOLU DE
00080 00008          *NOMBRE D'ONDES
00090 00009          *****
00100 00010          * DEFINITION DES ADRESSES
00110 00011          *****
00120 00012          *--ADRESSES DES REGISTRES
00130 00013          * DE PIA
00140 00014          0020  ORA  EQU  #0020
00150 00015          0026  DORA EQU  #0026
00160 00016          0021  ORA  EQU  #0021
00170 00017          0022  ORE  EQU  #0022
00180 00018          0022  ORB  EQU  #0022
00190 00019          0023  ORB  EQU  #0023
00200 00020          *---ADRESSES DES REGISTRES
00210 00021          * DE DMAC
00220 00022          0000  ARO  EQU  #0000
00230 00023          0001  OCO  EQU  #0001
00240 00024          0010  ORO  EQU  #0010
00250 00025          0004  AR1  EQU  #0004
00260 00026          0006  OC1  EQU  #0006
00270 00027          0011  OR1  EQU  #0011
00280 00028          0008  AR2  EQU  #0008
00290 00029          0008  OCE  EQU  #0008
00300 00030          0011  OR2  EQU  #0011
00310 00031          0014  PR  EQU  #0014
00320 00032          0015  ICF  EQU  #0015
00330 00033          0016  OCF  EQU  #0016
00340 00034          *---ADRESSES DES SF
00350 00035          *DES OPERATIONS MATH.
00360 00036          0990  FPADD EQU  #0990
00370 00037          0996  FPSUB EQU  #0996
00380 00038          0951  FPDIV EQU  #0951
00390 00039          0925  FPMUL EQU  #0925
00400 00040          090E  CPL100 EQU #090E
00410 00041          0803  RR25  EQU  #0803
00420 00042          0822  EXPOS1 EQU #0822
00430 00043          0690  SD10CT EQU #0690
00440 00044          *---ADRESSES DES DONNEES
00450 00045          0750  POINTM EQU #0750

```

00460 00046	0100	005	EQU	#0100
00470 00047	0101	SIN	EQU	#0101
00480 00048	0000	NODATA	EQU	#0000
00490 00049	FE00	CONST	EQU	#FE00
00500 00050	FE06	DEMI	EQU	#FE06
00510 00051	FE0C	UN	EQU	#FE0C
00520 00052	FE12	DEMIPI	EQU	#FE12
00530 00053	FE18	P1	EQU	#FE18
00540 00054	FE1E	DEUMP1	EQU	#FE1E
00550 00055	FE24	SIGLAS	EQU	#FE24
00560 00056	FE2A	SIGE	EQU	#FE2A
00570 00057	FE30	DELSIG	EQU	#FE30
00580 00058	FE36	PH10	EQU	#FE36
00590 00059	FE3C	SPECTR	EQU	#FE3C
00600 00060	FE44	SELANC	EQU	#FE44
00610 00061	FE4C	HENCON	EQU	#FE4C
00620 00062	FE54	LASER	EQU	#FE54
00630 00063	FE5C	KIRK	EQU	#FE5C
00640 00064		*ADRESSES DES MEMOIRES DE TRAVAIL		
00650 00065	0102	0006	MEMRA	RMB 6
00660 00066	0103	0006	IXE	RMB 6
00670 00067	010E	0006	RESUT	RMB 6
00680 00068	0114	0006	OP1	RMB 6
00690 00069	0116	0006	OP2	RMB 6
00700 00070	0120	0006	EPS1	RMB 6
00710 00071	0126	0006	EPS0	RMB 6
00720 00072	012C	0006	SIGMAS	RMB 6
00730 00073	013E	0006	DELTA0	RMB 6
00740 00074	013E	0006	SINIE	RMB 6
00750 00075	013E	0006	OSIN	RMB 6
00760 00076	0144	000E	MEMV	RMB 2
00770 00077	0146	000E	RAV	RMB 2
00780 00078	014E	0004	MEM	RMB 4
00790 00079	014C	0001	FLAG	RMB 1
00800 00080	0140	0001	FLAG1	RMB 1
00810 00081	014E	0001	ZERO	RMB 1
00820 00082	014F	0009	DIGIT	RMB 9
00830 00083	0153	000E	BARETE	RMB 6
00840 00084	015F	0004	ADRM1	RMB 4
00850 00085	015E	0004	ADRM2	RMB 4
00860 00086		*FONCTIONS DES ENTREES/SORTIES		
00870 00087		*FONCTIONS DES ENTREES/SORTIES		
00880 00088		*NOU PIR		
00890 00089		*ORA: DATA PRET (SIN ET COS)		
00900 00090		*P90 INIT. BASCULE		

```

00910 00091          *PA2 MODE CONTROLE (S/H)
00920 00092          *PA3 CONVER COMMANDE COS
00930 00093          *PA4 CONVER COMMANDE SIN
00940 00094          *PA5 COMMANDE DE LA FENTE
00950 00095          *PA6 CHOIX DE L'UNITE DU RESULTA
00960 00096          *PA7 CHOIX DU MODE DE FONCTIONNEMENT
00970 00097          *CA2 START BARETTE
00980 00098          *PB0 MODE CIRCUIT D'AFFICHAGE
00990 00099          *PE1 RELAI SOURCE BLANCHE
01000 00100          *PB2 RELAI SOURCE SPECTRALE H2
01010 00101          *PB3 RELAI LASER **-*
01020 00102          *CB2 ENTREE SPECTRO.
01030 00103          ****
01040 00104          *   LE PROGRAMME PRINCIPAL
01050 00105          ****
01060 00106          *   ETAPE A
01070 00107          ****
01080 00108          ORG          *FOCE
01090 00109          * POINTAGE DE LA PILE
01100 00110          * DU PROGRAMME
01110 00111          FOCE 100E 00F0          LDS          *#00F0
01120 00112          * PROGRAMMATION DU P16
01130 00113          F00E 00          LDD          *#E704
01140 00114          F00E FD          00E0          STD          *00E0          PORT A
01150 00115          F00E 00          FF04          LDD          *#FF04
01160 00116          F00E FD          00E2          STD          *00E2          PORT B
01170 00117          F00E 06          40          LDA          *#40
01180 00118          F00E 0E          00E0          BITA          *00E0          TESTE DE MODE DU
01190 00119          F00E 1E          60          F0E2          BNE          *MONITE
01200 00120          * BRANCHEMENT A L'ETAPE B
01210 00121          F0E2 7E          0904          JMP          *0904
01220 00122          * BRANCHEMENT AU MONITEUR
01230 00123          F0E2 7E          F040          MONITE JMP          *F040
01240 00124          ****
01250 00125          *   ETAPE B
01260 00126          ****
01270 00127          09E4          ORG          *09E4
01280 00128          09E9 02          0F0E          LDD          *#09E9
01290 00129          09E0 FD          000E          STD          *000E
01300 00130          09E9 0C          E000          LDD          *#E000
01310 00131          090E 00          0097          JSR          *MAC          PROG, *MAC
01320 00132          090E 0C          00E2          LDD          *#00E2
01330 00133          090C 0E          FE0C          LDD          *#FE0C
01340 00134          * AFFICHAGE DE "SPECTRE"
01350 00135          090B 00          DF7E          JSR          *AFFOIG

```

```

01360 00136 D9CE CC 085A          LDD  #085A  COMMANDE RELAIS
01370 00137                                *ATTENT DE "START ACC."
01380 00138 D9D1 BD 0846          JSR  INIT   CONTROLE PENTE
01390 00139                                * ACQUIL DU SIGNAL
01400 00140                                * DE LA BARRETTE
01410 00141 D9D4 BD 085A          JSR  AC08AP
01420 00142 D9D7 BE E000          LDX  #E000
01430 00143 D9DA CE 07E2          LDU  #POINTM
01440 00144 D9DD 108E 0800          LDY  #NE0DATA . FILTRAGE DES
01450 00145 D9E1 BD 089D          JSR  FILTRE  DONNEES
01460 00146 D9E4 7F 014C          CLR  FLAG
01470 00147 D9E7 BD 08C3          JSR  D9PM   D9PM AVEC L'OPT.
01480 00148                                * MEMORISATION DES ADRESSES
01490 00149                                * DES RAIES DE REFERENCE
01500 00150 D9EA FC 07E0          LDD  POINTM
01510 00151 D9ED FD 015A          STD  ADDR1
01520 00152 D9F0 FC 07E2          LDD  POINTM+2
01530 00153 D9F3 FD 015C          STD  ADDR1+2
01540 00154 D9F6 EC 5C          LDD  -4,U
01550 00155 D9F8 FD 015E          STD  ADDR2
01560 00156 D9FB EC 5E          LDD  -2,U
01570 00157 D9FD FD 0160          STD  ADDR2+2
01580 00158                                *****
01590 00159                                * ETAPE C
01600 00160                                *****
01610 00161 D900 CC E000          LDD  #E000
01620 00162 D903 BD 0C97          JSR  DMRC
01630 00163 D906 CC 085A          LDD  #085A
01640 00164 D909 CE FE4A          LDU  #SELANC
01650 00165 D90C BD 0A7A          JSR  AFF010
01660 00166 D90F CC FBFA          LDX  #FBFA  CONT.PENTE=1
01670 00167 D912 BD 0846          JSR  INIT
01680 00168 D915 BD 085A          JSR  AC08AP  ACC.DU SPECRE CR
01690 00169 D918 CE 07E0          LDU  #POINTM
01700 00170 D91B EE 015F          LDX  ADDR1
01710 00171 D91E 108E 0010          LDY  #10
01720 00172 D921 BD 08C3          JSR  D9PM
01730 00173 D924 BE 07E0          LDX  #POINTM
01740 00174 D927 CE 015F          LDU  #ADDR1
01750 00175 D92A BD 0A7A          JSR  CALARC  FRAC1---XOF2
01760 00176 D92E CE 011A          LDU  #OPE
01770 00177 D931 108E 0120          LDY  #EPS1
01780 00178 D934 BD 0CCE          JSR  TRF    -FRAC1---XEPS1
01790 00179 D937 7C 014C          INC  FLAG
01800 00180 D93A BE 07E0          LDX  POINTM

```

```

01818 00181 0A3E 30 01          LEAR 1,X
01820 00182 0A40 BF 0158        STA  BARETE  SAVE HDR.M1,1
01830 00183 0A43 FD 015E        LDC  #ORNE
01840 00184 0A46 63 07E8        SUBD POINTM
01850 00185 0A49 5C              INCB
01860 00186 0A4A 1F 02          TFR  D,Y
01870 00187 0A4C CE 07E8        LDU  #POINTM
01880 00188 0A4F 6D 0B03        JSR  DIRM
01890 00189 0A52 6E 07E8        LDY  #POINTM
01900 00190 0A55 CE 015E        LDU  #ORNE
01910 00191 0A58 6D 0F28        JSR  CALFR0  FRAC2---XOP2
01920 00192 0A5B 6E 011F        LDY  #OP2
01930 00193 0A5E 108E 0128       LDY  #EPS1
01940 00194 0A62 6D 0956        JSR  FPSUB  EPS1+EPS---XOP2
01950 00195                * CAL.DE #FRAC1+FRAC2
01960 00196 0A65 6D 0E3E        JSR  CALHEM
01970 00197                *****
01980 00198                *  ETAPE D
01990 00199                *****
02000 00200 0A68 00 F000        LDD  #F000
02010 00201 0A6B 6D 0C97        JSR  DMRC
02020 00202 0A6E 66 3C          LDH  #3C  FERRETURE DU
02030 00203 0A70 67 0820        STA  CRE  RELAI DU SPECTRO
02040 00204 0A73 00 0FBE        LDD  #0FBE
02050 00205 0A76 0E FE4C        LDU  #HEMION
02060 00206 0A79 6C 0F7F        JSR  AFFD1G
02070 00207 0A7C 00 0B0A        LDD  #0B0A
02080 00208 0A7F 6D 0E46        JSR  INIT
02090 00209 0A82 6C 0E5F        JSR  ROGBAF
02100 00210 0A85 6C 0B78        JSR  ROGB1N
02110 00211 0A88 6C 0075        JSR  EPS
02120 00212 0A8B 6D 0E88        JSR  DELTA
02130 00213 0A8E 00 0FBE        LDD  #0FBE
02140 00214 0A91 0E FE3A        LDU  #LASEF
02150 00215 0A94 6D 0F76        JSR  AFFD1G
02160 00216 0A97 00 0B0A        LDD  #0B0A
02170 00217 0A9A 6C 0E46        JSR  INIT
02180 00218 0A9D 10 EF          RNDCC #EF
02190 00219                *****
02200 00220                *  ETAPE E
02210 00221                *****
02220 00222 0A9F 00 F000        MESURE LDE  #F000
02230 00223 0AA2 6D 0C97        JSR  DMRC
02240 00224 0AA5 6C 0E5F        JSR  ROGBAF
02250 00225 0AA8 6D 0B78        JSR  ROGB1N

```

02260	00226	0A9B	0E	07E0	LDU	#POINTM	
02270	00227	0A9E	0E	F000	LDX	#F000	
02280	00228	0AB1	100E	0000	LDY	#NEDATA	
02290	00229	0AB5	0D	0000	JSR	FILTRE	
02300	00230	0AB8	7F	014C	CLR	FLAG	
02310	00231	0AB9	0D	00C0	JSR	DNFM	
02320	00232	0ABE	FC	07E0	LDD	POINTM	
02330	00233	0AC1	09	10	SUBA	#*10	
02340	00234	0AC3	FD	07E0	STD	POINTM	
02350	00235	0AC6	03	D158	SUB0	BARETE	
02360	00236	0AC9	5C		INCB		
02370	00237	0ACB	1F	02	TRF	0,Y	
02380	00238	0ADC	0E	D158	LDX	BARETE	
02390	00239	0ADF	0E	07E0	LDU	#POINTM+3	
02400	00240	0AD2	7C	014C	INC	FLAG	
02410	00241	0AD5	0D	00C0	JSR	DNFM	
02420	00242	0AD8	0E	07E0	LDX	#POINTM+3	
02430	00243	0ADB	0E	07E0	LDU	#POINTM	
02440	00244	0AD9	0C	0F20	JSR	CALFR0	FR02---X0F2
02450	00245	0AE1	0E	011A	LDX	#0F2	
02460	00246	0AE4	100E	0120	LDY	#0F01	
02470	00247	0AEB	0C	0996	JSR	FR01	FR01+FR02---X0F2
02480	00248	0AEE	0D	0600	JSR	CALHEM	
02490	00249	0AEE	0C	0075	JSR	EPS	
02500	00250	0AF1	0C	0E0F	JSR	SIGNR	
02510	00251	0AF4	06	00	LDR	#000	
02520	00252	0AF6	0E	0000	BITF	00F	
02530	00253	0AF9	27	05	BEQ	ANESTM	
02540	00254	0AFB	0E	010C	LDY	#SIGNR0	
02550	00255	0AFE	00	29	BRF	NEONDE	
02560	00256	0B00	06	0101	ANESTM	LDR	SIGNR0+5
02570	00257	0B03	00	00	SUBF	#0	
02580	00258	0B05	07	0101	STP	SIGNR0+5	
02590	00259	0B08	0E	F000	LDX	#0A	
02600	00260	0B0B	100E	0114	LDY	#0F1	
02610	00261	0B0F	0C	00CE	JSR	TRF	
02620	00262	0B16	0E	010C	LDU	#SIGNR0	
02630	00263	0B19	100E	011A	LDY	#0F2	
02640	00264	0B19	0C	00CE	JSR	TRF	
02650	00265	0B1C	0E	0114	LDX	#0F1	
02660	00266	0B1F	100E	010E	LDY	#RESULT	
02670	00267	0B23	0C	0901	JSR	FPDIV	
02680	00268	0B26	0E	010E	LDX	#RESULT	
02690	00269	0B29	0C	0F0E	NEONDE	LDD	#0F0E
02700	00270	0B2C	0E	014F	LDX	#0101T	

PAGE 007 MARC ,SA:1 MARC

```
02710 00271 002F 5D 0F4B JSP AFFICH
02720 00272 0032 7E 0A9F JNF MESURE
02730 00273
*****
02740 00274 * LES SOUS-PROGRAMMES
02750 00275 *****
02760 00276 *
02770 00277 * SP "ORLNER"
02780 00278 *****
02790 00279 0035 3E 0140 ORLNER LDX #NBK
02800 00280 0030 105E 0102 LDY #NBHMAX
02810 00281 0030 80 0EF5 JSP CONVER
02820 00282 003F 8E 0116 LDX #OP3
02830 00283 0042 8D 0960 JSR FPROD RESULTAT --->NBK
02840 00284 0045 39 RTS
02850 00285 * SP POUR "START NOC."
02860 00286 *****
02870 00287 0046 87 0020 INIT STA ORR
02880 00288 0049 26 0021 TSTB LDR ORR
02890 00289 004C 2D F8 004F BGE TSTB
02900 00290 004E 3E 7FFF LDX #7FFF
02910 00291 0051 00 1F REBOU LEAR -1,X
02920 00292 0053 12 NOP
02930 00293 0054 26 F8 0051 BNE REBOU
02940 00294 0056 F7 0020 STB ORR
02950 00295 0058 35 RTS
02960 00296 * SP "ROUBAR"
02970 00297 *****
02980 00298 005A 86 2C ROUBAR LDR #80C
02990 00299 005C 57 0021 STA ORR
03000 00300 005F 56 0020 LDR ORR START BARRETE
03010 00301 0062 1E NOP
03020 00302 0063 26 0010 BOUCLE LDR ORR
03030 00303 0066 04 80 ANDR #80
03040 00304 0068 27 F9 0063 BEQ BOUCLE
03050 00305 006A 26 04 LDR #4
03060 00306 006C 57 0021 STA ORR
03070 00307 006F 34 RTS
03080 00308 ( *ACQUISITION DE SIN ET COS
03090 00309 *COMMANDE DES E-8
03100 00310 0070 86 86 HOESIN LDR #8E
03110 00311 0073 57 0020 STA ORR FRE=1
03120 00312 0075 1E NOP
03130 00313 0076 86 8E LDR #8E
03140 00314 0078 57 0020 STA ORR END OF PULSE
03150 00315 *CONVER COMMANDE COS
```

```

03160 00316 0878 7F 0921      CLR   ORR
03170 00317 087E 86 2F      LDA   #2F   PPA=0 OUT
03180 00318 0880 87 0920      STA   DORA   STAR OF PULSE
03190 00319 0882 86 27      LDA   #27   PPA=1 IN
03200 00320 0885 87 0920      STA   DORA   END OF PULSE
03210 00321 0888 1E      NOP
03220 00322 0889 86 0911      BCLR  LDA   CR1
03230 00323 088C 84 80      ANDA  #80
03240 00324 088E 27 F9 0899      BEQ   B09
03250 00325 0890 86 14      LDA   #80   DELAI=(A)*5 Micr
03260 00326 0892 4F      DELAI  DECR
03270 00327 0893 26 FD 089E      BNE   DELAI
03280 00328      *CONVER COMMANDE SIN
03290 00329 0895 86 37      LDA   #37   PPA=0 OUT
03300 00330 0897 87 0920      STA   DORA   START PULSE
03310 00331 0899 86 27      LDA   #27   PPA=1 IN
03320 00332 089C 87 0920      STA   DORA   END OF PULSE
03330 00333 089F 12      NOP
03340 00334 08A0 86 091E      BCLR  LDA   CR2
03350 00335 08A3 84 80      ANDA  #80
03360 00336 08A5 27 F9 08A8      BEQ   B02E
03370 00337 08A7 86 84      LDA   #4
03380 00338 08A9 87 0921      STA   ORR
03390 00339 08AC 3E      RTS
03400 00340      * SF "FILTRE"
03410 00341      *-----*
03420 00342 08AD 34 3C      FILTRE  PSKE  X,Y
03430 00343 08AF 86 37      TOTO   LDA   #7
03440 00344 08B1 31 3F      LEAY  -1,Y
03450 00345 08B3 27 8C 08D1      BEQ   TIT1
03460 00346 08B5 60 88      TST   #4
03470 00347 08B7 2D F6 08BF      BLT   TOTO
03480 00348 08B9 A0 1F      SUBR  -1,X
03490 00349 08BB 3D FE 08BF      BLT   TOTO
03500 00350 08BD 6F 1F      CLR  -1,X
03510 00351 08BF 20 EE 08BF      BRG   TOTO
03520 00352 08C1 35 8E      TIT1   PULS  X,Y,PC
03530 00353      * SF "MAX"
03540 00354      * CE SF PERMET DE CALCULER LE NB. DE
03550 00355      *MAX,ET LEURE POSITIONS.
03560 00356      *CE SF PSEUDE DEUX OPTION:
03570 00357      *OPTION"0":DETERMINATION DES POSITIONS
03580 00358      *      DE TOUTE LES MAX.
03590 00359      *OPTION"1":COMPTAGE DES MAX ET
03600 00360      *      DETERMINATION DES POSITIONS

```



```

00610 00361 *      DES 3 DERNIERS MAX.
00620 00362 *      POUR APPELER CE PROGRAMME IL FAUT:
00630 00363 *      -METTRE L ADRESSE DE LA PREMIERE
00640 00364 *      DONNEE DANS "X"
00650 00365 *      -METTRE LE NOMBRE DES DONNEES DANS Y
00660 00366 *      -POINTER USUR ; ZONE VIDE DU MEMOIRE
00670 00367 *      -RESERVER 1 OCTET POUR "FLAG",1 OCTET
00680 00368 *      POUR "NBMAX",DEUX OCTETS POUR "NBV"
00690 00369 *      -METTRE "1" DANS "FLAG" OPTION"1",
00700 00370 *      "0" POUR OPT0
00710 00371 *      EN SORTIE NOUS AVONS POUR L OPTION
00720 00372 *      "1" ,LE NOMBRE MAXIMUM DANS "NBMAX"
00730 00373 *      ,LES ADRESSES DE 2 DERNIERS MAX
00740 00374 *      A PARTIR DE L'ADRESSE OU' NOUS
00750 00375 *      AVONS POINTER "U"
00760 00376 *      "0" ,LE NOMBRE DE MAX DANS "NBMAX"
00770 00377 *      ,L ADRESSE DE DERNIER MAXIMUM
00780 00378 *      DANS "NBMAX"
00790 00379 *****

```

00800	00380	0B03	7F	0144	DNPH	CLR	NBMAX
00810	00381	0B06	7F	0145		CLR	NBMAX-1
00820	00	0B09	86	00	FE	LDR	X
00830	00130	0B0B	81	3F		LEA	-1,Y
00840	00384	0B0D	87	3E	0EFA	BDF	SUITES
00850	00385	0B0F	80	04		SUBR	X
00860	00386	0B11	2A	F6	0E08	B0C	FE
00870	00387	0B13	86	00	ETA1	LDR	X
00880	00388	0B15	81	3F		LEA	-1,Y
00890	00389	0B17	87	01	0EFA	B0C	SUITES
00900	00390	0B19	80	04		SUBR	X
00910	00391	0B1B	86	04	0B01	BNE	B0X
00920	00392	0B1D	86	04		LDR	X
00930	00393	0B1F	80	01		SUBR	1,Y
00940	00394	0B21	25	F0	0B08	B0X	ETA1
00950	00395	0B23	84	10		REHE	Y
00960	00396	0B25	8E	0144		LDR	NBMAX
00970	00397	0B27	80	01		LEA	1,Y
00980	00398	0B29	8F	0144		STX	NBMAX
00990	00399	0B2B	8E	10		PALE	X
04000	00400	0B2F	7C	014C		TEST	FLAG
04010	00401	0B31	27	29	0C10	BEG	OPT0
04020	00402	0B33	8F	014C		STX	NBMAX
04030	00403	0B35	7E	0C09		JMP	FE
04040	00404	0B37	71	014C	SUITES	TEST	FLAG
04050	00405	0B39	23	01	0C08	BNE	SUITES

04060	00406	DEFF	39		FIN	RTS	
04070	00407	DC00	BE	D146	SUITEE	LDY	NEW
04080	00408	DC03	36	1E		LEAX	-2,X
04090	00409	DC05	FC	D144		LDD	NEWX
04100	00410	DC06	FD	D148		STD	NEW
04110	00411	DC08	CC	FFFE		LDD	#FFFFE
04120	00412	DC0E	FD	D144		STD	NEWY
04130	00413	DC11	7F	D14C		CLR	FLAG
04140	00414	DC14	100E	0019		LDY	#DE
04150	00415	DC18	8D	DB09		JSR	RE
04160	00416	DC1B	39			RTS	
04170	00417	DC1C	34	60	OFT2	PSHS	Y,U
04180	00418	DC1E	7F	D14D		CLR	FLAG1
04190	00419	DC21	E6	84		LDB	X
04200	00420	DC23	100E	D10E		LDY	#RESUB
04210	00421	DC27	8D	DF90		JSR	FORMAT
04220	00422	DC2F	E6	1F		LDB	-1,X
04230	00423	DC2D	31	26		LEAY	6,Y
04240	00424	DC2E	8D	DF90		JSR	FORMAT
04250	00425	DC31	E6	1E		LDB	-2,X
04260	00426	DC33	31	26		LEAY	6,Y
04270	00427	DC3F	8D	DF90		JSR	FORMAT
04280	00428	DC3C	34	18		PSHS	X
04290	00429	DC3F	1F	21		TRF	X,X
04300	00430	DC3C	31	26		LEAY	-6,Y
04310	00431	DC3E	8D	DF90		JSR	FRSUB
04320	00432	DC41	36	14		LEAX	-10,X
04330	00433	DC43	8D	DF90		JSR	FRSUB
04340	00434	DC43	1F	13		TRF	X,X
04350	00435	DC43	8D	DF90		JSR	TRF
04360	00436	DC4E	1F	E1		TRF	Y,X
04370	00437	DC4C	31	26		LEAY	6,Y
04380	00438	DC4F	8D	DF90		JSR	FRSUB
04390	00439	DC51	36	34		LEAX	-10,Y
04400	00440	DC54	8D	DF90		JSR	FRSUB
04410	00441	DC5F	1F	10		TRF	X,X
04420	00442	DC5F	36	6C		LEAX	6,X
04430	00443	DC5E	8D	DF90		JSR	FRSUB
04441	00444	DC5E	3E	FE06		LDD	#DE01
04450	00445	DC61	1F	12		TRF	X,X
04460	00446	DC63	8D	DF90		JSR	TRF
04470	00447	DC66	100E	D118		LDY	#0FE
04480	00448	DC6A	36	18		LEAX	-6,X
04490	00449	DC6D	8D	DF90		JSR	FRSUB
04500	00450	DC6F	1F	23		TRF	Y,U

```

04510 00451 0071 A6 45          LDA 5,U
04520 00452 0073 40          NEGR
04530 00453 0074 27 00 0079    BER 555
04540 00454 0076 B0 0022      JSR EXPC1
04550 00455 0079 35 70      555 PULS Y,U,X
04560 00456 0078 30 1F      LERX -1,X
04570 00457 0070 AF 01      STX U++
04580 00458 007F 30 01      LERX 1,X
04590 00459 0081 FC 011R     LDC OP2
04600 00460 0084 ED 01      STD U++
04610 00461 0086 7D 0144     TST NEMX
04620 00462 0089 27 00 008E   BED ++5
04630 00463 0086 7E 00C9     JMP P2
04640 00464 008E 7D 0145     TST NEMX+1
04650 00465 0091 27 00 0096   BED ++5
04660 00466 0093 7E 00C9     JMP P2
04670 00467 0096 39          RTS
04680 00468          * SP "DNRC"
04690 00469          XXXXXXXXXXXX
04700 00470 0097 FD 0000     DNRC STD ARR
04710 00471 0098 86 02          LDA #2
04720 00472 009C 57 0010     STR CR0
04730 00473 009F 57 0011     STR CR1
04740 00474 00A2 57 0012     STR CR2
04750 00475 00A5 86 07          LDA #7
04760 00476 00A7 57 0014     STR PR
04770 00477 00A6 7F 0013     CLR 1CF
04780 00478 00A1 86 00          LDA #0
04790 00479 00A7 57 0016     STR 1CF
04800 00480 00B2 CC 0100     LDC #00E
04810 00481 00B5 FD 0004     STD ARR
04820 00482 00B8 0C 0101     LDC #01H
04830 00483 00B5 FD 0005     STD ARR
04840 00484 00B2 CC 0000     LDC #000TF
04850 00485 00C1 FD 0002     STD 002
04860 00486 00C4 0C 0001     LDC #1
04870 00487 00C7 FD 0006     STD 001
04880 00488 00C6 FD 0006     STD 00E
04890 00489 00C0 35          RTS
04900 00490          * SOUS PROGRAMME TRF
04910 00491          * CE SP PERMET DE
04920 00492          * TRANSFERER 6 OCTETS
04930 00493          * D'UNE ZONE A UNE AUTRE
04940 00494          XXXXXXXXXXXX
04950 00495 00CE EC 04      TRF LDC U

```

```

04960 00496 D000 ED R4          STD  Y
04970 00497 D002 ED 42          LD0  E,U
04980 00498 D004 ED 22          STD  E,Y
04990 00499 D006 ED 44          LD0  4,U
05000 00500 D008 ED 24          STD  4,Y
05010 00501 D00A 09              RTS
05020 00502                      * SP POUR CALCULER LA
05030 00503                      * VALEUR ENTIERE D'UN NOMBRE EN VF
05040 00504                      ~~~~~
05050 00505 D00E DC 0000          CDVENT LD0 #9
05060 00506 D00E 60 25          TST  5,Y
05070 00507 D0E0 2F 00 D0E0      BLE  LOOP0
05080 00508 D0E2 E0 25          SUB0  5,Y
05090 00509 D0E4 2F 10 D0F6      BLE  FINE
05100 00510 D0E6 1F 01          TFR  D,X
05110 00511 D0E8 1F 20          TFR  Y,U
05120 00512 D0EA 60 25          LOOP0 INC  5,Y
05130 00513 D0EC 60 0000        JER  501067
05140 00514 D0EE 00 1F          LEAR  -1,Y
05150 00515 D0F0 26 F7 D0EA      BNE  LOOP0
05160 00516 D0F2 60 0001        JER  50061
05170 00517 D0F4 09              FINE  RTS
05180 00518                      *SOUZ-PROGRAMME 50NB00
05190 00519                      *CE PROGRAMME CONVERTIT UN NE
05200 00520                      *1025500 00520                      *000 50NB00
05210 00521                      *EN 5-DIGITE 800
05220 00522                      *RC, D*=VAL, BIN,
05230 00523                      *P"Y" ----> ZONE RESULTAT
05240 00524                      ~~~~~
05250 00525 D0F7 04 76          50NB00 PSHE A,B,X,Y,U
05260 00526 D0F9 00 60 215F      LEAR  #100,PC
05270 00527 D0FD 0E 0001          LD0  #1
05280 00528 D000 6F 04          0*DEC1 CLP  0,Y
05290 00529 D002 60 04          0*DEC2 SUEC 0,Y
05300 00530 D004 25 04 000F      505  0*DEC3
05310 00531 D006 60 04          INC  0,Y
05320 00532 D008 20 F0 000E      BRA  0*DEC2
05330 00533 D00A E0 01          0*DEC5 400  ,X--
05340 00534 D00C 1000 0001        CMPU  #1
05350 00535 D010 26 0A 0010      BNE  DECAL
05360 00536 D012 00 0F          LEAR  -1,Y
05370 00537 D014 01 01          LEAR  1,Y
05380 00538 D016 60 04          TST  0,X
05390 00539 D018 2F E1 0000      BFL  0*DEC1
05400 00540 D01A 05 F6          RUL0  A,B,X,Y,U,PC

```

```

05410 00541 0010 30 41      DECR  LEAR  1,U
05420 00542 001E 34 06          PSHS  0
05430 00543 0020 06 04          LDA   #4
05440 00544 0022 68 A4          LSI   LSL  0,Y
05450 00545 0024 4R          DECR
05460 00546 0025 26 FB 0022     BNE   LSL
05470 00547 0027 35 06          PULS  0
05480 00548 0029 20 D7 0002     BRA   CVDEC2
05490 00549                      * SP "ARCTAN"
05500 00550                      * ARC TANG.(X)=X/(1+.25*X**2)+e(X)
05510 00551                      * POUR X COMPRIS ENTRE -1 ET +1
05520 00552                      * Ie(X)X(.005
05530 00553                      * POUR L'UTILISER, ON CHARGE X DANS I
05540 00554                      * "IHE", LE RESULTAT ET DANS
05550 00555                      * "EPS"
05560 00556                      ****
05570 00557 002B 0E 0100     ARCTAN LDU  #IHE
05580 00558 002E 100E 0114     LDY  #OP1
05590 00559 0032 50 000E     JSR  TRF
05600 00560 003F 100C 011R     LDY  #OP2
05610 00561 003F 50 000E     JSR  TRF
05620 00562 003C 8E 0114     LDY  #OP1
05630 00563 003F 100E 010E     LDY  #RESULT
05640 00564 0040 50 092F     JSR  FMUL  0.25*X**2
05650 00565 0046 0E FE20     LDU  #CONST
05660 00566 004F 100E 0114     LDY  #OP1
05670 00567 004D 50 000E     JSR  TRF
05680 00568 0050 0E 010E     LDU  #RESULT
05690 00569 0051 100E 011R     LDY  #OP2
05700 00570 0057 50 000E     JSR  TRF
05710 00571 005R 8E 0114     LDY  #OP1
05720 00572 005B 100E 010E     LDY  #RESULT
05730 00573 0061 50 092F     JSR  FMUL  .25*X**2
05740 00574 0064 8E FE20     LDY  #UN
05750 00575 0067 50 0960     JSR  FPRD  1+.25*X**2
05760 00576 006A 8E 0100     LDY  #IHE
05770 00577 006D 100E 0126     LDY  #EPS
05780 00578 0071 50 09F1     JSR  FPR1
05790 00579 0074 3F          RTS
05800 00580                      *Le programme EPS calcule la fraction
05810 00581                      *a partir de deux quantites :
05820 00582                      * A=COS(DELTA)*EPS)
05830 00583                      * B=SIN(DELTA)*EPS)
05840 00584 0075 100E 0100     EPS  LDY  #STAVE
05850 00585 0079 F6 0101     LDB  SIN

```

```

05860 00586 D070 B0 DF80      JSR   CONVCO
05870 00587 D07F 109E D13E      LDY   #COSIN      ;>
05880 00588 D083 F6 D100      LDB   COS
05890 00589 D086 B0 DF80      JSR   CONVCO
05900 00590 D089 1F 23      TFR   Y,U
05910 00591 D08B 109E D114      LDY   #OP1
05920 00592 D08F B0 D0CE      JSR   TRF        COSIN ----> OP1
05930 00593 D092 33 5A      LEAR  -6,U
05940 00594 D094 31 26      LEAY  6,Y
05950 00595 D096 B0 D0CE      JSR   TRF        SINUS ----> OP2
05960 00596 D099 7D D101      TST   SIN
05970 00597 D09C 1F 23      TFR   Y,U
05980 00598 D09E 2B 83 D0F3      BMI   SIMPLS
05990 00599 D0A0 B0 D83E      JSR   CPL100
06000 00600 D0A3 7D D120      SIMPLS TST   COS
06010 00601 D0A6 2B 86 D0F6      BMI   COSPLS
06020 00602 D0A8 CE D114      LDY   #OP1
06030 00603 D0AB B0 D83E      JSR   CPL100
06040 00604 D0AD 8E D114      COSPLS LDY   #OP1
06050 00605 D0B1 B0 0996      JSR   FPSUB     ABS(COE-SIN)
06060 00606 D0B4 7D D114      TST   OP1
06070 00607 D0B7 20 2B D0E4      BGE   PLUS     BRANCHE SI +,2
06080 00608 D0B9 1F 1E      TFR   Y,Y
06090 00609 D0BB CE D13E      LDY   #COSIN
06100 00610 D0BE B0 D0CE      JSR   TRF        COSIN ----> OP1
06110 00611 D0C1 33 5A      LEAR  -6,U
06120 00612 D0C3 31 26      LEAY  6,Y
06130 00613 D0C5 B0 D0CE      JSR   TRF
06140 00614 D0C8 109E D100      LDY   #IXE
06150 00615 D0CC B0 09E1      JSR   FRCIN     COS/SIN ----> IXE
06160 00616 D0CF B0 00E8      JSR   ARCTAN   ARC ----> EPS0
06170 00617 D0D2 8E FE1E      LDY   #DEMIPI1
06180 00618 D0D5 1F 23      TFR   Y,U
06190 00619 D0D7 B0 083E      JSR   CPL100
06200 00620 D0DA B0 099C      JSR   FFRAC    PI/2-EPS0---->IXE
06210 00621 D0DD 7D D181      TST   SIN
06220 00622 D0E2 2E 1F D0FC      BMI   ST0
06230 00623 D0E5 20 1E D0F3      BRP   ST1
06240 00624 D0E8 8E D13E      PLUS  LDY   #SINUS
06250 00625 D0EB 109E D100      LDY   #IXE
06260 00626 D0EE B0 09E1      JSR   FRCIN     SIN/COS ----> IXE
06270 00627 D0F1 B0 00E8      JSR   ARCTAN   ARC ----> EPS0
06280 00628 D0F4 7D D100      TST   COS
06290 00629 D0F7 2E 41 D0E7      BMI   ST2     COS=0
06300 00630 D0FA 8E FE1E      LDY   #PI

```

HNCE 015 NANO .SR:1 NANC

```
06310 00631 00F9 8D 098D JSR FPR00
06320 00632 00FC 0E FE1E ST0 LDU #DEUMFI
06330 00633 00FF 108E 011A LDY #0F2
06340 00634 0E03 8D 0CCE JSR TRF
06350 00635 0E06 0E 0126 LDU #EP50
06360 00636 0E09 31 3A LEAY -6,Y
06370 00637 0E0B 8D 0CCE JSR TRF
06380 00638 0E0E 1F 21 TFR Y,X
06390 00639 0E10 1F 32 TFR U,Y
06400 00640 0E12 8D 0951 JSR FPDIV EP50/2P1---XEP50
06410 00641 0E15 8D 0838 JSR CPL100
06420 00642 0E18 34 60 PSHS Y,U
06430 00643 0E1A 0E FE3C LDU #PH10
06440 00644 0E1D 108E 0100 LDY #1XE
06450 00645 0E21 8D 0CCE JSR TRF
06460 00646 0E24 1F 21 TFR Y,X
06470 00647 0E26 35 60 PULS Y,U
06480 00648 0E28 8D 0980 JSR FPR00
06490 00649 0E2B 7D 0126 TBT EP50
06500 00650 0E2E 20 06 0E36 BGE RTS0
06510 00651 0E30 8E FE8C LDX #UN
06520 00652 0E33 8D 0980 JSR FPR00
06530 00653 0E36 39 RTS0 RTS
06540 00654 0E37 7D 0126 STZ TBT EP50
06550 00655 0E3A 20 00 00FC BGE ST0
06560 00656 0E3C 8E FE1E LDX #DEUMFI
06570 00657 0E3F 108E 0126 LDY #EP50
06580 00658 0E41 8D 0980 JSR FPR00
06590 00659 0E44 30 54 00FC BRR ST0
06600 00660 * SP "NETOUR"
06610 00661 * IL PERMET DE DETERMINEP
06620 00662 * L'ORDRE D'INTERFERENCE
06630 00663 *****
06640 00664 0E48 108E 0114 NETOUR LDY #OP1
06650 00665 0E4C 8D 0CCE JSR TRF SIG ---1 OP1
06660 00666 0E4F 1F 21 TFR Y,X
06670 00667 0E51 0E 0132 LDU #DELTA0
06680 00668 0E54 31 36 LEAY 6,Y
06690 00669 0E58 8D 0CCE JSR TRF DELTA ---) OP2
06700 00670 0E5B 108E 0100 LDY #RESUT
06710 00671 0E5E 8D 0925 JSR FPNUL SIG*DELTA---)RES
06720 00672 0E60 1F 21 TFR Y,X
06730 00673 0E62 108E 0126 LDY #EP50
06740 00674 0E66 8D 0956 JSR FFSUB
06750 00675 0E69 0E FE86 LDU #DEMT
```

```

06760 00676 DE6C 100E 0114      LDY  #OP1
06770 00677 DE70 80 000E      JSR  TRF
06780 00678 DE73 80 0900      JSR  FPR00
06790 00679 DE76 80 000E      JSR  CONVNT
06800 00680 DE79 8E 010E      LDW  #EPS6
06810 00681 DE7C 80 0900      JSR  FPR00
06820 00682 DE7F 39          RTS
06830 00683      * SP "DELTA"
06840 00684      * De SP calcul la difference de marche
06850 00685      *de l'interferometre
06860 00686      *Les donnees sont:IN+EPS'
06870 00687      *
06880 00688      *          SIGMA1,SIGMA2,SIGMA3
06890 00689      *****
06900 00690 DE80 8E 010E      DELTA LDW  #NEMAX
06910 00691 DE83 0E FE00      LDW  #DELSIG
06920 00692 DE86 100E 010E      LDY  #IXE
06930 00693 DE89 80 000E      JSR  TRF
06940 00694 DE8C 100E 010E      LDY  #DELTA0
06950 00695 DE8F 80 0901      JSR  FPR01  N+EPS'+SIG2-SIG1
06960 00696 DE94 0E FE04      LDW  #SIGLAE
06970 00697 DE97 80 0E46      JSR  NETOUP
06980 00698 DE9A 0E FE04      LDW  #SIGLAE
06990 00699 DE9E 100E 0114      LDY  #OPE
07000 00700 DEA1 80 000E      JSR  TRF
07010 00701 DE94 8E 0114      LDW  #OP1
07020 00702 DE97 100E 010E      LDY  #DELTA0
07030 00703 DE9A 80 0901      JSR  FPR01
07040 00704 DE9E 39          RTS
07050 00705      * SP "SIGMA"
07060 00706      *Le programme SIGMA calcul le nombre
07070 00707      *de zones (NEMAX)
07080 00708      *Les donnees sont: NEMAX,DELTA0
07090 00709      *
07100 00710      *          EPS1,SIGMA1
07110 00711 DEAF 0E 010E      SIGMA LDW  #NEMAX
07120 00712 DEB2 100E 0114      LDY  #OP1
07130 00713 DEB6 80 000E      JSR  TRF
07140 00714 DEB9 0E 010E      LDW  #DELTA0
07150 00715 DEBC 31 24          LEAX 6,"
07160 00716 DEBE 80 000E      JSR  TRF
07170 00717 DEC1 8E 0114      LDW  #OP1
07180 00718 DEC4 100E 010E      LDY  #SIGMA0
07190 00719 DEC8 80 0901      JSR  FPR01
07200 00720 DEC9 0E 010E      LDW  #SIGMA0

```



```

07210 00721 DEDE B0 0638 JSR CPL100
07220 00722 DED1 8E FE2A LDX #SIG2
07230 00723 DED4 109E D12C LDY #SIGNAD
07240 00724 DED6 B0 0990 JSR FFRAD0
07250 00725 DED8 1F 21 TFR Y,X
07260 00726 DED0 B0 0E49 JSR NETOUR
07270 00727 DEE0 0E D13E LDU #DELTA0
07280 00728 DEE3 109E D11A LDY #OP2
07290 00729 DEE7 B0 0C0E JSR TRF
07300 00730 DEEA 8E D114 LDX #OP1
07310 00731 DEED 109E D12C LDY #SIGNA0
07320 00732 DEF1 B0 0951 JSR FFD1V
07330 00733 DEF4 39 RTS
07340 00734 * SP "CONVER" POUR
07350 00735 *REPRÉSENTER LES ADRESSES
07360 00736 *DES MAR EN VIRG.FLOT.
07370 00737 *INF: "X" POINTE L'ADRESSE
07380 00738 * "Y" POINTE LA DESTINATION
07390 00739 DEF5 34 50 CONVER PS45 X,U
07400 00740 DEF7 E0 24 LDD X
07410 00741 DEF9 B0 0CF7 JSR BINB00
07420 00742 DEFC 02 0600 LDD #0
07430 00743 DEFF E2 33 STD 3,Y
07440 00744 DF01 F0 0100 STD 1XE+2
07450 00745 DF04 F0 0100 STD 1XE+4
07460 00746 DF07 F0 0140 STD NEM+2
07470 00747 DF0F 86 65 LDA #5
07480 00748 DF20 A7 25 STR 5,Y
07490 00749 DF2E EC 02 LDD 2,Y
07500 00750 DF10 F0 0100 STD 1XC
07510 00751 DF13 8E 0100 LDX #1XC
07520 00752 DF16 1F 13 TFR X,U
07530 00753 DF18 B0 0800 JSR CPL100
07540 00754 DF1B B0 0990 JSR FFRAD0
07550 00755 DF1E 2F 00 PALS X,U,PC
07560 00756 * SP "ORLFR0"
07570 00757 *ORLFR0 LDY #OP2 RE,1 ---XOF2
07580 00758 DF26 109E D11A ORLFR0 LDY #OP2 RE,1 ---XOF2
07590 00759 DF24 B0 0EF5 JSR CONVER
07600 00760 DF27 36 04 LEARL 4,X
07610 00761 DF29 31 3F LEARL -5,Y
07620 00762 DF2B B0 0EF5 JSR CONVER
07630 00763 DF2E 1F 31 TFR U,X RE---X
07640 00764 DF30 109E D10E LDU #RESULT
07650 00765 DF34 B0 0EF5 JSR CONVER REE---RESULT

```

```

07660 00766 DF57 8E D114      LDW  #0P1
07670 00767 DF58 106E D118      LDY  #0P2
07680 00768 DF5E 8D D996      JSR  FPSUB  M2,2 -M2,1---XOP
07690 00769 DF41 8E D10E      LDW  #RESULT
07700 00770 DF44 8D D996      JSR  FPSUB  M2-ME,1---XRESU
07710 00771 DF47 8D D951      JSR  FPDIY  EPS---XOP2
07720 00772 DF4A 29          RTS
07730 00773          * SP "AFFICH"
07740 00774          *REGISTRE D CONTIENT BITS CONTROL
07750 00775          *POINTER "W" SUR LES DATA FORMAT FPBCO
07760 00776          *POINTER "U" SUR LE TABLEAU DIGIT"
07770 00777          *FORMAT 0.X1,X2X3,X4X5,X6X7,X8X9,EXP
07780 00778 DF4B 34 06      AFFICH PSHS  D      SAVE "D"
07790 00779 DF4D A6 82      LDA  ,A+      OCTPP---JA
07800 00780 DF4F 8A 00      ORA  #A00
07810 00781 DF51 A7 00      STA  ,U+
07820 00782 DF53 106E 0004      LDY  #4
07830 00783 DF57 A6 84      LOOP LDA  ,X
07840 00784 DF59 E6 80      LDE  ,X+
07850 00785 DF5B 84 8F      ANDB #B0F
07860 00786 DF5D 54          LSRE
07870 00787 DF5E 54          LSRS
07880 00788 DF5F 54          LSRE
07890 00789 DF60 54          LSRE
07900 00790 DF61 8F 80      ORA  #B00
07910 00791 DF63 0A 80      ORB  #B00
07920 00792 DF65 E7 08      STB  ,U+
07930 00793 DF67 A7 08      STA  ,U+
07940 00794 DF69 31 8F      LERY  -1,Y
07950 00795 DF6B 66 8F      ENC  LOOP
07960 00796 DF6D 33 87      LERU  -9,U
07970 00797 DF6F A6 84      LDA  ,X
07980 00798 DF71 4E          DECF
07990 00799 DF72 E6 06      LDE  A,U
08000 00800 DF74 04 7F      ANDB #B7F
08010 00801 DF76 E7 06      STB  A,U
08020 00802 DF78 3E 0E          PULS  0
08030 00803          * ENTREE DE SP "AFFICH"
08040 00804          * POUR AFFICHER
08050 00805          *R DIGIT POINTER PAR U
08060 00806          *"D" CONTIENT BITS CONTROL
08070 00807 DF79 87 08E2      AFFICH STA  ORB  START OF PULSE *
08080 00808 DF7B 87 08E2      STB  ORB  ORB  END OF PULSE
08090 00809 DF7D 06 0E          LDE  #8  AFFICH. DE 8 DIG
08100 00810 DF7E 33 45          LERU  S,U

```

```

00110 00011 DF0A 06 C2 LOOP1 LDA ,H
00120 00012 DF06 07 0000 STR #0000
00130 00013 DF09 0F DECB
00140 00014 DF0A 26 F0 DF04 BNE LOOP1
00150 00015 DF0C 29 RTE
00160 00016 * SP CONVEC
00170 00017 *CONVEC ROUTINE DE MISE AU FORMAT
00180 00018 *OCS VALEURS SIN ET COS
00190 00019 *ENTREE: X EN B , Y POINTE ZONE RESULTAT
00200 00020 *SORTIE: LA VALEUR POINTER PAR Y
00210 00021 *****
00220 00022 DF0D 2B 0F DF0E CONVEC BML PLUS1
00230 00023 DF0F 06 FF LDA #0FF
00240 00024 DF01 07 0140 STR FLAG1
00250 00025 DF04 06 00 LDA #000
00260 00026 DF06 24 04 00E0 SEP R-B --0A
00270 00027 DF0A 1F 09 TFR R,B
00280 00028 DF0C 20 0A DF0B BRR FORMAT
00290 00029 DF0E 04 7F PLUS1 ANDE #07F
00300 00030 DF08 26 03 DF05 BNE 55
00310 00031 DF02 7F 014E CLR ZERO
00320 00032 DF05 7F 0140 SE CLR FLAG1
00330 00033 DF06 4F FORMAT CLR
00340 00034 DF09 00 00FF JBR BINDEC
00350 00035 DF0C 0C 0000 LDR #0
00360 00036 DF0F ED 03 STB 0,Y
00370 00037 DF01 70 014E TST ZERO
00380 00038 DF04 06 02 DF05 BNE 551
00390 00039 DF06 06 05 LDR #5
00400 00040 DF08 07 0F SE1 STB 5,Y
00410 00041 DF0A 1F 03 TFR Y,U
00420 00042 DF0C 70 0140 TST FLAG1
00430 00043 DF0F 27 03 DF04 BEQ FIN1
00440 00044 DF01 00 0000 JBR OPL100
00450 00045 DF04 0C 0001 FIN1 JBR #0001
00460 00046 DF07 2F RTE
00470 00047 *SF DE L'INTERUPTION
00480 00048 *****
00490 00049 DF09 16 10 RETRT BRCC #010
00500 00050 DF0C 0C 0000 LDR #0000
00510 00051 DF0D 00 0046 JBR INIT
00520 00052 DF06 1C 0F ANDDC #0EF
00530 00053 DF0C 2E RTI
00540 00054 END
TOTAL ERREUR 00000--00000

```

