

N° d'ordre :

THÈSES

présentées à la
Faculté des Sciences d'Orsay
Université de Paris

pour obtenir

Le Titre de Docteur - Ingénieur

par

Philippe BIED - CHARRETON

1 ère THESE : Spectromètre Fabry-Perot multicanal utilisant une
caméra électronique le SIMAC photoélectrique.

2 ème THESE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 19.12. 1967 devant la Commission d'Examen

M. P. JACQUINOT.....Président

MM. A. LALLEMAND..... }
R. CHABBAL..... } Examineurs
R. LENNUIER..... }

ORSAY 1967

Résumé.

Nous avons réalisé un nouveau spectromètre Fabry-Perot multicanal (S I M A C) utilisant une caméra électronique LALLEMAND comme multirécepteur : le S I M A C photoélectrique.

Ce spectromètre est conçu pour enregistrer des spectres à haute résolution : $5 \text{ à } 8 \cdot 10^{-6}$, sur une bande spectrale de 200 \AA environ en des temps de pose très courts, de quelques minutes.

La grande rapidité de cet instrument provient de l'utilisation d'un étalon de Fabry-Perot, dont les qualités de luminosité sont bien connues, de l'utilisation de réseaux de grandes dimensions, de l'emploi d'un objectif ouvert à $f/3,3$ et de l'utilisation d'un récepteur à haut rendement quantique. Cependant pour atteindre ces performances nous avons dû concentrer les 50 000 éléments spectraux sur seulement 1 cm^2 de plaque nucléaire. Il en résulte de grandes difficultés de dépouillement, un rapport signal sur bruit de l'ordre 20 lorsque le spectromètre travaille en spectromètre intégral.

T A B L E D E S M A T I E R E S

<u>Chapitre I</u> :	Introduction. Principe du SIMAC photoélectrique	
1 -	Introduction générale	p. 7
2 -	Caractéristiques générales	p. 9
3 -	Apparence des spectres sur la photocathode	p. 14 - 15
<u>Chapitre II</u> :	Calcul et réalisation du SIMAC photoélectrique	
I.	<u>Calcul des éléments optiques</u>	
I-1	Récepteur	p. 16
I-2	Disperseur principal	p. 17
I-3	Disperseur par réflexion	p. 18
I-4	Trieur d'ordre	p. 19
I-5	Résumé des principales caractéristiques	p. 20
II.	<u>Détermination complète des éléments</u>	
II-1	Collimateur - Objectif - Diasporamètre	p. 21
II-2	Conjugaison	p. 21
III.	<u>Réalisation du SIMAC photoélectrique</u>	p. 23
<u>Chapitre III</u> :	La caméra électronique	
I.	<u>Principe et qualités</u>	p. 28
II.	<u>Description et fonctionnement</u>	p. 31
II-1	Optique électronique	p. 31
II-2	Vide	p. 31
II-3	Prise des clichés	p. 32
II-4	Tests de l'optique électronique	p. 32

III. <u>Etude de quelques propriétés de la caméra</u>	p. 40
III-1 Etude de la linéarité	p. 40
III-2 Etude de la sensibilité des photocathodes	p. 44
IV. <u>Références techniques</u>	p. 48
<u>Chapitre IV</u> : Multirécepteur - Fonction d'appareil	
I. <u>Conditions de l'étude</u>	p. 50
II. <u>Etude du contraste</u>	p. 52
III. <u>Rapport Signal sur Bruit - Fonction de transfert</u>	p. 53
IV. <u>Fonction d'appareil du SIMAC</u>	p. 56
<u>Chapitre V</u> : Résultats	
I. <u>Introduction</u>	p. 63
II. <u>Spectres à basse résolution</u>	p. 63
III. <u>Enregistrement simultané SIMAC - HYPEAC</u>	p. 65
IV. <u>Structure de la raie 5460 Å du mercure</u>	p. 66
V. <u>Spectre du plomb</u>	p. 67
VI. <u>Tests de résolution au photomultiplicateur</u>	p. 66
<u>Conclusion</u> :	p. 75
<u>Bibliographie</u> :	p. 79
<u>Table des figures</u> :	p. 82
<u>Table des photographies</u> :	p. 84

C H A P I T R E I

PRINCIPE DU SIMAC PHOTOELECTRIQUE

1. - INTRODUCTION GENERALE:

Dans le cadre d'études sur de nouvelles méthodes de spectroscopie instrumentale réalisées au Laboratoire Aimé Cotton et à la suite de travaux exhaustifs sur le spectromètre Fabry-Perot faits par R. CHABBAL (Réf. II 1, II 2, II 3), un nouveau type de spectromètre est apparu : le SIMAC photoélectrique (Ref. III 1 et III 2)

De principe identique au spectromètre Hypeac, le SIMAC (= Spectromètre Interférentiel Multicanal Aimé Cotton) se différencie par son aptitude à enregistrer simultanément les informations transmises par toutes les bandes passantes de l'interféromètre de Fabry-Perot, alors que l'Hypeac se contente d'analyser un seul canal d'informations. Le SIMAC jouit donc de certaines qualités des méthodes multiplex : rapidité et grande capacité d'informations. (Réf. I 3)

Le premier problème a été de trouver la mémoire capable de stocker, avec le meilleur rendement quantique, les informations transmises par le plus grand nombre de canaux possible. Ceci nous a conduit à enregistrer les spectres avec une caméra électronique Lallemand (Ref. IV 1). Deuxièmement il faut extraire des plaques nucléaires la position et l'intensité des raies spectrales. Cette opération est effectuée par lecture au microdensitomètre.

La caractéristique essentielle de notre méthode est la rapidité d'enregistrement des données. Par contre le dépouillement est très long. Au total le temps

nécessaire à l'étude d'un spectre à haute résolution est du même ordre pour un Hypeac et pour un SIMAC. L'application naturelle du SIMAC photoélectrique sera donc l'étude des sources qui ne peuvent être observées que pendant de brefs instants.

Dans cette étude nous décrirons :

- les caractéristiques générales du SIMAC photoélectrique;
- la calcul des éléments principaux;
- la constitution et le fonctionnement de l'appareil;
- les tests de luminosité et de résolution;
- les résultats acquis.

2. - CARACTERISTIQUES GENERALES - PRINCIPE: (Figures 1 et 2)

Le spectre $F(\sigma)$ de la source étudiée est échantillonné par un interféromètre de Fabry-Perot (Réf. I.1 et I.2) dont la fonction de transfert est $T(\sigma)$. Le spectre résultant de la convolution de $F(\sigma)$ par $T(\sigma)$ est ensuite analysé par un disperseur croisé à deux réseaux ; ainsi chaque échantillon du spectre est transmis par un ordre du Fabry-Perot et dirigé vers un récepteur particulier.

L'enregistrement complet du spectre s'obtient par glissement de la fonction d'échantillonnage d'un intervalle égal à la distance séparant deux pics de transmission. Ceci revient à déplacer chaque bande passante du Fabry-Perot d'un intervalle entre ordre $\Delta\sigma$. Pendant le même temps chaque information est dirigée sur un récepteur indépendant grâce à un dispositif de transfert d'image, qui est ici un diasporamètre.

De cette manière chaque élément spectral est enregistré par un élément de la surface réceptrice de la caméra électronique. Chaque élément de la photo cathode

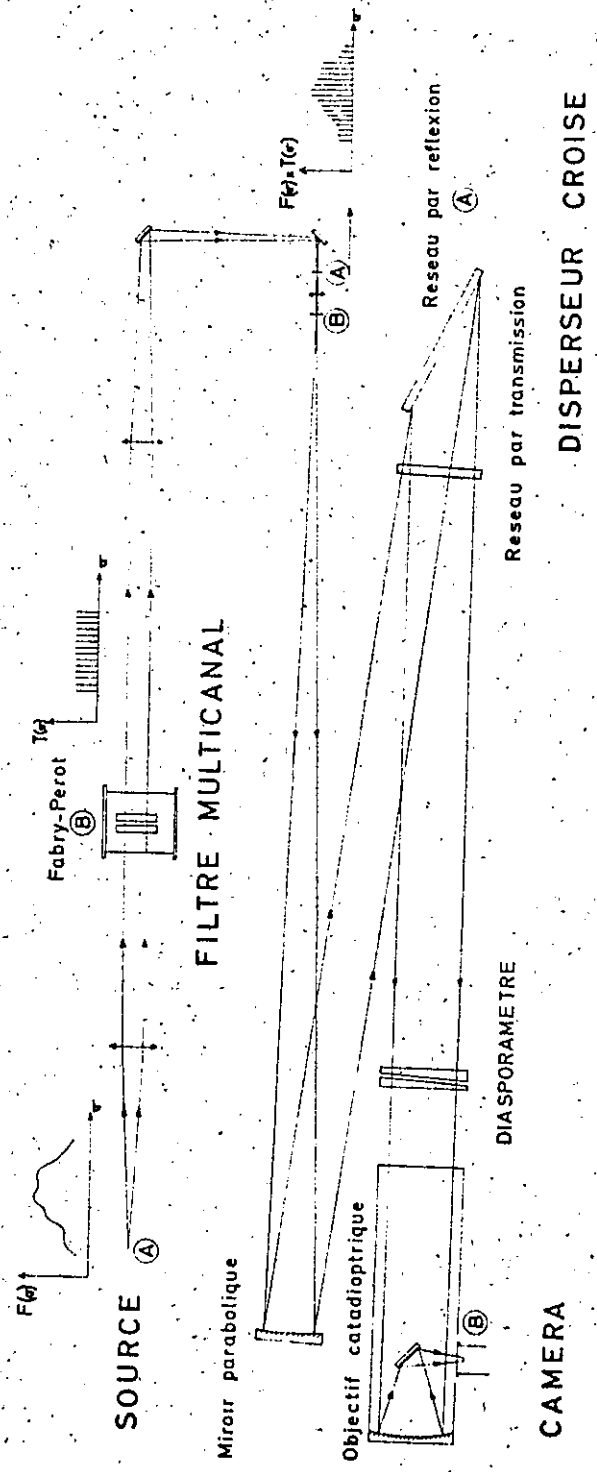


Fig. 1

6

S I M A C

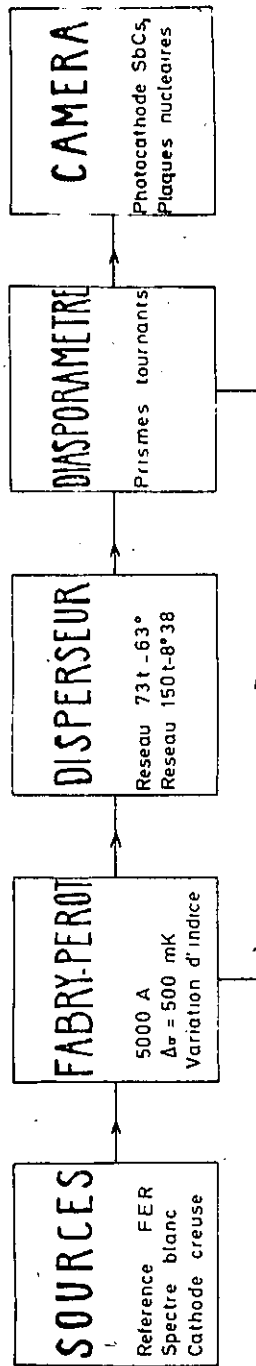


Fig 2

constitue un récepteur photoélectrique équivalent à un photomultiplicateur; ainsi au point correspondant de la plaque nucléaire la densité mesurée est proportionnelle au flux lumineux qui a frappé la photocathode.

Notre utilisation de la caméra est équivalente à la juxtaposition d'autant de photomultiplicateurs qu'il y a de surfaces réceptrices élémentaires. L'étude simultanée d'un grand nombre d'ordres de Fabry-Perot est possible grâce à l'énorme capacité d'information de la caméra. C'est dans le domaine de la rapidité de stockage que le SIMAC se montre avantageux. Cependant, si l'on tient compte du rapport signal sur bruit, nous montrerons qu'une caméra et un photomultiplicateur, ou qu'un Hypeac et un SIMAC, ont des propriétés équivalentes.

3. - APPARENCE DES SPECTRES SUR LA PHOTOCATHODE

Considérations générales:

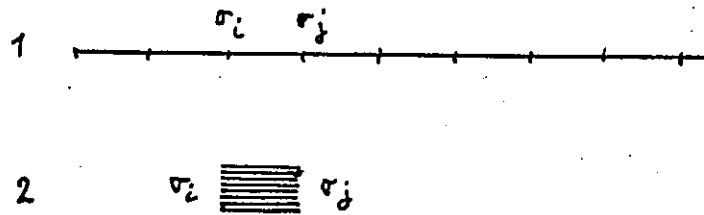
Dans un spectromètre les informations sont dispersées dans le temps pour constituer un enregistrement séquentiel. Dans le SIMAC, la dispersion des éléments spectraux est moitié spatiale et moitié temporelle. Pour comparer les méthodes d'enregistrement, nous pouvons faire le calcul simple suivant.

Un élément spectral $\delta \sigma = 20 \text{ mK}$ occupant une surface de $250 \mu^2$ environ sur la photocathode, il est possible d'enregistrer 50 000 éléments spectraux dans le même temps sur la surface totale du récepteur. Voyons comment seront dispersées les informations dans le cas classique. Un spectrographe à dispersion unique utilisera une longueur de plaque de $l_1 = 50\,000 \times 15 \mu = 7,5 \text{ m}$. Un spectromètre, dont l'enregistreur permettra de résoudre 1mm, déroulera une longueur de papier de $l_2 = 50\,000 \text{ mm} = 50 \text{ mètres}$. Nous allons voir comment procède le SIMAC.

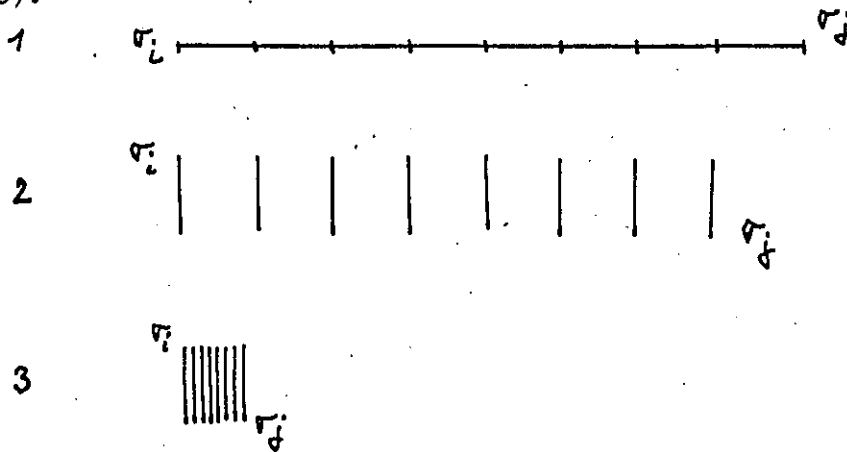
Description du procédé SIMAC:

La compression des informations est réalisée grâce à une triple dispersion :

a) Le spectre visible de $18\ 000$ à $23\ 000\ \text{cm}^{-1}$ est découpé en douze intervalles $\sigma_i - \sigma_j$ d'environ $400\ \text{cm}^{-1}$ par un disperseur à deux réseaux croisés. Ainsi, la longueur de plaque passe de $7,5\ \text{m}$ à $60\ \text{cm}$. Ceci est le premier gain. Schématiquement on procède comme il est indiqué ci-dessous :



b) A l'intérieur de chaque intervalle $\sigma_i - \sigma_j$ on découpe maintenant k petits intervalles de largeur $\Delta\sigma$ (opération 1); on fait subir à l'ensemble des k intervalles une rotation de 90° (opération 2) avant de les remettre côte à côte, (opération 3).



Si l'on place environ 35 éléments spectraux par intervalle $\Delta\sigma$, la compression linéaire du spectre est réalisée en 3 dans le même rapport. Ceci nous fait donc passer de $60\ \text{cm}$ de plaque dans la phase "a" à $1,7\ \text{cm}$ dans la phase b. Il est bien entendu que cette compression a été compensée par une augmentation de la hauteur de plaque; mais cela correspond à l'utilisation de la surface totale du

récepteur photographique.

Par cette méthode, nous plaçons un nombre équivalent d'informations sur une ligne ou sur une colonne de l'image. Le nombre, qui est de 700, montre que nous avons la même définition d'image sur 2 cm^2 de la photocathode que sur un écran de télévision, auquel notre codage s'apparente.

Les figures suivantes illustrent cette triple décomposition du spectre.

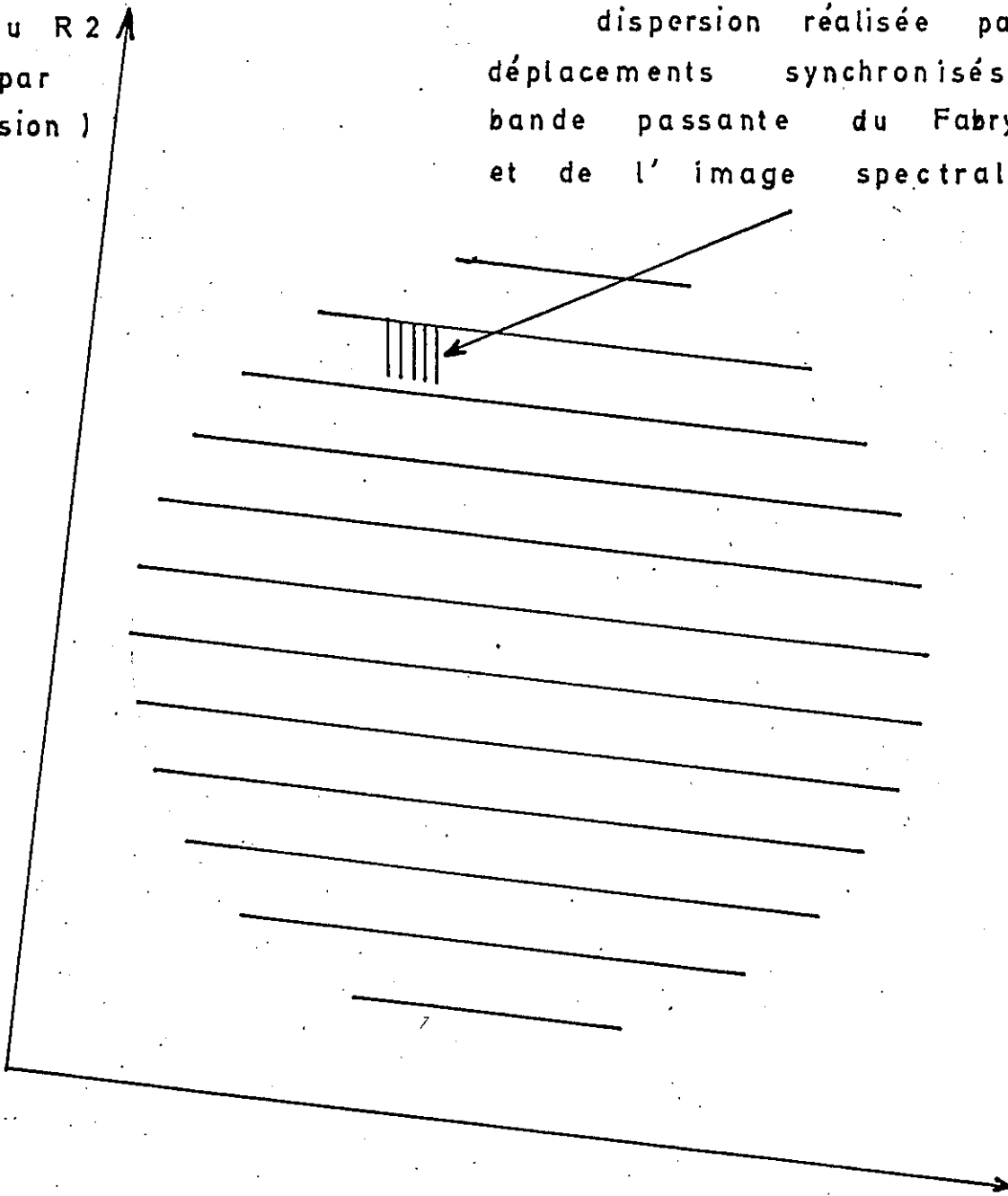
(Figures 3 et 4)

①

dispersion
du réseau R2
(réseau par
transmission)

dispersion réalisée par les
déplacements synchronisés de la
bande passante du Fabry-Perot
et de l' image spectrale

③

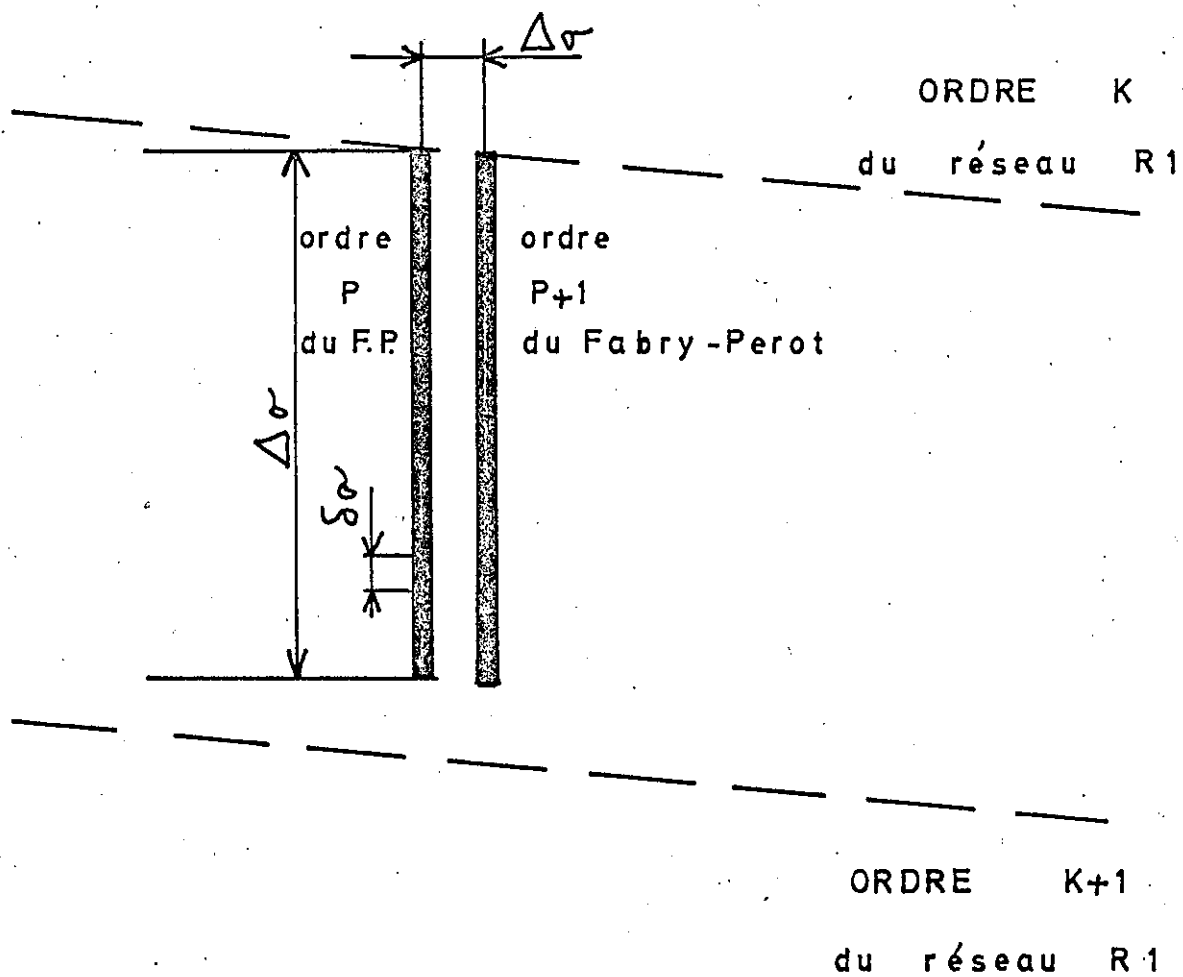


dispersion du réseau R1
(réseau par réflexion)

②

APPARENCE DU SPECTRE SUR LA CAMERA
ASPECT GENERAL

figure 3



APPARENCE DU SPECTRE SUR LA CAMERA
VUE DE DETAIL

figure 4

C H A P I T R E I I

CALCUL ET REALISATION DU SIMAC PHOTOELECTRIQUE

Le calcul du SIMAC photoélectrique s'apparente à celui du SIMAC photographique. Pour un exposé complet de la méthode de calcul, on consultera R. PELLETIER (Thèse, à paraître).

I - CALCUL DES ELEMENTS OPTIQUESI-1 Récepteur

Nous calculons le SIMAC dans le but d'utiliser au maximum la surface du récepteur. Des considérations sur le rapport signal sur bruit, qui seront développées plus loin, nous ont conduit à adopter, pour dimensions du récepteur élémentaire associé à un élément spectral, un carré de côté 15μ sur la plaque électrographique. Compte-tenu du grandissement 0,75 de l'optique électronique, la surface correspondante sur la photocathode de la caméra sera de 20μ sur 20μ .

Cette surface de récepteur permet de classer le SIMAC parmi les spectromètres intégraux, (Réf. II-1). Dans le cas d'un spectre peu riche, la surface pourra être notablement augmentée et les propriétés du récepteur améliorées. Les caractéristiques données sont donc des caractéristiques minimales.

Nous adopterons les notations suivantes (portées également sur les figures 1 et 2)

- $\delta \sigma$: élément spectral (image en DE)
- $\Delta \sigma$: intervalle spectral libre du Fabry-Perot (AB)
- N : finesse effective du Fabry-Perot
- $R = \frac{\sigma}{\delta \sigma}$: résolution du spectromètre
- $R_1 = \frac{\sigma}{\Delta \sigma}$: résolution du disperser horizontal
- k : ordre dans lequel passe la radiation σ dans le réseau R_1 .
- p : ordre dans lequel passe la radiation σ dans le Fabry-Perot.
- $R_2 = k$: résolution du trieur d'ordre R_2 (disperser vertical)

I-2 Disperser principal. (Fonction dispersion "3")

La dispersion ultime donnant la résolution $R = 10^6$ est assurée par le déplacement synchronisé de l'image spectrale et de la bande passante du Fabry-Perot. Sur la figure 2, ceci correspond au segment AB.

Pour atteindre $R = 10^6$ avec $\sigma_{moyen} = 20\ 000\ \text{cm}^{-1}$, on place $\delta \sigma = 20\ \text{mK}$ dans $15\ \mu$ de plaque. La dispersion D'_3 est donc :

$$D'_3 = 1,3\ \text{cm}^{-1}/\text{mm}\ \text{sur la plaque}$$

$$D_3 = 1\ \text{cm}^{-1}/\text{mm}\ \text{sur la photocathode (ou } 1/4\ \text{Å par mm)}$$

Une fuite calibrée règle le déplacement de la bande passante du Fabry-Perot. Un système à deux prismes tournants (diasporamètre) déplace l'image spectrale le long du segment AB en un temps qui peut varier de quelques secondes à quelques heures. La précision du balayage ne nécessite pas une synchronisation automatique des mouvements.

I-3 Disperseur par réflexion (Fonction dispersion "2")

Si la finesse effective du Fabry-Perot est $N = 25$, le réseau R_1 devra séparer confortablement deux cannelures distantes d'un intervalle spectral $\Delta \sigma = N \delta \sigma = 500 \text{ mK}$. Pour assurer l'indépendance des récepteurs associés aux cannelures adjacentes, nous conviendrons de les séparer sur la plaque par une distance $2g = 30 \mu$, soit sur la photocathode par $2g_1 = 40 \mu$.

Les dispersions D'_2 et D_2 sont alors définies :

$$\begin{aligned} D'_2 &= 500 \text{ mK pour } 30 \mu & D'_2 &= 16 \text{ cm}^{-1}/\text{mm} \\ D_2 &= 500 \text{ mK pour } 40 \mu & D_2 &= 12,5 \text{ cm}^{-1}/\text{mm} \text{ (3 \AA par mm)} \end{aligned}$$

La longueur de plaque étant de 8 mm, nous enregistrerons sur une ligne un intervalle

$$\sigma_i - \sigma_j = 100 \text{ cm}^{-1}$$

Pour réaliser la superposition d'un grand nombre d'ordres du réseau R_1 , il suffit que l'ordre k , dans lequel passe la radiation de nombre d'onde σ_k comprise dans l'intervalle $\sigma_i - \sigma_j$ autour de $20\,000 \text{ cm}^{-1}$, vérifie la relation:

$$k = \frac{\sigma_k}{\sigma_i - \sigma_j} = 200$$

cet ordre élevé nous conduirait à utiliser un réseau à très faible nombre de traits par mm ($n = 18$). Ces réseaux n'étant pas excellents dans le spectre visible nous avons choisi le premier qui ait une qualité suffisante. Il possède $n_1 = 73$ traits/mm pour le plus grand angle de blaze de 63° , travaillant dans l'ordre 50 à $20\,000 \text{ cm}^{-1}$.

Ceci a pour effet de nous obliger à prendre 4 clichés pour enregistrer le spectre complet. Pour reconstituer l'aspect classique, on juxtapose les quatre plaques

I-4 Trieur d'ordre (Fonction dispersion "3")

Par suite du choix de $n_1 = 73$ t/mm, l'intervalle entre ordres du réseau R_1 devient :

$$\sigma_i - \sigma_j = 400 \text{ cm}^{-1}$$

Si nous choisissons une longueur de 1 mm pour les segments "type AB" selon lesquels seront analysés les intervalles entre ordres du Fabry-Perot, il est nécessaire que le trieur d'ordre ait une dispersion D_3 supérieure ou égale à 400 cm^{-1} par mm. Sinon les différents ordres se chevaucheraient et le spectromètre risquerait de mélanger des informations.

Le disperseur "3" est presque déterminé. Nous avons choisi un réseau par transmission en double passage pour des raisons de commodité de montage. Il suffit alors de prendre :

$$D_3 = 200 \text{ cm}^{-1}/\text{mm}$$

Cette dispersion est réalisée par un réseau d'angle de blaze $8^\circ 38'$ et de 150 t/mm. La dispersion n'est évidemment pas constante sur l'ensemble du spectre visible. Elle va de 0,8 mm à 1,2 mm pour 400 cm^{-1} , mais ceci n'est pas gênant.

Un calcul simple permet de trouver la focale de l'objectif de chambre. Avec les éléments précédemment choisis, il nous faut une focale de 400 mm.

T A B L E A U 1

RESUME DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES

Caméra	Objectif	Fabry-Perot	Réseau 1	Réseau 2
$g = 20 \mu$	$F = 400 \text{ mm}$	$\Delta \sigma = 500 \text{ mK}$	$n_1 = 73 \text{ t/mm}$	$n_2 = 150 \text{ t/mm}$
surface utile 12 x 16 mm	$\phi = 120 \text{ mm}$	$N = 25$	$\varphi_1 = 63^\circ$	$\varphi_2 = 8^\circ 38'$
couche Sb Co_3	ouverture F/3,3	$D_1 = 1 \text{ K/mm}$	Surface 110 x 220 mm ²	Surface 116 x 156 mm ²
Plaque nucléaires G5	Objectif catadioptrique	5 couches	$D_2 = 12 \text{ K/mm}$	$D_3 = 200 \text{ K/mm}$

II - DETERMINATION COMPLETE DES ELEMENTS

II-1 Collimateur - Objectif - Diasporamètre

La Société REOSC nous a fourni un collimateur parabolique off axis de focale $F_c = 1650$ mm, identique à celui qui est utilisé dans le SIMAC photographique.

L'objectif de chambre est un objectif de SCHMIDT ouvert à $F/3,3$ calculé et fabriqué par REOSC (Réf. I-5). La tache d'aberration est de 17μ pour un champ de 3° . Cet objectif a été calculé en tenant compte de la courbure de la photocathode. Ainsi on peut réaliser très correctement la coïncidence de la couche photoélectrique et de la surface focale. Cependant le réglage de la caméra sera plus critique que pour une surface focale plane.

Le diasporamètre (Réf. I-4) a été taillé par REOSC. Les deux prismes sont montés dans deux barillets tournant en sens inverse à des vitesses pouvant varier dans un rapport 2, de 2 à 2054. Le déplacement correspondant sur la plaque est de 10 secondes par mm à 6 h par mm. La linéarité de balayage n'est correcte que sur un petit angle de rotation des prismes (30°), c'est-à-dire sur 1 mm de plaque. Au delà de 1 mm, il serait nécessaire d'utiliser un entraînement effectivement synchronisé par le déplacement de pression dans la cloche du Fabry-Perot.

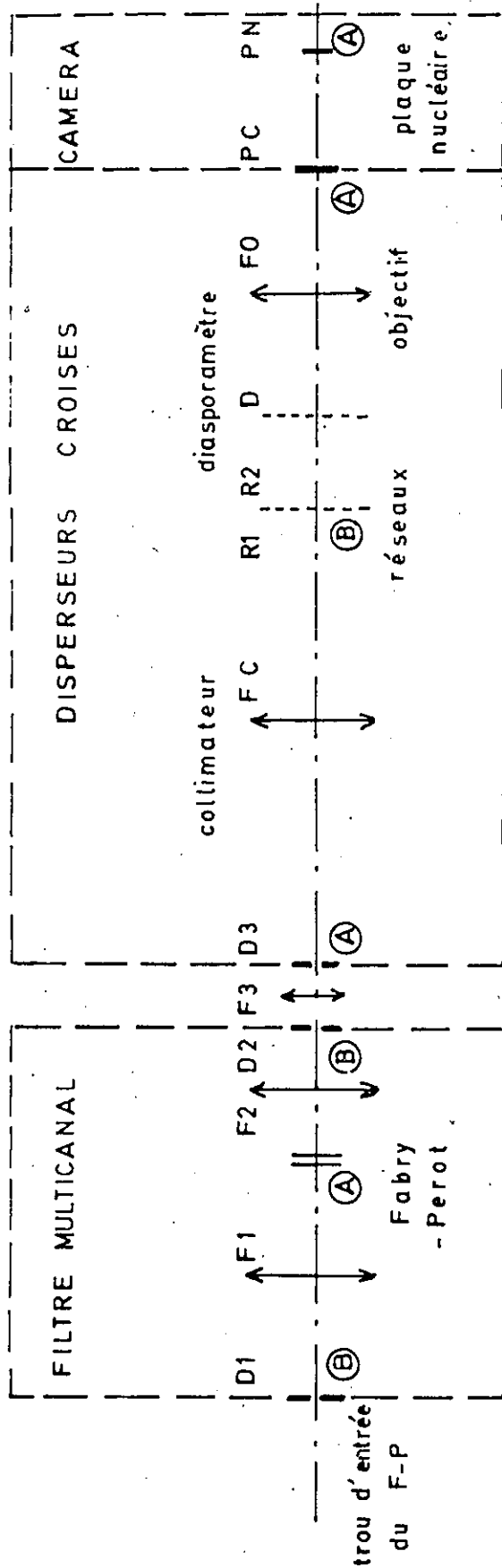
II-2 Conjugaison

Nous avons adopté les conjugaisons suivantes : (cf. tableau 2).

Eléments conjugués: A { Fabry-Perot
 Trou d'entrée du disperseur croisé
 Photocathode et plaque nucléaire

Eléments conjugués: B { Trou d'entrée du Fabry-Perot
 Trou de sortie du Fabry-Perot
 Réseau R_1 par réflexion

CONJUGAISONS



$FO = 400 \text{ mm}$

$FC = 1550 \text{ mm}$

$F_3 = 25 \text{ mm}$

$D_3 = 80 \text{ }\mu\text{m}$

$D_1 = 0.8 \text{ mm}$

$F_1 = 290 \text{ mm}$

$F_2 = 560 \text{ mm}$

$D_2 = 1.4 \text{ mm}$

B Trou d'entrée F.P.
 Trou de sortie F.P.
 Réseaux

A Fabry - Pérot
 Trou d'entrée du disperser
 Photocathode et plaque

Tableau 2

III - REALISATION DU SIMAC PHOTOELECTRIQUE

Le SIMAC photoélectrique a été réalisé au cours de l'année 1966; les pièces mécaniques ont été exécutées par l'atelier du laboratoire Aimé Cotton; les pièces optiques l'ont été par la Société REOSC.

Nous avons monté auparavant la caméra électronique sous la direction de Monsieur DUCHESNE à l'Observatoire de Paris. Les six mois que nous y avons passés nous ont permis d'acquérir une technique suffisante pour pouvoir ensuite travailler seul à Bellevue.

Un prototype du SIMAC photoélectrique a fonctionné début 1966. Conçu plutôt comme un Hypeac, il nous a permis de tester la caméra comme récepteur photoélectrique de spectromètre. Les résultats ont été rapidement décrits lors du Colloque C.N.R.S. sur les Nouvelles Méthodes de Spectroscopie Instrumentale (Orsay 1966) (Réf. III-2)

Après le Colloque, nous avons monté le SIMAC tel qu'il a été décrit précédemment. Nous avons ajouté la possibilité de travailler en spectromètre Fabry-Perot. Un photomultiplicateur, placé au voisinage du trou d'entrée du disperseur croisé, travaille en Littrow-Blaze. Il est utilisé lors des tests de résolution pour s'assurer des performances atteintes avant la prise des clichés (fig. 18 et 19, cf. Ch V).

On peut observer le spectre à l'aide d'un viseur placé sous l'objectif. Au même endroit un châssis photographique peut être monté, pour travailler en SIMAC photographique.

Lors de notre installation dans le nouveau laboratoire d'Orsay, nous avons isolé totalement le SIMAC dans une chambre noire; tout l'appareillage électrique et électronique se trouvant dans la pièce contiguë. Nous pouvons ainsi commander à distance toutes les opérations de prise des clichés et réduire encore le bruit du à la lumière parasite frappant la photocathode de la caméra électronique.

Photographies : Vue n° 1 SIMAC (côté source)
 Vue n° 2 SIMAC (côté disperseurs)

- A. Cloche contenant le Fabry-Perot
 - B. Disperseur principal : réseau par réflexion $n = 73t/mm$ $\varphi_1 = 63^\circ$
 - C. Trieur d'ordre : réseau par transmission $n = 150t/mm$ $\varphi_2 = 8^\circ 36'$
 - D. Diasporamètre (2 prismes tournants) assurant le déplacement de l'image
 - E. Objectif
 - F. Couche photoélectrique
 - G. Optique électronique
 - H. Magasin de plaques
 - I. Cathode creuse
 - J. Alimentation THT pour caméra
- } Caméra
} électronique

C H A P I T R E III

LA CAMERA ELECTRONIQUE

I - PRINCIPE ET QUALITES:

La caméra électronique a été conçue par le Professeur LALLEMAND. Elle a fait l'objet de nombreuses études par MM. LALLEMAND et DUCHESNE et a été utilisée jusqu'à présent en astronomie principalement pour l'étude de sources faibles et en photométrie stellaire, (Réf. IV).

Rappelons ses qualités essentielles :

a) La caméra électronique est un récepteur photoélectrique : l'image (ou le spectre) à enregistrer est formée sur une couche photoélectrique $Sb\ Cs_3$ à haut rendement quantique, et de même nature que celle d'un photomultiplicateur.

b) la caméra électronique est un récepteur d'images : les électrons émis par la couche photoélectrique sont accélérés et focalisés par une optique électronique, de telle sorte que la plaque nucléaire enregistre une distribution spatiale d'informations. La caméra électronique peut donc être considérée comme un multirécepteur.

c) La caméra électronique est un récepteur linéaire : la linéarité de la réponse de la photocathode n'est pas altérée par l'utilisation de la plaque nucléaire comme récepteur ultime. On observe une proportionalité de la densité en fonction de l'éclairement jusqu'à une densité de 1,5 pour des conditions expérimentales bien définies.

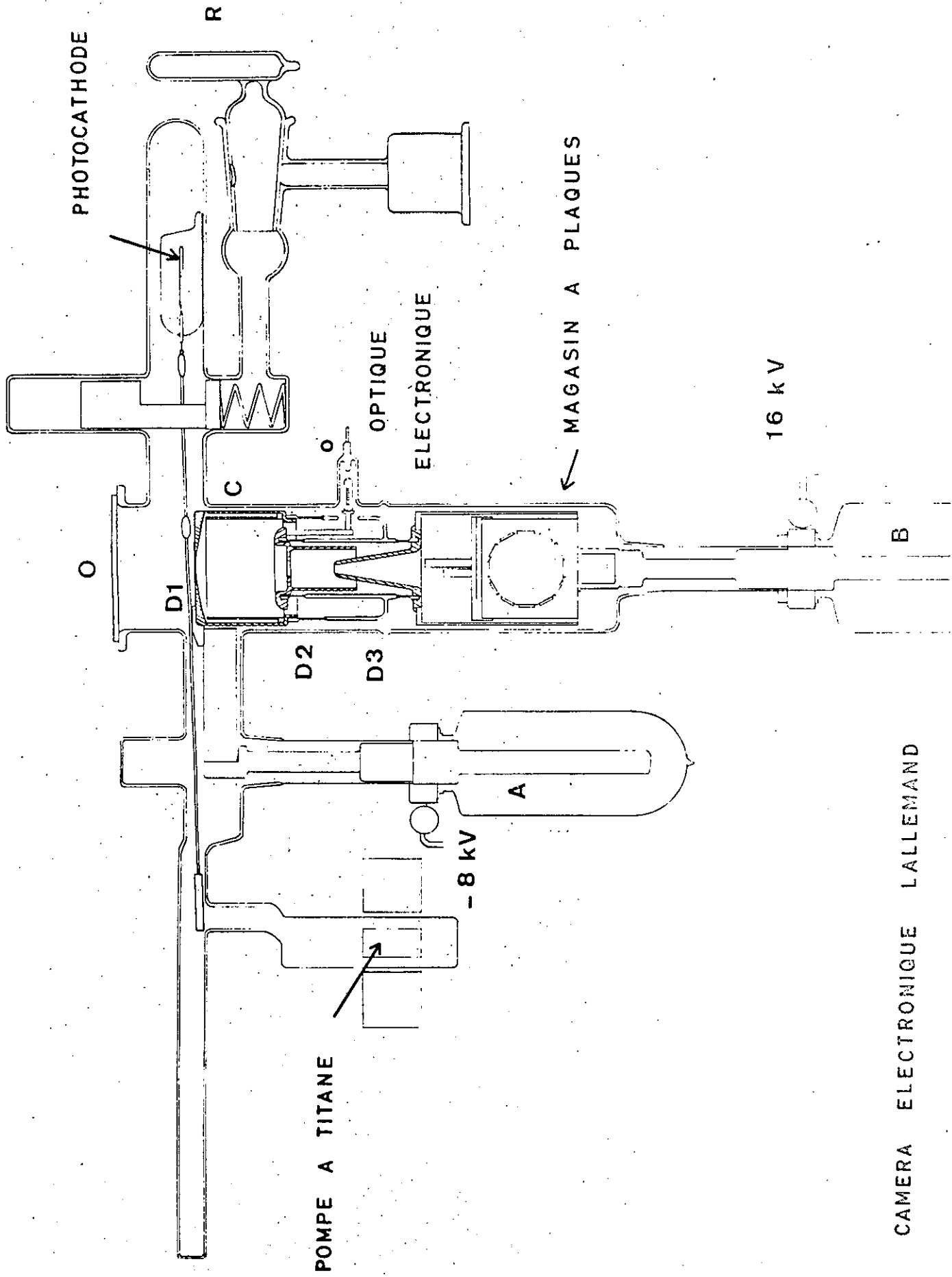
d) La caméra électronique est un récepteur à faible bruit : placée dans une enceinte propre, sous une pression de l'ordre de 10^{-7} Torr et à une température de $120^\circ K$, la couche photoélectrique n'émet que très peu d'électrons thermiques.

Un faible bruit de granularité subsiste dans la plaque nucléaire, accompagné de défauts localisés inévitables, que l'on peut repérer et éliminer facilement lors du dépouillement.

Ceci étant dit, il faut bien se garder de considérer la caméra électronique LALLEMAND comme un récepteur parfait et universel. En effet, sa mise en oeuvre est extrêmement délicate et requiert une attention soutenue ; malgré cela il peut arriver de nombreux incidents qui peuvent soit retarder la prise des clichés, soit même obliger à reprendre toutes les opérations. Une technique aussi minutieuse ne doit être employée que dans les cas où elle est absolument irremplaçable.

Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement comment fonctionne la caméra et les tests de mise au point que l'on doit effectuer régulièrement pour s'assurer que le réglage de l'optique électronique est optimum.

Notre étude a porté sur une caméra montée en 1964. Depuis, de nombreuses améliorations ont été apportées par M. DUCHESNE et son équipe, à la fois sur les questions de taille de la photocathode, que de bruit et de qualité d'image. Les nouveaux tubes peuvent évidemment être adaptés et le seront sans doute dans un avenir proche.



CAMERA ELECTRONIQUE LALLEMAND

fig 5

Légende de la Figure 5

PLAN DE LA CAMERA ELECTRONIQUE

- O Glace de fermeture du tube laboratoire, scellée à la piscine.
- C cathode portée au potentiel $- 8$ kV et refroidie à la température de $- 150^{\circ}$ par la queue de refroidissement A et un passage verre métal.
- D₁ Diaphragme de la cathode où vient se placer la photocathode.
- D₂ Deuxième électrode de l'optique, appelée "champignon", portée au potentiel 0 par le passage M (masse).
- D₃ Troisième électrode, appelée "cône",
Magasin à plaques, commandé par 4 bobines magnétiques (non représentées) assurant l'ouverture, la fermeture de l'obturateur et la rotation du barillet.
- Le magasin ainsi que le cône D₃ sont portés au potentiel $+ 16$ kV et à la température $- 150^{\circ}$ C par la queue B et un passage verre métal.
- R Robinet de fermeture. Le groupe de pompage permet d'atteindre quelques 10^{-6} mm. de mercure.
- Pompe à titane mesurant la pression et entretenant un vide de quelques 10^{-7} mm. de mercure.
- A et B Queues de refroidissement baignant dans l'azote liquide. Les dewars sont alimentés automatiquement par un système à deux niveaux.

II - DESCRIPTION ET FONCTIONNEMENT (fig. 5)

II-1 Optique Electronique

Ayant mis en place la photocathode sur le diaphragme D_1 , on forme sur elle l'image A enregistrer. Les électrons émis sont accélérés par la différence de potentiel de 24 kV créée entre la cathode C et le magasin à plaques.

La focalisation électrostatique permet d'atteindre une résolution de 40 traits par mm sur toute la photocathode. La limitation provient principalement de la difficulté de centrage de l'optique électronique et de l'instrument qui projette la mire de test sur la caméra. Les plaques nucléaires ont une résolution bien inférieure, puisque chaque électron peut être repéré par un amas d'argent d'environ $0,3 \mu$ de diamètre pour une plaque Ilford G5.

II-2 Vide

L'optique électronique, le magasin à plaques et la photocathode sont introduits par l'ouverture O, qui est ensuite scellée à la piscine. Un étuvage à 250° pendant environ sept heures permet d'atteindre une pression de 10^{-7} Torr. Après l'étuvage, les queues de refroidissement A et B, baignant dans l'azote liquide, piègent efficacement les dégazagés. Une pompe ionique à titane maintient un vide d'environ 10^{-7} Torr pendant toute la durée de l'expérience, après fermeture du robinet R. Du charbon actif est placé dans une chemise concentrique à la cathode C, pour absorber les gaz résiduels enfermés dans l'optique électronique.

L'ensemble des opérations de préparation, d'étuvage, de refroidissement dure environ 24 heures. Alors la couche photoélectrique peut être mise en place dans une enceinte qui lui permettra de subsister pendant au moins une semaine sans perte de sensibilité. La prise des clichés peut alors commencer. Un système d'alimentation automatique en azote liquide maintient les queues de refroidissement à la température voulue, pour une consommation d'environ un demi-litre à l'heure.

Un container Superco de 50 litres assure donc une large autonomie à l'ensemble.

II-3 Prise des clichés

Des passages verre-métal conduisent les potentiels $- 8$ kV, 0 et $+ 16$ kV respectivement à la cathode C, au "champignon" D_2 et au magasin à plaques. Il faut généralement attendre une heure avant que les potentiels soient stabilisés.

Des bobines magnétiques extérieures au tube commandent l'ouverture et la fermeture de l'obturateur interne. Une autre bobine commande la rotation du barillet porte-plaques. Chaque opération est contrôlée par une impulsion caractéristique enregistrée par la jauge à titane. Par ce moyen on peut s'assurer du bon fonctionnement du magasin et éviter de perdre des plaques.

Lorsque les douze plaques sont impressionnées, on laisse le tube se réchauffer pendant trois à quatre heures, jusqu'à la température ambiante. On descelle la glace de fermeture O, on sort l'optique électronique pour atteindre le magasin à plaques. Celles-ci sont ensuite développées selon une technique classique. La photocathode est détruite par la rentrée d'air dans le tube et doit être remplacée pour la série suivante.

Ainsi pour chaque série de douze plaques, il faut démonter l'ensemble optique électronique - porte-plaques. C'est ce qui rend un peu lourd le maniement de la caméra, mais c'est aussi le prix de résultats nouveaux et intéressants.

II-4 Tests de l'optique électronique

Pour chaque série de plaques, il est bon de prendre au moins trois clichés de tests. Un premier sera un test de bruit : par exemple une demie heure de pose en l'absence de signal. Si le tube est propre et le vide suffisant, on ne verra qu'avec peine l'image de la photocathode sur la plaque nucléaire. La densité atteinte est de l'ordre de 0,05. Ce cliché donne une indication précise sur la qua-

lité de préparation de la caméra. Le moindre défaut de nettoyage se traduit par un mauvais vide et un voile important sur la plaque nucléaire.

Un second test consistera à éclairer uniformément la photocathode pour obtenir une valeur de la sensibilité relative à chaque point. Ce test permet d'établir une carte de la photocathode avec une précision de 2 à 3 %.

Sur notre montage, deux méthodes peuvent être utilisées pour obtenir un éclairage uniforme. Soit tolérer une lumière parasite importante dans la chambre du spectrographe, soit déplacer un pinceau lumineux, d'intensité et d'étendue constante, sur un diamètre de la photocathode. La première nous semble plus sûre : elle fait appel à un processus aléatoire, qui doit moyenniser l'intensité lumineuse sur la surface de la photocathode. La seconde est facilement réalisée par le diasporamètre inclus dans le spectrographe. En effet, en tournant, les prismes du diasporamètre déplacent l'image monochromatique du trou d'entrée sur la photocathode. Cependant, le déplacement est limité à 4 mm pour conserver la même étendue de faisceau. Nous avons utilisé les deux méthodes : la première nous donnant facilement un aperçu de la sensibilité globale en surface et en longueur d'onde ; la seconde permettant une analyse de la sensibilité spectrale.

Un troisième test sera d'enregistrer une mire à pas fin pour vérifier la résolution spatiale de l'image électronique. Il est évident qu'en cas de dérèglement, on ne pourra intervenir qu'après l'ouverture du tube. Si la focalisation est mauvaise, toutes les plaques seront perdues, mais ceci est très rare. Dans le cas général, la mire va nous donner l'allure de la fonction d'appareil en chaque point de la photocathode, c'est-à-dire pour chaque récepteur élémentaire et ceci est fondamental pour permettre le dépouillement des plaques, (Cf Chap. IV).

ILLUSTRATION DES PHOTOGRAPHIES

Photographie n° 3:

Caméra électronique en place sous l'objectif du spectrographe.

Photographie n° 4:

On voit l'ensemble d'une série de douze plaques. On a fait varier la position de la caméra sous l'objectif. On voit apparaître en 8, 9 et 10 des gros défauts, alors qu'en 6 l'image est presque au point.

Les poses 11 et 12 sont des poses de bruit. (4' et 8')

Photographie n° 5:

Spectre cannelé montrant la variation de la mise au point sur l'ensemble de la photocathode, (120 cannelures par mm).

Photographie n° 6:

Spectre cannelé montrant un réglage optimum sur l'ensemble de l'image. Le contraste est de l'ordre de 0,6 pour une fréquence spatiale de 25 cannelures par mm.

Ces photographies n'ont pas pu être reproduites dans cet exemplaire -

III - ETUDE DE QUELQUES PROPRIETES DE LA CAMERA:

III-1 Etude de la linéarité

Introduction

La loi de linéarité densité-éclairage a été mise en évidence très tôt pour la caméra électronique et soigneusement vérifiée par de nombreuses études, (Réf. IV-2 et 3).

De celles-ci il ressort principalement que la courbe densité-éclairage se rapproche le plus d'une droite dans les conditions suivantes :

- plaques nucléaires Ilford G5 de 10μ d'épaisseur.
- électrons de 25 kV environ.
- révélateur Kodak ID 19 (voir référence technique).

Dans ces conditions, la loi est vérifiée à quelques pour cent jusqu'à une densité voisine de 1,5. La précision n'étant pas excellente, on peut employer l'expression de récepteur quasi linéaire, comme le suggère M. DUCHESNE.

Il existe des plaques nucléaires plus fines que les plaques G5 : par exemple les plaques des séries K et L (K5 et L4) de chez Ilford. Cependant, on a pu montrer que leurs caractéristiques sont moins linéaires. Ces plaques peuvent être utilisées pour enregistrer des images très fines, mais seront suspectes quant à leur utilisation photométrique.

VERNIER (Réf. IV-3) assure que la loi de linéarité dépasse la limite que nous avons citée de $D = 1,5$ pour atteindre $D = 3$ ou 4. Nous remarquerons que la mesure de densités aussi élevées est difficile et surtout que, dans ces régions, le rapport signal sur bruit est mauvais. Aussi la gamme d'utilisation habituelle se situe généralement entre des densités 0,1 et 1,2 où la mesure est simple et la précision correcte. On voit que la dynamique de la plaque électrographique est de 1 à 12 dans les meilleures conditions de rapport signal sur bruit, ce qui est déjà supérieur à la dynamique d'une plaque photographique.

Mesures

Nous développerons les considérations de rapport signal sur bruit dans le chapitre IV. Nous donnons ici deux vérifications que nous avons faites, pour tester les qualités de notre montage.

a) Structure hyperfine du Terbium:

L'intensité des composantes hyperfines est bien connue, ainsi que leur position. Nous avons donc enregistré simultanément la raie $5354,88 \text{ \AA}$ du Terbium sur photomultiplicateur et sur la photocathode de la caméra. En faisant varier le temps de pose sur différentes plaques, nous avons obtenu la courbe de la figure 6 qui est une droite à la précision de nos mesures (5 %).

b) Spectre du mercure à basse résolution:

Nous avons volontairement surexposé le centre de la raie verte 5460 \AA du mercure pour obtenir une série continue de points de mesures sur les pieds de la raie.

Sur une même plaque, nous avons enregistré trois fois la raie 5460 \AA , en des points où la sensibilité était mesurable avec précision (2 %) et avec des temps de pose variant comme 1 - 2 - 4. Nous avons ensuite confondu les trois axes des raies pour obtenir la figure 7. On voit que la proportionnalité intensité-densité est vérifiée au moins jusqu'à $D = 1,2$.

c) Remarques:

Le densitomètre que nous avons utilisé, un densitomètre JOYCE, donne correctement les densités jusqu'à 1,5 environ. Au delà la cellule réceptrice ne travaille plus dans les meilleures conditions et l'asservissement de mesure a un temps de réponse très long et une erreur élevée. Nous nous sommes donc arrêtés à une densité maximum de 1,5. Nous pensons poursuivre l'étude de la courbe densité-éclairage lorsque notre densitomètre transformé permettra d'atteindre $D = 3$.

LINEARITE

ECLAIREMENT - DENSITE

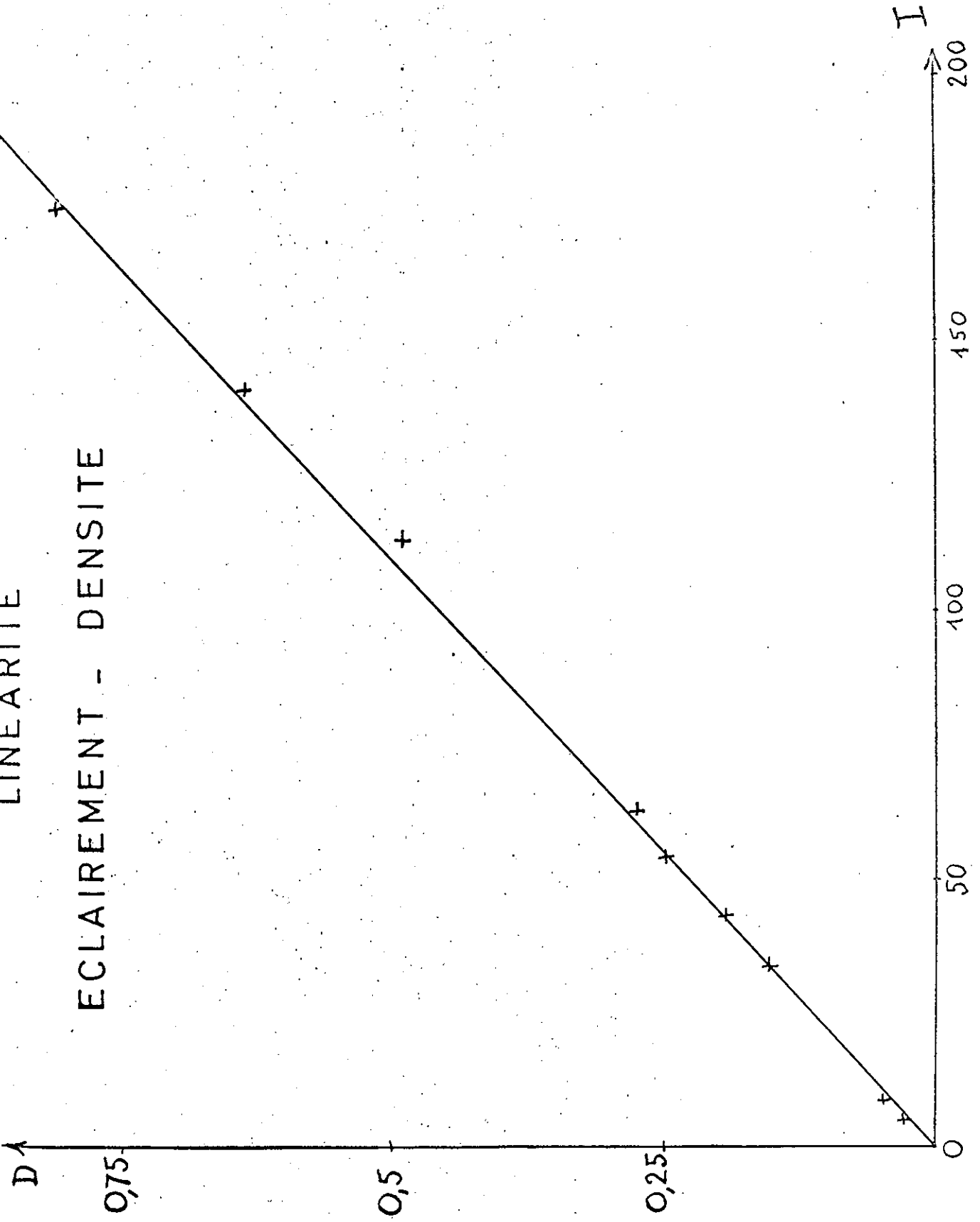


figure 6

TEST DE LINEARITE

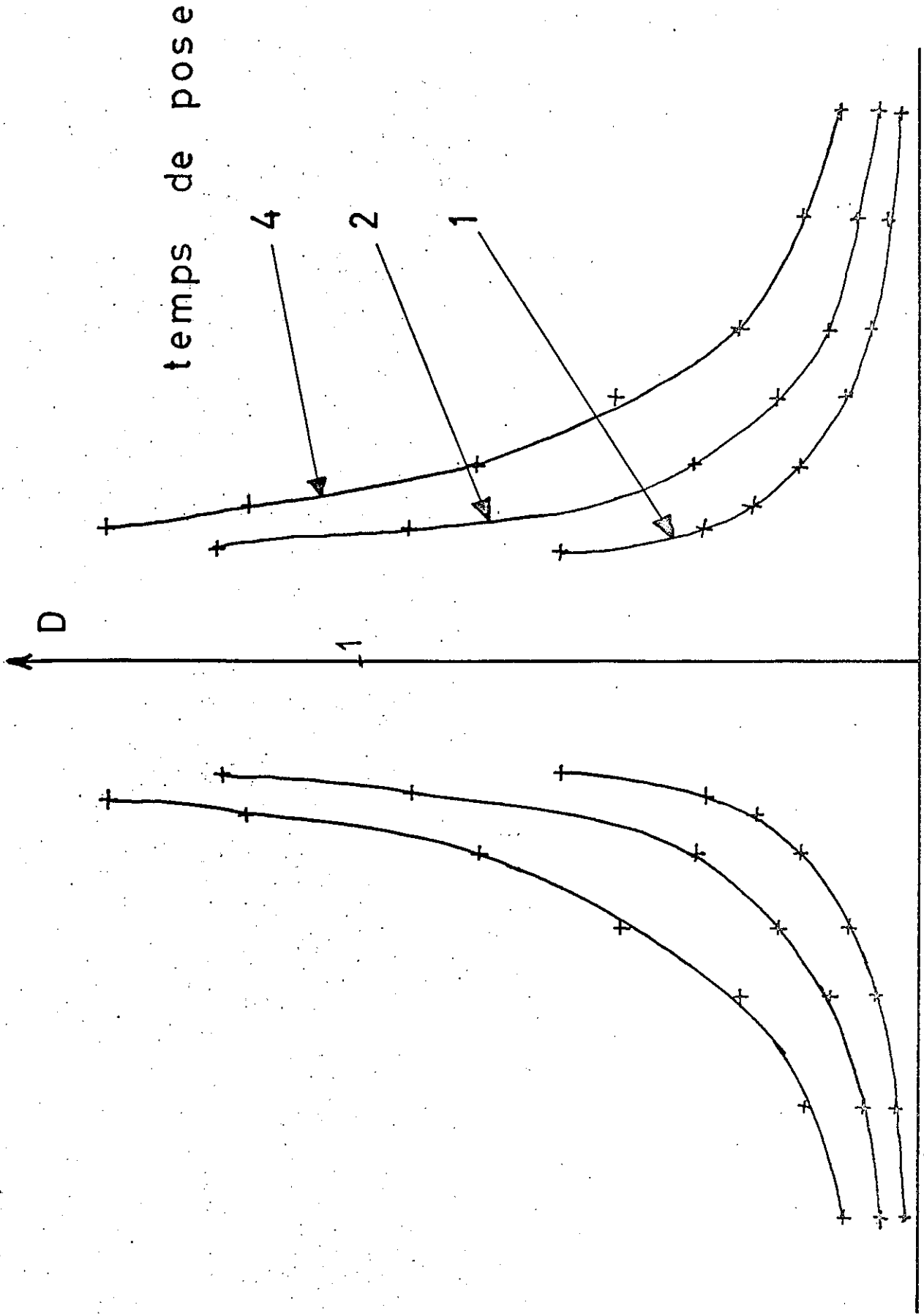


figure 7

III-2 Etude de la sensibilité de la photocathode

Placée sur la cathode de l'optique électronique, une photocathode n'évolue pas dans le temps. Bien refroidie et dans un bon vide, elle peut être conservée plusieurs jours sans rien perdre de son efficacité.

Une photocathode, cependant, n'a pas une sensibilité constante spatialement. Le système actuel d'évaporation ne permet pas d'atteindre une régularité parfaite. Nous donnons sur la figure 8 un exemple de photocathode particulièrement peu homogène.

Néanmoins, il est possible d'utiliser ces cathodes inhomogènes pour des mises au point optiques. Pour des mesures photométriques, on sélectionnera a priori les meilleures photocathodes, dont on aura établi une carte de sensibilité.

Nous donnons en exemple (sur la figure 9) de spectre cannelé modulé par un défaut de sensibilité, et sur la figure 10 un exemple de spectre cannelé particulièrement régulier sur un diamètre de la photocathode. Cette dernière figure montre également que l'étendue admise par l'objectif est presque constante pour tous les éléments spectraux frappant la caméra.

EVOLUTION DE LA SENSIBILITE D'UNE PHOTOCATHODE
SUR UN DIAMETRE

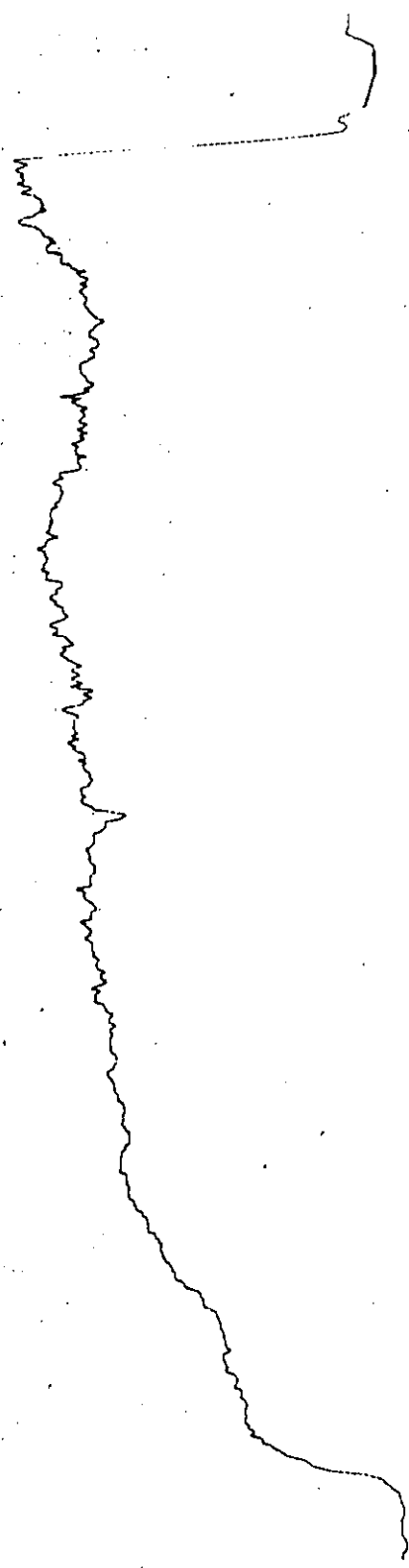


figure 8

EXEMPLE DE DÉFAUT DE SENSIBILITÉ

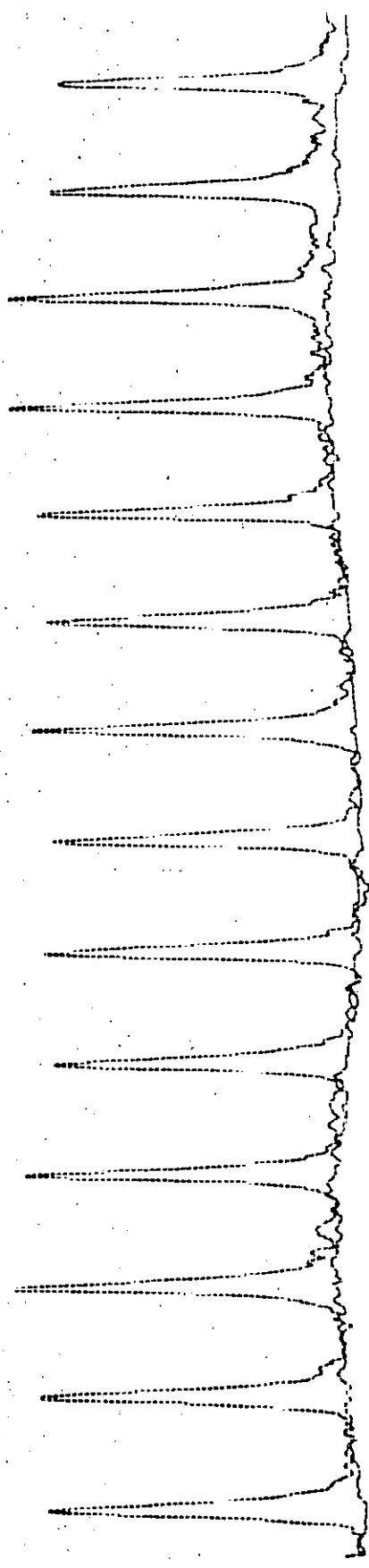


figure 9

SPECTRE CANNELÉ

ETUDE SUR UN DIAMETRE

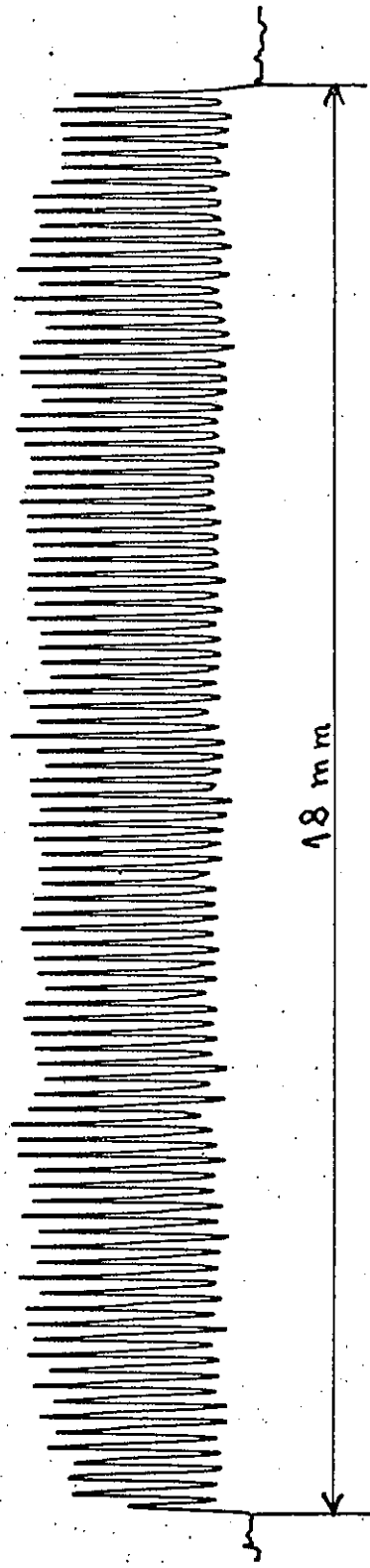


Fig 10

IV - REFERENCES TECHNIQUES

Nous groupons sous cette rubrique quelques renseignements susceptibles d'intéresser des personnes désirant également utiliser la caméra électronique LALLEMAND.

1 - La caméra électronique LALLEMAND a été entièrement réalisée à l'Observatoire de Paris, dans le laboratoire de Physique Astronomique dirigé par le Professeur LALLEMAND.

Nous avons participé au montage de notre optique électronique et aux essais de vide du tube laboratoire.

La technique définie par M. DUCHESNE et son équipe nécessite quelques mois d'apprentissage, elle se révèle, par la suite, sûre et efficace.

2 - Les photocathodes antimoine-Caesium sont préparées dans le même laboratoire par M. ALEXANDRE et son équipe, ou par M. BETZ. Un certain choix dans les rayons de courbure, dans les épaisseurs de verre et dans les revêtements sensibles permet d'adapter au mieux la caméra au spectrographe ou au télescope. Par ailleurs, des photocathodes de diamètre supérieur à 18 mm seront disponibles d'ici quelques mois (1967).

3 - Les plaques nucléaires Ilford sont disponibles sous quelques semaines chez l'importateur français Lumière ; le révélateur conseillé est le révélateur ID 19 de composition :

I D 19 (dose pour 1 litre)

Métol.....	2,2 g
Sodium sulphite, anhyd.....	72 g
Hydroquinone.....	8,8 g
Carbonate de Sodium, anhyd.....	48 g
Bromure de Potassium.....	4 g

Il est conseillé un bain d'arrêt : eau à 1 % d'acide acétique pendant quelques minutes.

Puis fixage par le fixateur "Radio AL 4" de chez Kodak.

4 - Appareillage

a) Les tensions d'accélération sont fournies par un générateur électrostatique D 4515 SAMES bi-tension : + 45 kV et - 15 kV, étudié spécialement pour la caméra électronique et assurant une excellente stabilité pendant plusieurs heures. L'affichage des tensions se fait par potentiomètres 10 tours de précision.

b) Une jauge à titane, fabriquée à l'Observatoire de Paris, est soudée à la caméra électronique. Elle permet à la fois de mesurer la pression et de l'abaisser grâce à son pouvoir de pompage. Elle est alimentée par un coffret IONIVAC de la SOGEV.

c) Le groupe de pompage est constitué d'une pompe Beaudouin, type 102 G à palette et d'une pompe Edwards à mercure, type EM2.

CHAPITRE IV

MULTIRECEPTEUR

FONCTION D'APPAREIL

I Conditions de l'étude

Au cours des chapitres précédents, nous avons étudié le principe de l'appareil, sa constitution et son récepteur. Nous avons montré comment nous avons choisi les différents éléments optiques pour atteindre les performances attendues tant en luminosité qu'en résolution.

Dans ce chapitre, nous analysons les qualités effectives de notre SIMAC. Avant d'entreprendre une étude spectroscopique originale, il importe de connaître à fond les caractéristiques pratiques de l'appareil pour que son utilisation ultérieure soit optimale.

Pour un spectromètre monocanal, la fonction d'appareil est bien définie. Luminosité, résolution, étendue de faisceau, récepteur et toute grandeur physique caractérisant le flux transmis par le spectromètre et admis par le récepteur, sont connus tout au long du spectre.

Pour le SIMAC, il faut aussi définir une fonction d'appareil par récepteur élémentaire ; mais nous avons vu que notre méthode consiste à disperser spatialement les éléments spectraux sur la photocathode, soit sur environ 50.000 éléments équivalents à autant de photomultiplicateurs. C'est donc autant de fonctions d'appareil qu'il nous faut déterminer.

Dans ce chapitre, nous étudions les qualités des récepteurs et leurs

variations d'un point à un autre de la couche photoélectrique, sans prétendre individualiser chacun de ces points. Le problème est donc d'abord de savoir comment les informations sont réparties et enregistrées par la caméra électronique, puis comment elles sont rendues par le micro-densitomètre utilisé. Nous décrivons donc les qualités globales du système et non celles de la seule caméra.

Nous avons restreint notre étude par l'emploi :

- de la seule plaque nucléaire Ilford G5
- d'un seul rapport de tension d'accélération
- d'un seul révélateur, utilisé dans les mêmes conditions.

Des considérations plus générales ont été décrites par M. Duchesne (Journal des Observateurs, à paraître fin 1967).

Nous nous sommes donc intéressé à une seule gamme de flux de photons : celle qui produit une densité allant de 0,2 à 1,5 sur la plaque G5 dans nos conditions de travail. Nous dirons comment on peut extrapoler nos résultats.

II Etude du Contraste - Fonction de transfert.

1 - Méthode

La fonction de transfert caractérise bien un récepteur d'image. Aussi c'est elle que nous avons cherché à obtenir en premier lieu.

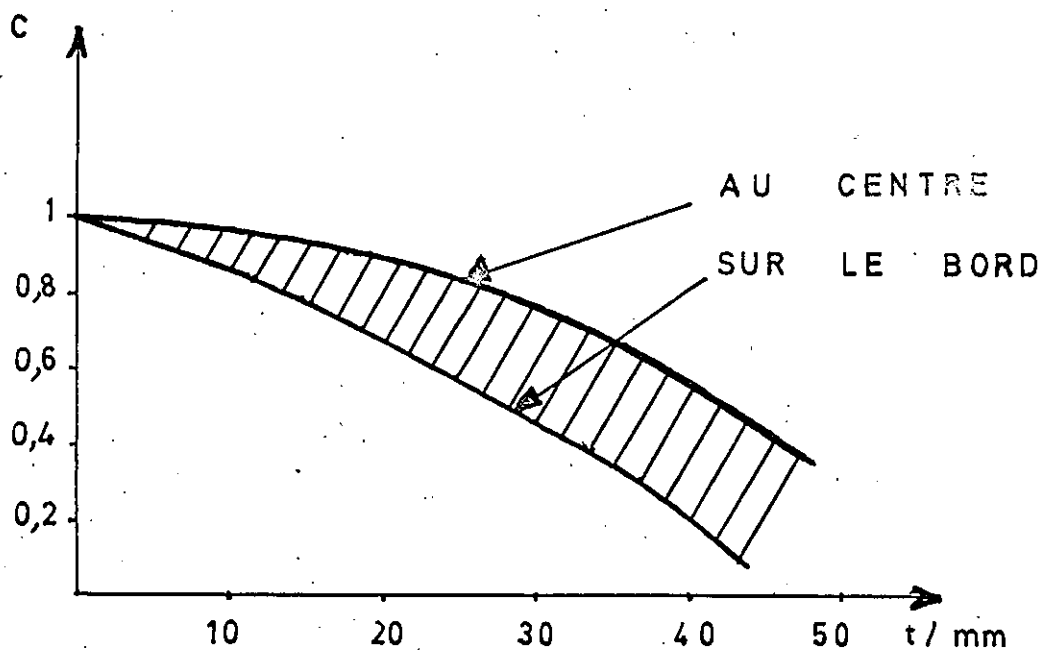
Nous projetons sur la caméra un spectre cannelé de finesse voisine de 2, de la manière suivante. Notre montage se prête bien à la réalisation de différentes fréquences spatiales. Nous éclairons en lumière blanche l'étalon de Fabry-Pérot d'intervalle entre ordre $\Delta\sigma$ et nous ajustons la largeur d de la fente du spectrographe pour que $\Delta\sigma \approx 3 d$ ce qui produit une distribution spatiale d'intensité quasi sinusoïdale dans le plan focal de l'objectif. (Un revêtement de finesse réflectrice 2000 Å ($R = 0,25$) serait encore plus pratique.

La précision sur la mesure du contraste étant faible, il n'est pas nécessaire de s'assurer que la distribution soit parfaitement sinusoïdale. Pour une mesure exacte de la fonction de transfert, il serait nécessaire d'apporter des corrections à nos valeurs. En toute rigueur, nous devons donc dire que nous donnons l'aspect général de cette fonction.

2 - Mesure

Nous voyons sur la figure 11 la variation du contraste en fonction de la fréquence spatiale. La forte courbure de champ de l'optique électronique non parfaitement corrigée est responsable, en grande partie, de la différence de contraste assez sensible entre le centre de la photocathode et le bord. Il existe également une distorsion visible sur le cliché n° 5. Cette distorsion imposerait que la fente du densitomètre soit orientable au cours de l'exploration d'un ordre du spectre. Ceci serait possible du fait que la distorsion est fixée pour une optique donnée et pour un point du champ donné (Étude de la distorsion. Cl. BOUSSUGE, G. WLERICK,

VARIATION DU CONTRASTE
EN FONCTION DE LA FREQUENCE



FONCTION DE TRANSFERT

figure 11

N. COURTOIS et J. RÖSCH - Ann ASTROPH 27 (1964) p 104)

Malgré tout, une résolution de 40 paires de traits par mm avec un contraste de 0,2 a été obtenue. Avec notre optique électronique, il semble que ce soit une limite maximum (fig 12).

Notons que nous avons utilisé le contraste défini par :

$$C = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}}$$

D étant la densité mesurée au microdensitomètre. On peut aussi employer un critère peut-être plus parlant :

$$\gamma = \frac{D_{\max}}{D_{\min}}$$

avec $C = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}$

Ainsi la limite de 40 cannelures par mm est obtenue avec $\gamma = \frac{D_{\max}}{D_{\min}} = 1,5$

III Rapport Signal sur Bruit.

1 - Présentation du problème

Supposons que tous les récepteurs élémentaires soient équivalents. Si nous envoyons sur chacun d'eux un même signal obtenu avec un spectre blanc échantillonné par l'interféromètre de Fabry-Pérot (figures 14, 15, 16) nous pouvons mesurer la densité maximum (D_{\max}) pour un certain nombre de pics (par exemple une vingtaine) et calculer l'écart quadratique ΔD sur la mesure d'un même signal. On obtiendra ainsi un rapport signal sur bruit :

$$\rho = \frac{D_{\max}}{\Delta D}$$

VARIATION DU CONTRASTE EN FONCTION
DE LA POSITION SUR LA PHOTOCATHODE

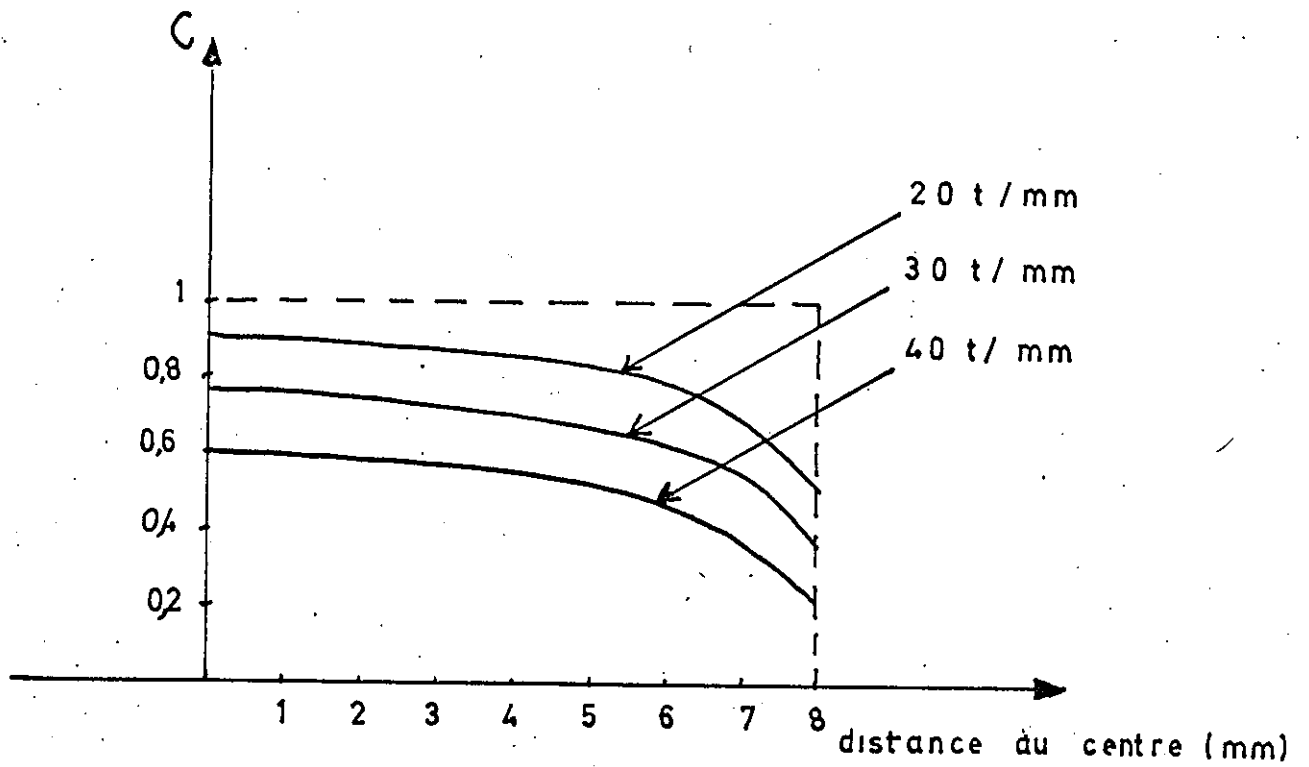


figure 12

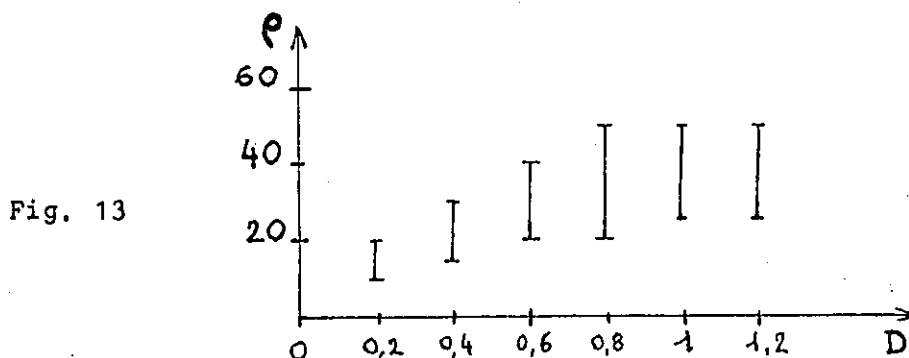
Ce rapport n'est pas obtenu en enregistrant successivement le même signal sur le même récepteur, mais en enregistrant simultanément le même signal sur des récepteurs identiques.

L'aspect d'un enregistrement obtenu au microdensitomètre est assez différent de celui qui est obtenu avec un photomultiplicateur (fig. 17 et 18) s'il y a de la diffusion dans la plaque, et si la fente d'exploration n'est pas très petite par rapport à la largeur de la raie sur la plaque: dans ce cas, la convolution distribution de densité par fonction fente a pour effet de lisser la raie, de l'élargir, et de diminuer la densité maximum. Nous n'avons pu descendre au-dessous d'une fente d'exploration de 5 μ avec le densitomètre utilisé et la hauteur de fente limitée dans notre méthode. C'est pourquoi on ne doit pas s'étonner de l'aspect des raies. Il est bien entendu que pour un dépouillement plus correct, il sera absolument nécessaire de disposer d'un densitomètre adapté aux faibles surfaces d'image et aux déplacements très petits nécessitant un grandissement de l'ordre de 1 000.

2 - Application.

Nous avons enregistré le même spectre cannelé avec des temps de pose variables pour obtenir une relation entre le rapport signal sur bruit ρ en fonction de la densité, pour un signal modulé, et non pour une plage uniformément éclairée.

Cependant, la gamme de variation de D et les possibilités du densitomètre utilisé ne nous donnent qu'une indication (fig. 13)



Si le récepteur élémentaire est équivalent à un multiplicateur, le rapport Signal sur Bruit ρ doit augmenter avec le nombre de photons N , et avec la densité D , puisque la caractéristique est linéaire.

Dans la région $D = 0,2$ à $D = 1,2$, on voit que ρ croît, mais étant donnée l'incertitude de mesure, on ne peut dire si $\rho = \sqrt{D}$. L'incertitude vient de ce que sur une même plaque, ρ peut varier de 30% par suite des défauts d'image, de photocathode ou de plaque. De plus, pour une même photocathode, on obtient un rapport signal sur bruit de plus en plus élevé d'une plaque à la suivante. En effet, le vide s'améliore constamment, et les microdécharges diminuent progressivement. En fin de compte, il est nécessaire de préparer la caméra le plus longtemps possible à l'avance (24 heures par exemple).

3 - Augmentation du rapport Signal sur Bruit ρ .

Le seul moyen d'augmenter ρ est d'augmenter le nombre de photons. Cependant, au-delà de $D = 1,2$ la mesure de densité devient plus difficile, la loi de linéarité moins vérifiée. Il faut alors changer les conditions de travail. On peut jouer:

- sur la tension d'accélération, pour diminuer la dimension de la trace des photoélectrons;
- sur le révélateur;
- sur la taille des grains de la plaque en changeant de plaque.

Toutes ces opérations reviennent à utiliser des plaques de plus en plus fines, de même qu'en photographie classique. Si l'on dispose d'un flux de photons important, on peut augmenter la surface du récepteur élémentaire. (Réf. V.12).

Il apparait cependant qu'une précision supérieure à 1% est rarement atteinte pour des raisons techniques telles que:

- inhomogénéité des plaques;

- inhomogénéité du révélateur;
- défauts propres au densitomètre: défaut d'entraînement, d'éclairement, de stabilité.

C'est dire que le rapport Signal sur Bruit est actuellement limité et que le problème du dépouillement devient de plus en plus urgent à résoudre pour profiter des qualités des récepteurs photographiques.

Si on dispose d'un nombre de photons tel que l'on pense obtenir un rapport Signal sur Bruit supérieur à la limite, on utilisera ce flux pour augmenter la résolution, ou diminuer le temps de pose.

IV - Application au balayage SIMAC.

Nous voyons, figure 14, que la largeur t de la fonction d'appareil $T(\sigma)$ du disperseur correspond sur la plaque à une largeur de 15 à 20 μ . Lors de l'exploration des intervalles entre ordres du Fabry-Perot, on déplace l'image de la fente d'entrée en même temps que varie la pression dans l'enceinte contenant l'interféromètre. On réalise sur la plaque la convolution de la fonction de transfert $W(\sigma)$ du Fabry-Perot avec la fonction $T(\sigma)$.

On sait que les meilleures conditions de luminosité à résolution donnée sont atteintes lorsque les largeurs des fonctions convoluantes sont égales (Réf. II.2).

L'adaptation des largeurs se fait par le choix des diaphragmes (Réf. III.3) et des vitesses de balayage de l'image sur la photocathode. On voit que la limite de résolution spatiale ne peut, en aucun cas, être inférieure à 1,5 fois la largeur de $T(\sigma)$ lorsque $t = W$ largeur de la fonction d'appareil du Fabry-Perot (Réf. II.2, p.19).

A cette limite de résolution spatiale, on fait correspondre une limite de résolution $\delta \sigma$ aussi petite que l'on veut, car la résolvançe du Fabry-

Perot est théoriquement illimitée. En pratique, la résolution est limitée pour nous par la largeur des raies. Ainsi, avec une cathode creuse, les raies ont une largeur de l'ordre de 30 mK. Nous avons donc adapté notre spectromètre à cette source en prenant:

$$\Delta \sigma = 500 \text{ mK}$$

avec une finesse de l'ordre de 25, on peut réaliser $W = t = 20 \text{ mK}$.

Alors, largeur de raie et largeur de fonction d'appareil sont du même ordre, et nous avons réalisé l'adaptation optimum.

SPECTRE CANNELE

12 cannelures/mm

$S \approx 1500 \mu^2$

1 mm sur la plaque

$\epsilon = 8 \mu$

Δf_p

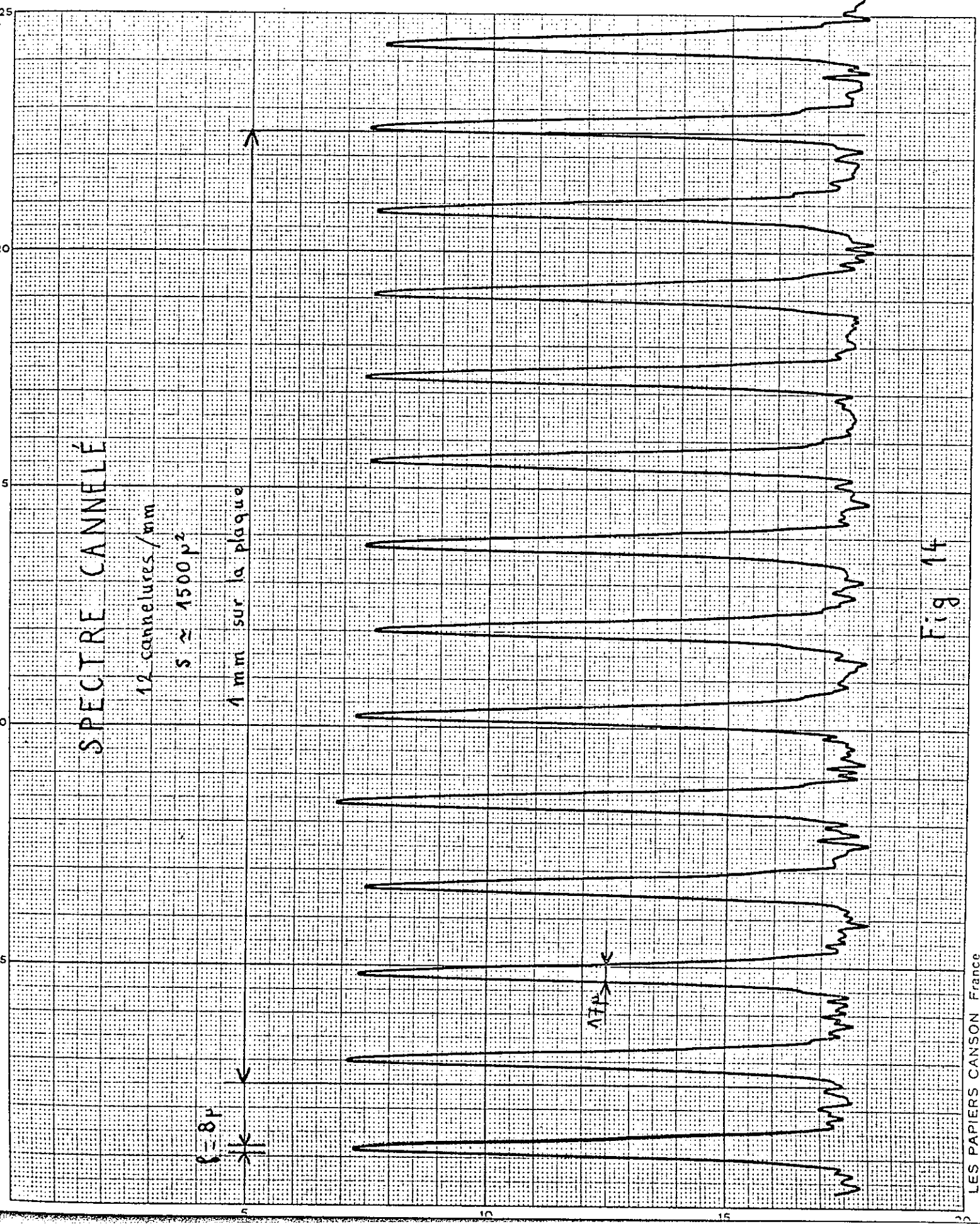


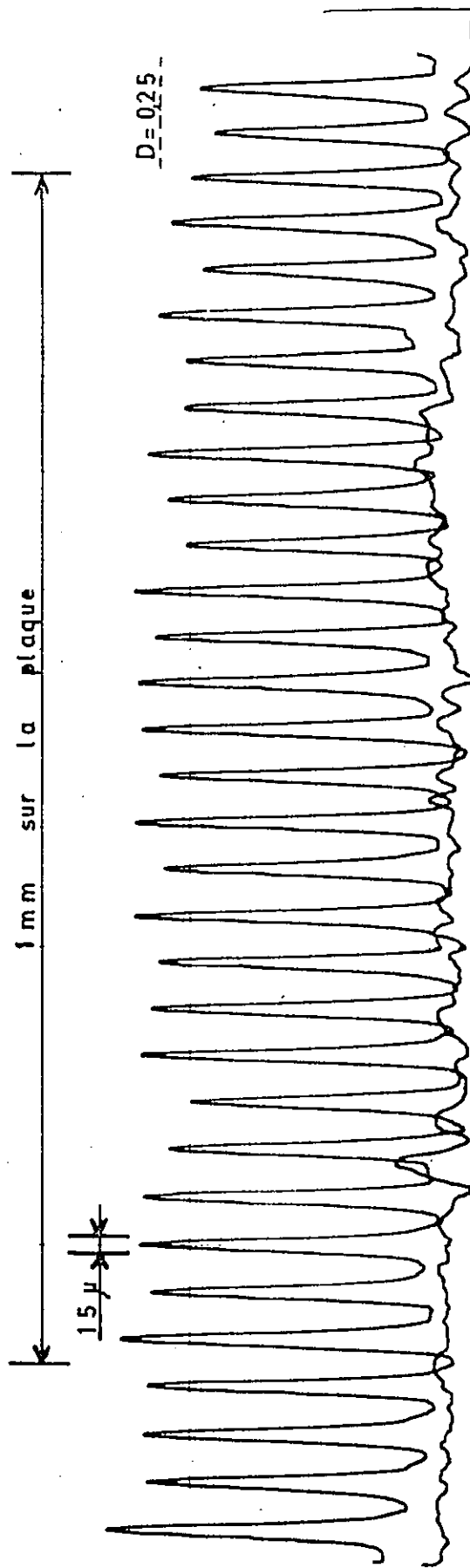
Fig 14

SPECTRE CANNELE

25 cannelures par mm

fente $15 \mu \times 100 \mu$

$\Delta \sigma = 716 \text{ mK}$



RESOLUTION DU DISPERSEUR 60000

figure 15

SPECTRE CANNELÉ (40 cannelures / mm)

1000 μ sur la plaque

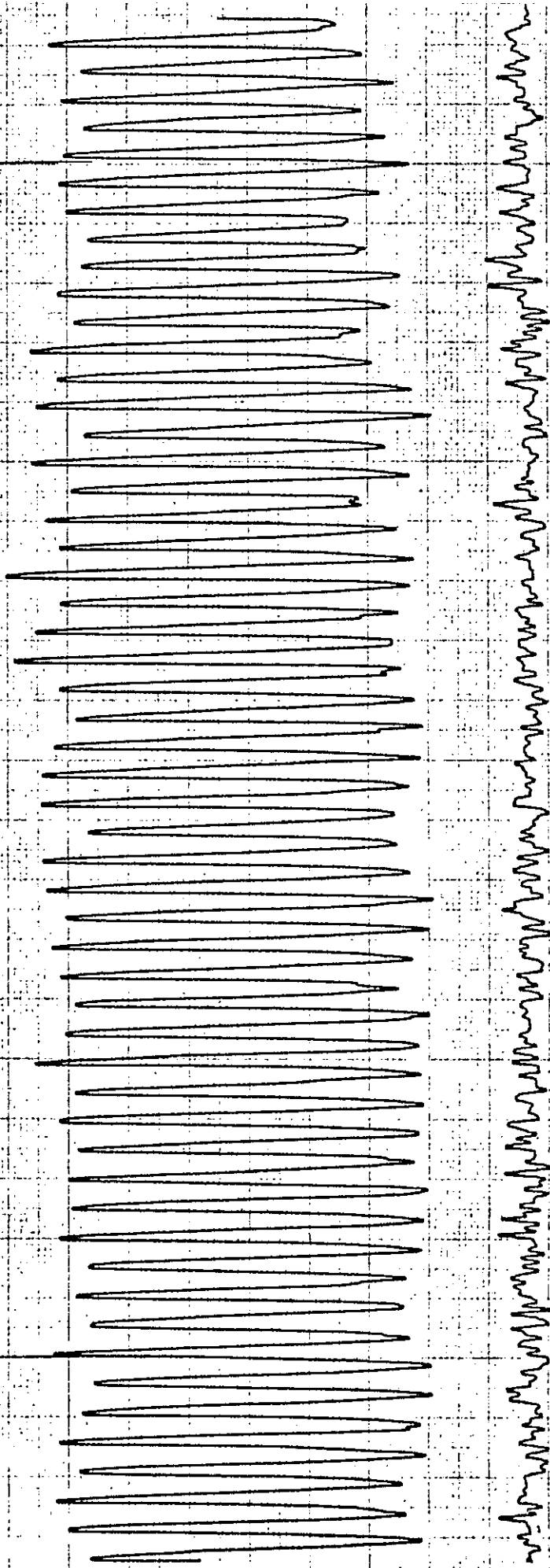


Fig. 16

C H A P I T R E V

RESULTATS

I - INTRODUCTION

Ayant mis au point un nouvel appareil, nous l'avons utilisé dans un premier temps pour étudier sa fonction d'appareil, puis dans un second temps pour étudier quelques exemples simples de spectre pour vérifier la bonne marche du SIMAC photoélectrique par comparaison avec des mesures faites à HYPEAC.

Nous n'avons pas cherché à obtenir de résultats nouveaux avant d'être sûr que le SIMAC était capable d'atteindre les performances attendues. Ce que nous allons décrire est donc une suite de tests que nous avons fait subir au SIMAC photoélectrique lors de sa mise au point. Ces tests se présentent comme une illustration de la méthode.

II - SPECTRES A BASSE RESOLUTION

La qualité des enregistrements SIMAC tient essentiellement dans la bonne mise au point de l'ensemble objectif-caméra électronique. Nous avons décrit au Chapitre III les divers réglages de la caméra : ils peuvent être faits indépendamment du spectrographe et consistent principalement à focaliser correctement les électrons sur la plaque nucléaire.

La première difficulté a donc été d'obtenir sur l'ensemble du champ de la photocathode une focalisation optique aussi excellente que possible. Ayant fixé l'objectif basculable en une position reproductible malgré ses mouvements, il convenait de faire coïncider exactement l'axe de l'objectif avec l'axe de la caméra, puis

de faire monter ou descendre la caméra jusqu'à ce que la mise au point soit optimale.

N'ayant pas de lunette d'ouverture suffisante ($f/3,3$) pour viser directement le foyer de l'objectif et la photocathode, nous avons procédé par ajustement successif. La question épineuse de la stabilité mécanique de la caméra dans son tube de verre a été résolue de facto. En effet il s'est avéré à l'usage que le bâti assez rudimentaire, que nous avons conçu à l'origine, nous a donné entière satisfaction. Aucun dérèglement appréciable n'a pu être noté entre mars et juillet 1967 pour une série de 120 plaques. C'est dire que malgré les nombreuses manipulations de l'objectif et de l'optique électronique, nous avons pu maintenir l'ensemble du système en position à $1/10$ mm environ, au prix d'un grand nombre de précautions et d'un soin extrême. La technique minutieuse et sûre de la caméra électronique acquise à l'Observatoire de Paris, nous a permis d'atteindre cette précision. Cependant il est souhaitable que la reproductibilité du réglage soit assurée optiquement dans une version future de notre appareil, alors qu'actuellement c'est avec un jeu de cales d'épaisseur que nous positionnons la caméra.

L'introduction du Fabry-Perot et du diasporamètre n'apportant rien au réglage optique, nous avons commencé la mise au point avec une source cathode creuse, émettant des raies beaucoup plus fines (de 20 à 50 mK) que la fonction d'appareil du disperser croisé (300 à 400 mK). Nous obtenions ainsi un grand nombre de raies dans le champ, d'intensité variable mais connue. Nous donnons (photo 7) un exemple de spectre à basse résolution sans Fabry-Perot ni diasporamètre. La largeur des raies sur la plaque nucléaire est de l'ordre de 15 à 20 μ . La fente d'entrée n'est pas uniformément éclairée. En effet nous travaillions dans ce cas, avec une hauteur de fente deux à trois fois supérieure à celle qui est possible pour un spectrogramme SIMAC à haute résolution.

Le test le plus simple est cependant obtenu avec un Fabry-Perot, mais sans

layage de pression ou de diasporamètre : il consiste à étudier un spectre cannelé. Nous avons décrit la méthode et nous n'y revenons que pour mémoire. Dans ce cas toutes les raies ont une intensité égale et on obtient au densitomètre la fonction d'appareil relative à chaque point de la photocathode. Un exemple est donné figure 10 au Chapitre III.

Ces résultats préliminaires montrent que le montage actuel est utilisable pour des résolutions de l'ordre de 50 000, sur un domaine spectral couvrant le spectre visible et pouvant aller jusqu'à $1,1\mu$ avec une photocathode spéciale, fabriquée à l'Observatoire de Paris (Réf. IV-4).

III - ENREGISTREMENT SIMULTANÉ SIMAC - HYPEAC

Nous allons décrire notre première expérience avec la caméra électronique, que nous avons exposée brièvement au Colloque de Spectroscopie Instrumentale de Orsay 1966 (Réf. III-2).

La question posée était celle-ci : étant donné que la caméra électronique utilise une photocathode antimoine-caesium comme récepteur primaire, elle doit avoir les mêmes caractéristiques fondamentales qu'un photomultiplicateur. En d'autres termes, il doit être possible d'enregistrer, dans le même temps et dans les mêmes conditions une même information, spectroscopique ou non.

Dans le but de vérifier cette proposition, nous avons dérivé la moitié du signal issu d'un HYPEAC pour le diriger sur la photocathode de la caméra électronique. Ayant isolé au monochromateur la raie $5354,88 \text{ \AA}$ du Terbium, nous avons enregistré sa structure hyperfine par balayage de l'image spectrale sur la photocathode ; dans le même temps un photomultiplicateur recevait le flux transmis par chaque élément spectral.

Nous donnons figure 17 le résultat de l'expérience. Il est bien vérifié que

photomultiplicateur et caméra électronique sont capables d'enregistrer dans le même temps la même information. On a pu également vérifier la loi de linéarité : densité-éclairage ; cela est décrit au Chapitre III, relatif aux propriétés propres à la caméra. La remarque essentielle qui ressort de la vue des enregistrements est que la qualité des enregistrements au microdensitomètre est inférieure à celle obtenue par le photomultiplicateur. Il y a donc une perte de rapport signal sur bruit.

Cette perte est facilement explicable et ne semble pas fondamentale. Elle tient à ce que nous n'avons pas utilisé toute la surface de la photocathode. En conséquence, la surface réceptrice affectée à chaque élément spectral est de beaucoup inférieure à celle qui était disponible. En multipliant par 100 cette surface, nous aurions obtenu un rapport signal sur bruit environ dix fois plus élevé, déjà assez proche de celui que l'on peut obtenir avec un photomultiplicateur. Nous avons donné au Chapitre IV une vue générale sur ces problèmes, que cet exemple illustre bien.

Nous donnons figure 18 la comparaison faite sur la raie 5005 \AA du Plomb, dans les mêmes conditions expérimentales.

IV - STRUCTURE DE LA RAIE 5460 \AA DU MERCURE

Les résultats précédents n'ayant pas été obtenus sur le montage définitif, nous avons repris brièvement cette étude sur la raie 5460 \AA du mercure. Nous pouvons enregistrer simultanément sur la caméra électronique et sur photomultiplicateur ; en effet si l'ordre 45 du réseau par réflexion renvoie la raie verte dans le champ de l'objectif, l'ordre 47 renvoie la raie verte en Littrow sur un photomultiplicateur placé au voisinage du trou d'entrée (cf. infra.Ch V-6).

Le principe de mesure est simple. Il convient cependant de prendre quelques

précautions essentielles : si le photomultiplicateur a un rendement quantique constant lors du balayage, il n'en est pas de même pour les différents points de la photocathode: nous avons donné un exemple d'inhomogénéité particulièrement prononcé au Chapitre III.

Il faut donc mesurer la sensibilité en tout point ou au moins aux points où viendront se focaliser les éléments spectraux intéressants. Une première méthode consiste à relever a priori une carte de sensibilité. Une seconde méthode sera d'enregistrer un flux que l'on sait constant sur le segment intéressé ; sur une première plaque on bloque la pression dans la cloche du Fabry-Perot et on déplace l'image grâce au diasporamètre, sur la seconde plaque on déplace à la fois l'image et la bande passante du Fabry-Perot. Il ne reste plus qu'à faire un rapport de densité pour obtenir l'intensité relative vraie.

Une approximation de cette méthode consiste à enregistrer sur deux pistes voisines parallèles et le flux constant et la structure. En général la sensibilité ne varie guère sur $1/10$ mm et cette méthode suffit généralement dans le cadre de mesures à 5 %.

Nous donnons sur le cliché n° 8 plusieurs enregistrements de la raie verte 5460 \AA dans les conditions : lampe Hg basse pression (Philips) : $\delta \sigma = 50 \text{ mK}$
 $\Delta \sigma = 720 \text{ mK}$, pour un revêtement diélectrique 5 couches à 5150 \AA .
La finesse enregistrée sur ce cliché est de l'ordre de 12. Cette finesse relativement faible est due à la largeur de raie. Nous utiliserons dorénavant une source à raie plus fine (20 mK) permettant de doubler la finesse.

V - ENREGISTREMENT A HAUTE RESOLUTION DU SPECTRE DU PLOMB MONOISOTOPIQUE

Ayant montré la possibilité d'obtenir une structure hyperfine ou isotopique avec la caméra électronique, la généralisation à un spectre comportant un bon nom-

bre de raies nous dira si la méthode est valable.

Nous donnons sur le cliché n° 9 un exemple de "simacogramme". Nous avons balayé deux ordres successifs du Fabry-Perot, ainsi chaque raie apparaît deux fois : la mesure de la finesse et de la résolution est immédiate. On peut voir que pour une finesse de l'ordre de 20, la résolution effective est de l'ordre de 800 000.

L'intensité dans la cathode est de 30 mA, la pose est de 5' par ordre. La densité obtenue n'est pas optimale dans tous les cas : certaines raies sont nettement sous-exposées ou sur-exposées. On voit donc qu'il serait nécessaire de prendre environ trois poses pour que toutes les raies puissent être enregistrées dans une gamme de densité de 0,3 à 1,2, gamme qui correspond au meilleur rapport signal sur bruit.

Il faut remarquer la densité du fond de plaque qui est loin d'être négligeable pour une pose de plusieurs minutes. Ce fond est dû principalement aux réseaux qui diffusent beaucoup de lumière, au diasporamètre qui introduit aussi une certaine diffusion ainsi que quelques images secondaires très faibles qui apparaissent pour des poses longues. Ces défauts ne sont pas inhérents à la méthode, mais au montage. Des perfectionnements seront apportés pour limiter ce fond. Il faudrait, en premier lieu, remplacer le réseau par transmission par un réseau par réflexion d'excellente qualité ; en second lieu il conviendrait de remplacer le balayage par diasporamètre par un balayage magnétique de l'image à l'intérieur de la caméra électronique. Ceci pourrait être réalisé sur un deuxième type de SIMAC photoélectrique.

L'aspect du cliché n° 9 est assez confus. En effet nous n'avons pas enregistré sur la même plaque un spectre cannelé, un spectre repère et un spectre à basse résolution. Pour une exploitation effective, il serait nécessaire de procéder ainsi qu'il a été décrit dans l'article de R. CHABBAL et R. PELLETIER. Nous ne donnons

ce cliché qu'à titre d'exemple, étant bien entendu qu'il reste un chemin à parcourir pour atteindre un stade où les plaques seront dépouillées systématiquement. Pour nous, nous nous sommes attachés à montrer que la méthode était praticable et dans quelles conditions.

VI - TEST DE RESOLUTION AU PHOTOMULTIPLICATEUR.

Avant de prendre les clichés avec la caméra électronique, nous nous assurons du réglage du spectromètre en utilisant notre appareil comme un HYPEAC, (figures 19 et 20). Pour cela, nous avons monté un photomultiplicateur au voisinage de la fente d'entrée du disperser croisé (figure 21).

Nous pouvons également enregistrer une raie au photomultiplicateur pendant l'enregistrement Caméra ; en effet, les ordres K et $K+2$ du réseau par réflexion tombent sur chacun des récepteurs. On peut ainsi contrôler la finesse au cours d'une pose.

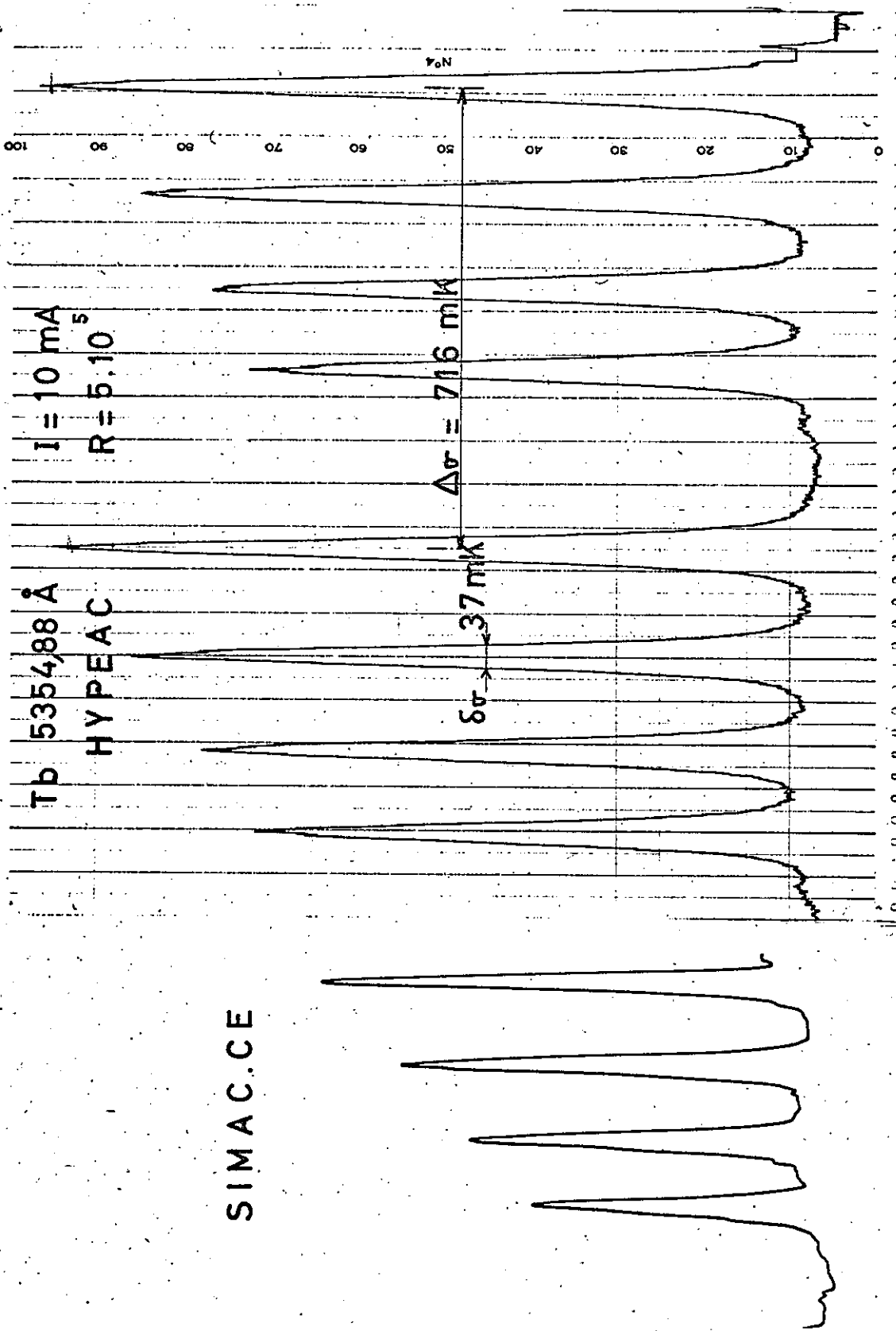
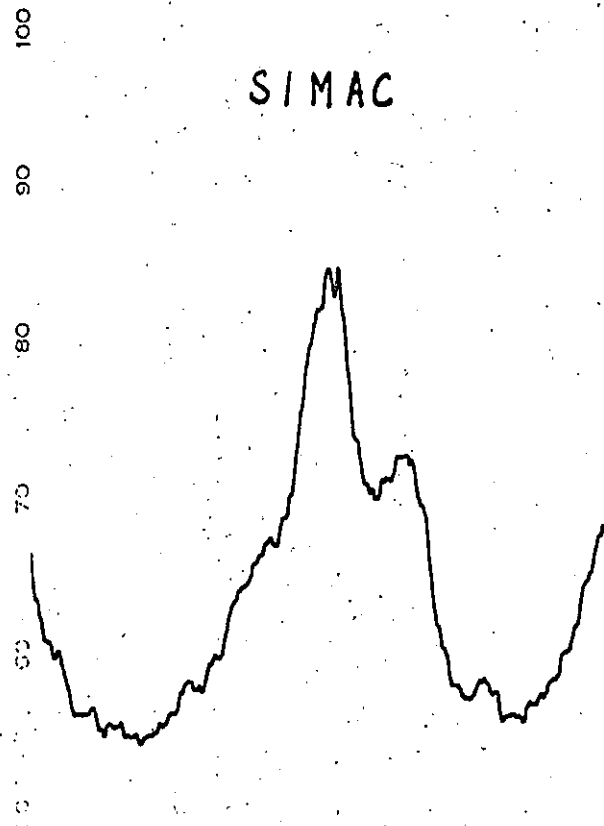


Fig 17

Pb 5609 Å
 $\Delta\sigma = 250 \text{ mK}$
2 minutes par ordre



HYPEAC

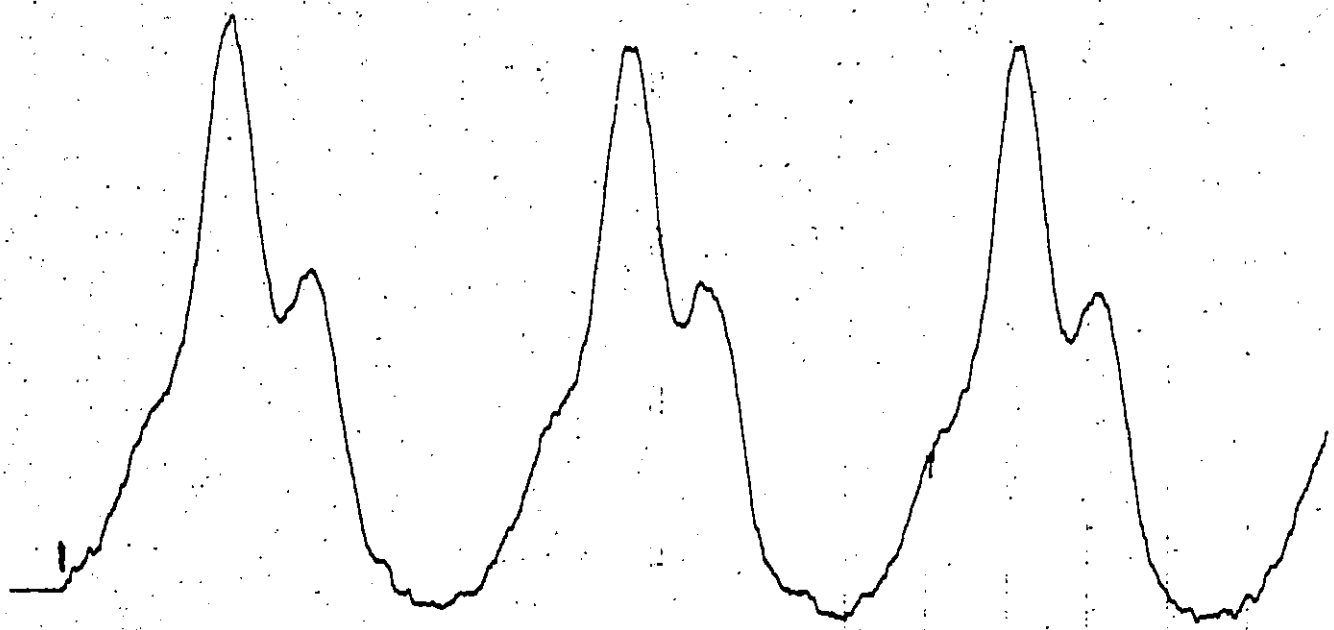


Fig 18

— TEST AU PHOTOMULTIPLICATEUR —

Hg 5460 Å

$\Delta\sigma = 1700 \text{ mK}$

50 v. 10 M Ω

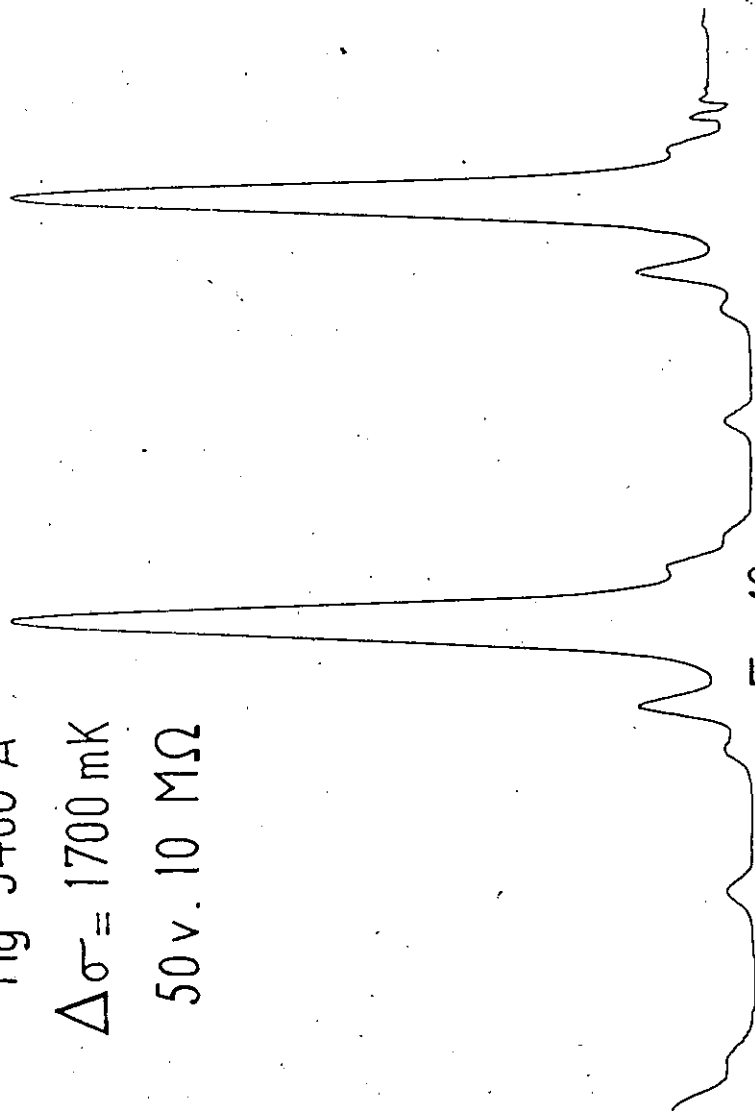


Fig. 19

Tb 5388 Å

$\Delta\sigma = 720 \text{ mK}$

$I = 25 \text{ mA}$

S3 - 320 MΩ - 1 sec.

FP = 5150 Å - $5\frac{1}{4} \lambda$ - 1 cm^2

$\delta\sigma = 46 \text{ mK}$

$N = 15$

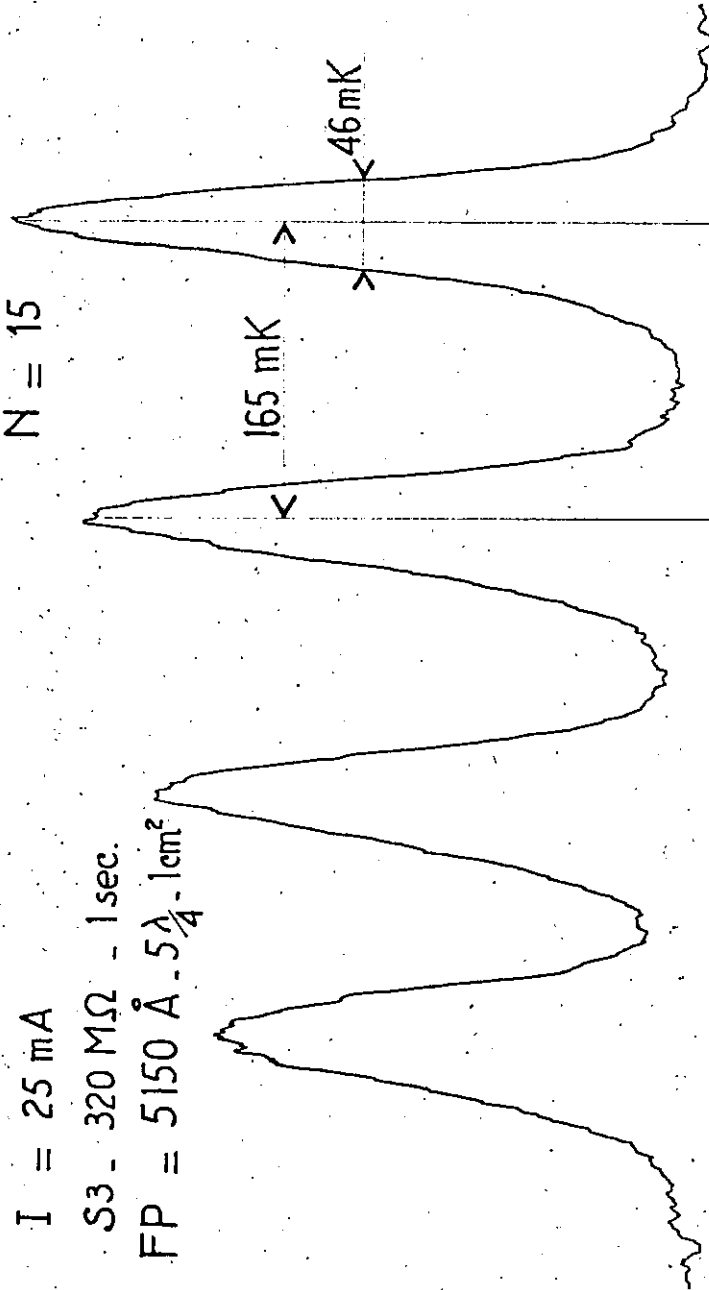
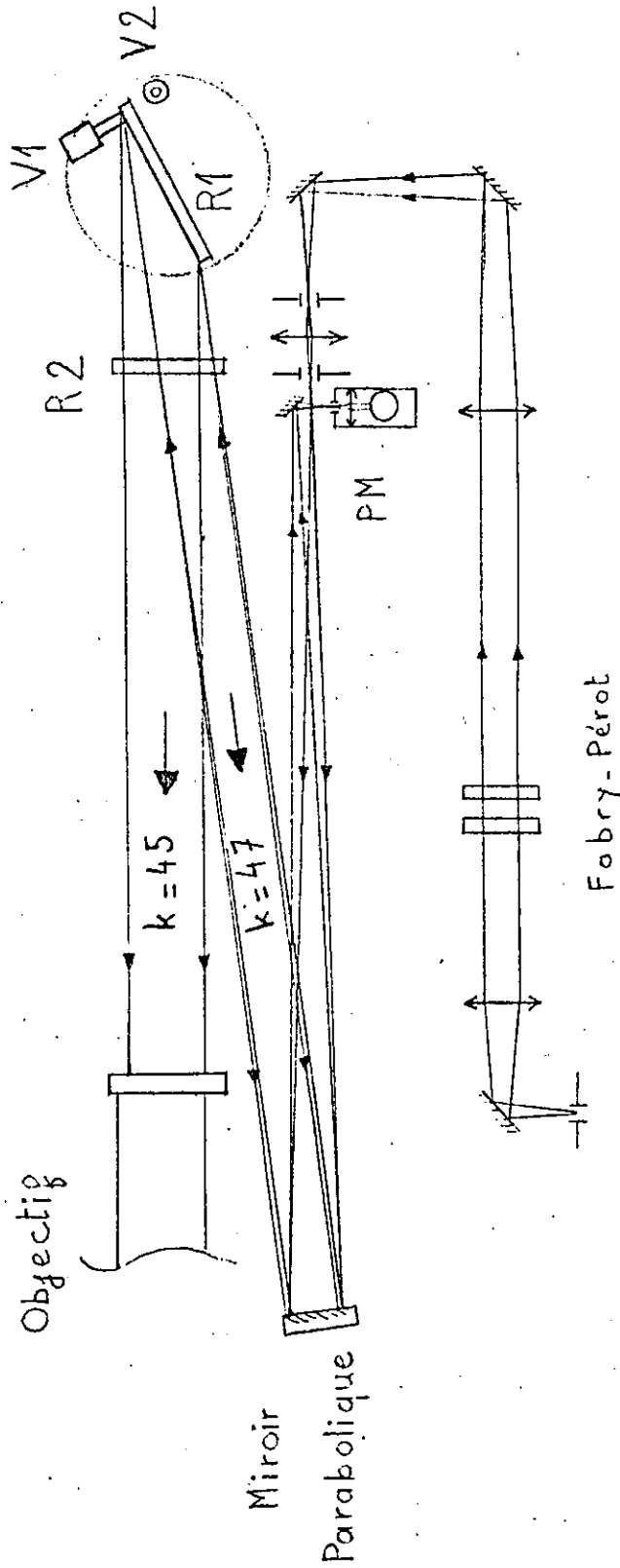


Fig. 20

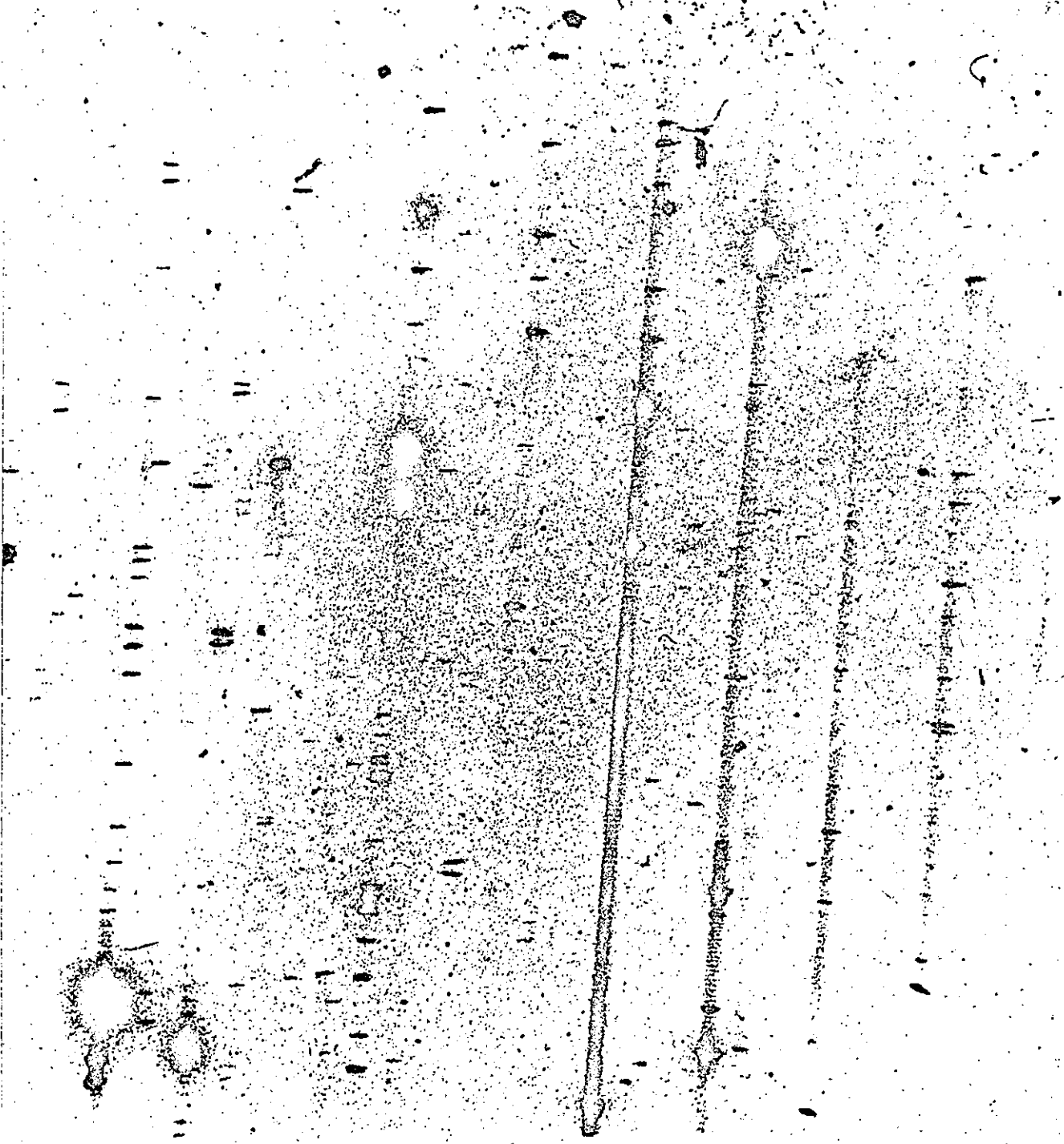
UTILISATION EN SPECTROMETRE FABRY-PÉROT MONOCANAL

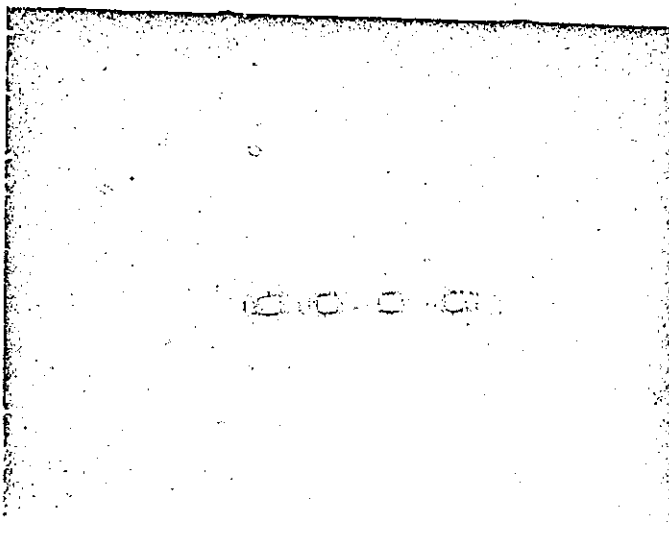
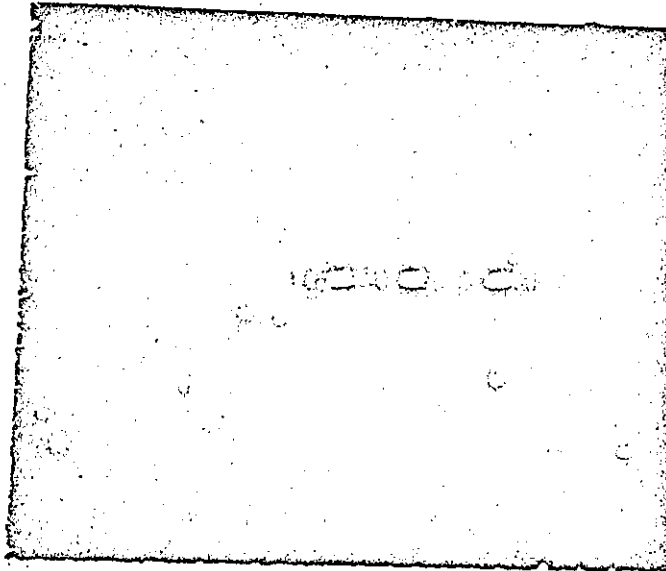
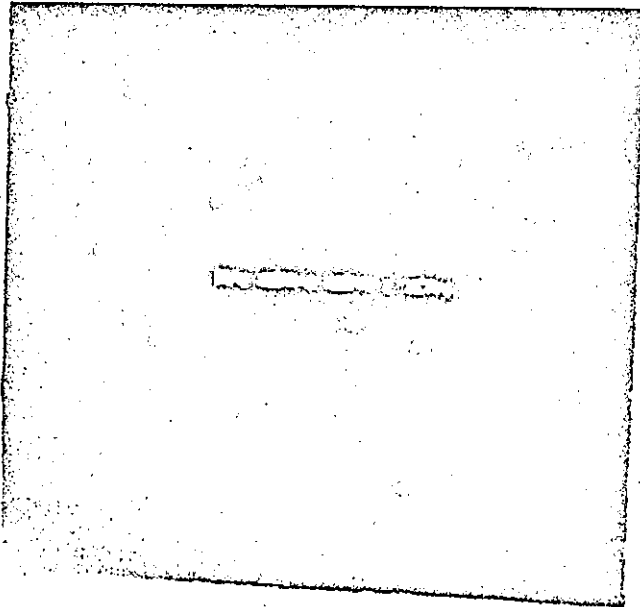
MONOCHROMATEUR



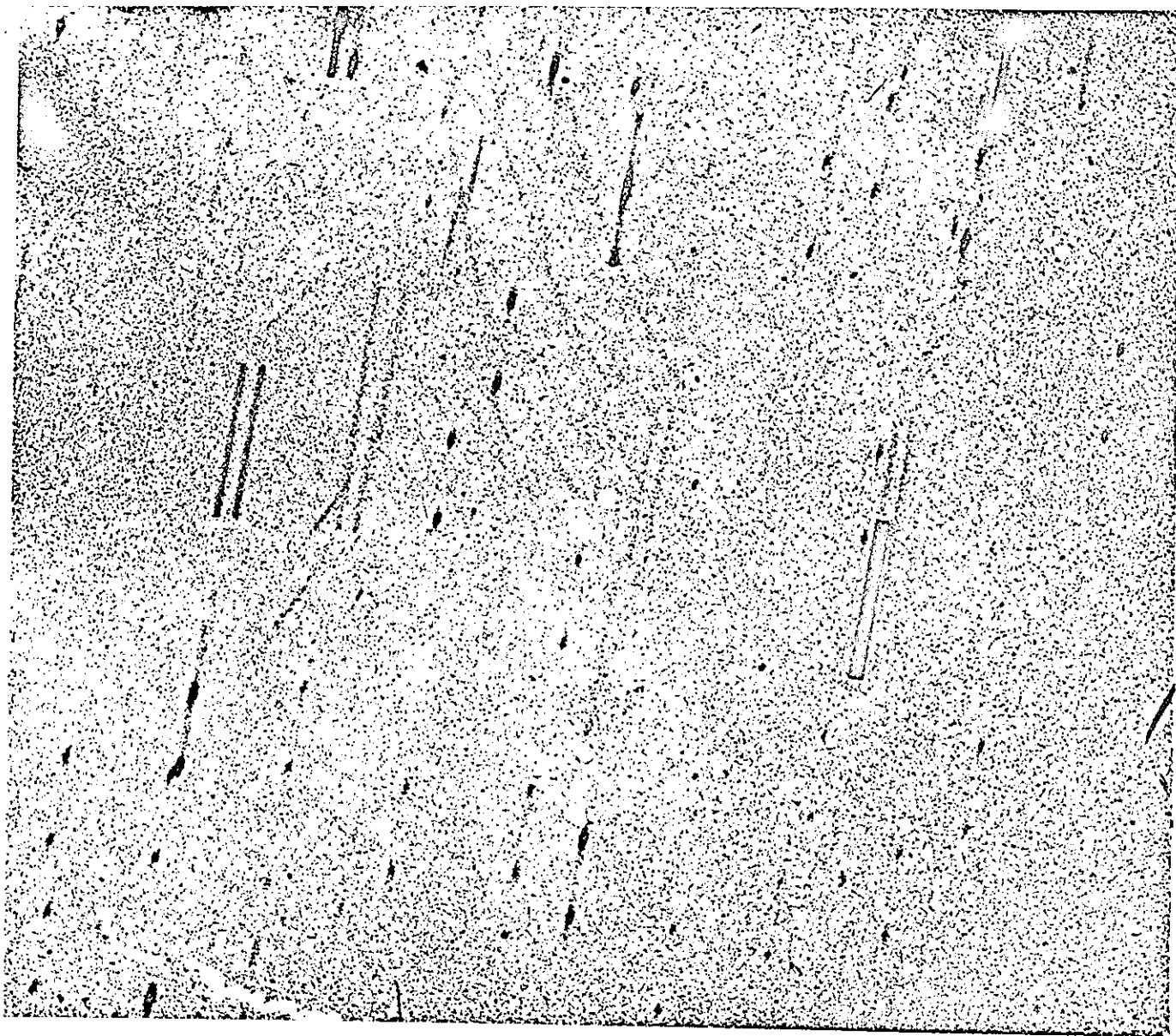
Note: chaque raie doit être repérée à l'aide des deux vis V1 et V2

Figure 21





Vue 8



Vue 9

C O N C L U S I O N

Notre travail a consisté à mettre au point un nouveau S I M A C utilisant non plus une plaque photographique comme multirécepteur, mais une caméra électronique LALLEMAND. Par cette transformation nous pensons avoir gagné :

- sur le rendement quantique du détecteur, dans un facteur de l'ordre de 30 à 50 selon les régions spectrales, d'où un gain en rapidité qui pourra nous permettre d'enregistrer en quelques minutes les spectres de sources à faible durée de vie.
- en sensibilité, en effet en l'absence de seuil photographique des flux très faibles sont détectables.
- en bruit, car les plaques nucléaires sont beaucoup plus fines que les plaques photographiques et le bruit propre de la couche photoélectrique est négligeable.

Ces divers facteurs sont dûs en propres à la caméra électronique et font que cet instrument pourrait être beaucoup plus utilisé en spectroscopie en concurrence avec le photomultiplicateur.

L'analogie entre ces deux récepteurs photoélectriques et leur capacité similaires à recueillir les informations spectroscopiques classent l'HYPEAC et le SIMAC dans la même famille de spectromètre : ces deux spectromètres illustrent deux aspects complémentaires de l'information. L'HYPEAC analyse quelques éléments spectraux dans le temps où le SIMAC en enregistre quelques milliers ; mais l'HYPEAC donne une précision extrême sur ce petit nombre d'éléments, alors que le SIMAC doit se contenter d'un ordre de grandeur. Ces deux appareils apparaissent donc comme complémentaires et non comme concurrents.

A l'heure actuelle nous ne sommes pas capables d'extraire plus qu'une fraction

des informations contenues dans une plaque nucléaire avec des moyens de micro-photométrie encore trop frustes et limités. Il est permis de penser qu'une détection plus fine, plus systématique et plus objective est possible. Déjà l'appareil réalisé par R. PELLETIER (Réf. III-3) pour dépouiller les films du SIMAC photographique est beaucoup mieux adapté au problème que les densitomètres classiques conçus pour explorer de grandes surfaces de plaque.

Ce qui donne souvent l'avantage au spectromètre monocanal est que celui-ci est à lui-même codeur et décodeur d'informations, de sorte qu'il fournit un enregistrement directement exploitable par une machine à calculer. Le SIMAC code les informations en affectant à chaque élément spectral une position sur la plaque nucléaire, à laquelle correspond une fonction d'appareil particulière. Le problème de la lecture est donc moins simple ; à la limite il exigerait un instrument équivalent, c'est-à-dire aussi complexe, pour le décodage que pour le codage. En fait tant que le rapport signal sur bruit ne dépassera pas 50 ou 100, la lecture pourra être faite sur un densitomètre du genre décrit par R. PELLETIER, avec un avancement pas à pas pour explorer successivement les divers intervalles entre ordres du Fabry-Perot.

Le SIMAC photoélectrique décrit dans ces pages est d'un maniement simple mais délicat. On peut dire que sa "fiabilité" est médiocre. Cependant, il faut souligner que ce défaut n'est pas dû à la nature de la méthode, mais au prototype lui-même. Nous avons déjà signalé les perfectionnements indispensables pour rendre l'appareil utilisable en routine, sans toutefois prétendre que le SIMAC pourra être un jour un appareil "presse-bouton". Les plus gros progrès seront accomplis lorsque l'on disposera d'une caméra électronique de plus grand diamètre, capable d'accepter un champ plus grand. A l'heure actuelle une photocathode de 40 mm de diamètre est à l'étude; (Réf. IV-9) avec le même appareil on pourra donc enregistrer 4 fois plus d'informations. Ce gain pourra être utilisé soit à augmenter le rapport signal

sur bruit, soit à augmenter l'intervalle spectral étudié. Par ailleurs, la transformation la plus pratique sera accomplie lorsqu'on pourra isoler la couche photoélectrique des plaques nucléaires : ceci a déjà été réalisé par KRONE (RÉF. IV-10) aux Etats-Unis et nous espérons pouvoir bénéficier un jour de cette amélioration technique.

B I B L I O G R A P H I E

I - Spectroscopie instrumentale - Généralités.

- 1 - BRUHAT. Optique (Paris).
- 2 - Cours de spectroscopie instrumentale. R. CHABBAL, Faculté des Sciences de Paris.
- 3 - Caractères communs aux nouvelles méthodes de spectroscopie interférentielle; facteur de mérite. P. JACQUINOT, Journal de Physique, Tome 19, (1958), p. 223.
- 4 - Diaporamètre dans: Optique instrumentale, p.189 de G.A. BOUTRY, chez Masson à Paris.
- 5 - Les systèmes catadioptriques REOSC, A. BAYLE, J. ESPIARD, Revue d'Optique, Tome 45, N° 3 (1966), p. 97 à 117.

II - Spectromètre Fabry-Perot - HYPEAC.

- 1 - R.CHABBAL, J. Recherches, C.N.R.S., Tome 8 (1957), p.77.
- 2 - R. CHABBAL, Thèse: Revue d'Optique, Paris 1958.
- 3 - R. CHABBAL, P. JACQUINOT, Description d'un spectromètre Fabry-Perot, Revue d'Optique 1961, Vol. 4.

III - Spectromètre SIMAC.

- 1 - R. CHABBAL et R. PELLETIER: Principe et réalisation d'un spectromètre Fabry-Perot multicanal: le SIMAC. Japanese Journal of Applied Physics Vol.4, Suppl.1 (1965), p.445.
- 2 - R. CHABBAL, Ph. BIED-CHARRETON, R. PELLETIER: le SIMAC, utilisation avec une plaque photographique ou une caméra électronique. Journal de Physique, Vol.28 (1967), P.209.
- 3 - R. PELLETIER, Thèse (à paraître).

BIBLIOGRAPHIE (suite)

IV - Caméra électronique.

On trouvera les informations concernant les différents tubes images et leurs applications en spectroscopie, principalement dans les séries:
- Photo-Electronic Image Devices, Academic Press, London.

- 1 - A. LALLEMEND, M. DUCHESNE et G. WLERICK: La photographie électronique, Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, London, Vol. XII, 1958.
- 2 - M. DUCHESNE et MEALLET: Etude de la linéarité, C.R. Acad. Sciences, 254, p.3973 (1962).
- 3 - VERNIER: Thèse. Etude de la linéarité, Sorbonne, Paris 1958.
- 4 - A. LALLEMAND: Perfectionnement de la caméra électronique à l'Infra-rouge, Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, London, Vol.22 A, 1966, p.5.
- 5 - M.F. WALKER: Lick Observatory, Advances in Electronics and Electron Physics, Vol.22 B, 1966, p.761.
- 6 - Autre type de caméra électronique: le Spectracon.
J.D. MCGEE, A. KHOGALI et A. GAUSON, Imperial College, London.
W.A. BAUN, Mt WILSON et Palomar Observatories, Advances in Electronics and Electron Physics, London, Vol. 22 A, 1966, p.11.
- 7 - P.W. BRAND et M.J. SMYTH, Application du Spectracon en Spectrométrie astronomique, Royal Observatory, Edimburgh, ibid, Vol.22B p.741.
- 8 - Théodore DUNHAM: Utilisation d'un tube image développé par la 20th Century Electronics en Spectroscopie stellaire. Ibid, Vol. 22 B, p.729.
- 9 - Communication de M. DUCHESNE.
- 10 - Communication de M. LALLEMAND.

V - Dépouillement des plaques.

1. - P. FELLGETT: Sur le grain des plaques photographiques, le rapport signal sur bruit et l'information, J. Opt. Soc. Amer. Vol. 43 (1953) p. 271
- 2 - et Monthly Notices - Royal Astron. Soc. 118 (1958), p.224.
- 3 - et J. Photographie Scientifique 9-201 (1961).
- 4 - R.C. JONES: Nouvelles méthodes pour caractériser et mesurer la granularité des matériaux photographiques - Capacités d'information. JOSA, Vol. 45 (1955), p.805 et J. Opt. Soc; Amer., Vol. 51 (1961) p. 1159

BIBLIOGRAPHIE (Fin)

- 5 - J. BECKMAN : Application de la théorie de l'information pour l'étude de tubes images. *Advances in Electronics and Electron Physics*, Academic Press, London, Vol. 22 A (1966), p. 369.
 - 6 - BRAND & SMYTH : *ibid*, Vol. 22 B (1966), p. 238.
 - 7 - H.J. ZWEIG : Autocorrélation et bruit. *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 49, (1959) p. 238.
 - 8 - H.J. ZWEIG ; Capacité d'information d'un détecteur d'image - Rendement quantique. *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 48 (1958), p. 928, et *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 51 (1961), p. 310.
 - 9 - MARCHANT : Critères d'exposition en photographie, *J. Opt. Soc. Amer.*, Vol. 53 (1963), p. 1356.
 - 10 - WOODWARD : Capacité d'information, *A Proc. Inst. Elec. Engrs*, 99 III, p. 37 (1952); *Probabilité, Analyse fréquentielle, Information, T.écrite du Radar*, Eyrolles (Paris) 1960, p. 67 à 88.
 - 11 - P. BOUCHARÉINE et P. JACQUINOT : Le récepteur photographique dans l'article "Spectrographie par grille"; *J. de Phys.*, tome 28 (1967), p. 183.
 - 12 - R. CHABBAL : *Luminosité des Spectrographes (à paraître)*.
-

DEUXIEME THESE

soutenue le 19 Décembre 1967

par

Monsieur Philippe BIED-CHARRETON

Laboratoire Aimé Cotton

sur le sujet:

"DETECTIONS HOMODYNE ET HETERODYNE DE LA DIFFUSION RAYLEIGH ET DE LA
DIFFUSION BRILLOUIN".

INTRODUCTION.

L'étude de la diffusion de la lumière par un milieu condensé, liquide ou solide, nécessite une source lumineuse intense et l'emploi de spectromètres très très résolvents et très sensibles. C'est ainsi que sont utilisées, depuis plusieurs années; des sources laser et des méthodes interférométriques Fabry-Perot notamment (réf.6). Cependant, un gain de résolution de plusieurs ordres de grandeur a été obtenu par l'emploi de méthodes de battements optiques: méthodes homodyne et hétérodyne, utilisées depuis fort longtemps dans le domaine des radiofréquences. Nous allons décrire leur principe et quelques exemples d'applications.

P L A N D E L' E T U D E

INTRODUCTION.

I - Détection homodyne: principe.

II - Application à la diffusion Rayleigh.

- a) Rappel sur la diffusion Rayleigh.
- b) Dispositif expérimental.

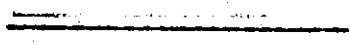
III - Detection hétérodyne.

- a) Principe.
- b) Analyse spectrale du signal.

IV - Applications de la méthode hétérodyne.

- a) Diffusion Rayleigh.
- b) Diffusion Brillouin.
- c) Avantages de cette méthode.
- d) Rapport signal sur bruit.

CONCLUSION.



DETECTIONS HOMODYNE ET HETERODYNE

Applications aux diffusions Rayleigh et Brillouin

I - Détection homodyne - Principe (Réf. 1)

(Voir tableau T 2)

a) Supposons qu'une onde lumineuse représentée par le champ électrique $E(t)$ frappe un détecteur photoélectrique. Si la radiation est centrée autour d'une fréquence ω_0 , on peut la représenter par une formule du type:

$$(1) \quad E(t) = \delta E(t) e^{-i\omega_0 t}$$

$\delta E(t)$ représentant les fluctuations de E autour de ω_0 . Le spectre du champ $E(t)$ sera $I_1(\omega)$, et sa fonction d'autocorrélation $R_1(\tau)$.

b) Le courant photoélectrique $i(t)$ est proportionnel au module carré du champ:

$$(2) \quad i(t) = |E(t)|^2$$

si on filtre la composante continue et les composantes à très haute fréquence, on obtient:

$$(2') \quad i(t) = \delta |E(t)|^2$$

il apparait donc que les fluctuations de $i(t)$ vont être reliées aux fluctuations de $E(t)$.

Appelons $I_2(\omega)$ le spectre du courant, et $R_2(\tau)$ sa fonction d'autocorrélation.

Du fait de (2'), on a une relation très simple entre la fonction d'autocorrélation du champ : $R_1(\tau)$ et celle du courant : $R_2(\tau)$; il vient en effet:

$$(3) \quad R_2(\tau) = |R_1(\tau)|^2$$

Le spectre du courant est par définition:

$$(4) \quad I_2(\omega) = \int R_2(\tau) e^{i\omega\tau} d\tau \quad (\text{à un facteur près) du fait de (3)}$$

du fait de (3) :

$$(5) \quad I_2(\omega) = \int |R_1(\tau)|^2 e^{i\omega\tau} d\tau \quad (\text{à un facteur près})$$

ce qui est équivalent à

$$(6) \quad I_2(\omega) = \int I_1(\omega') I_1(\omega' - \omega) d\omega'$$

Cette relation montre que la composante spectrale à la fréquence ω est égale à la somme de tous les battements obtenus par les éléments spectraux distants de la fréquence ω . Ce qui revient à dire que l'on fait battre la raie avec elle-même. D'où le nom de "self beating spectrometer", ou méthode "homo-dyne".

c) Il reste à enregistrer le spectre $I_2(\omega)$. Celui-ci s'étend de la fréquence 0 à la fréquence la plus haute de battement possible, fréquence déterminée par la largeur de la raie.

On enregistre le spectre avec un analyseur de spectre, dont le détecteur est le plus souvent linéaire et mesure en fait:

$$G(\omega) = [I_2(\omega)]^{1/2}$$

d) Exemple:

si les fluctuations dans le champ incident sont caractérisées par une fonction d'autocorrelation du type :

$$R_1(\tau) = A e^{-\Gamma\tau}$$

ce qui signifie que le temps de corrélation des fluctuations est de l'ordre de Γ^{-1} et que la raie diffusée est une raie de Lorentz :

$$I_1(\omega) = \frac{\Gamma/\kappa}{\omega^2 + (\Gamma)^2}$$

la convention de $I_1(\omega)$ par lui-même donne encore une raie de Lorentz:

$$I_2(\omega) = \frac{2\Gamma/\kappa}{\omega^2 + (2\Gamma)^2}$$

et le spectre enregistré par l'analyseur est

$$G(\omega) = [I_2(\omega)]^{1/2} = \left[\frac{2\Gamma/\kappa}{\omega^2 + (2\Gamma)^2} \right]^{1/2}$$

e) Intérêt:

1. Le pouvoir de résolution est lié à la largeur $\Delta \nu$ du filtre de l'analyseur. Cette largeur peut être de l'ordre de quelques Hz, ce qui correspond à un pouvoir de résolution de l'ordre de 10^{14} .

2. Largeur de raie:

on peut mesurer des largeurs de raie très faibles, de l'ordre de quelques centaines de Hz.

3. Rapport S/B:

le bruit est du bruit shot, ou bruit de grenaille, lié à la structure granulaire du flux. Si l'on fait une analyse complète du système, on trouve que S/B est proportionnel au flux moyen incident, au rendement quantique du détecteur, au temps de corrélation Γ^{-1} des fluctuations du champ incident.

f) Application:

Pour se trouver dans une région où S/B est supérieur à 1, il faut disposer d'une forte puissance incidente. D'où l'utilisation de laser pour l'étude de la diffusion de la lumière; d'où l'étude de fluctuations à temps de corrélation élevé: dans les liquides au voisinage de la température critique; d'où l'utilisation de récepteur à rendement quantique élevé: photomultiplicateur ou photodiode "Silicone-planar", dont les détectivités sont voisines pour $\lambda = 6328 \text{ \AA}$.

CONCLUSION.

Le spectromètre ainsi conçu est sensible à l'intensité; il réalise la corrélation de $\sqrt{E(t)}$ avec $\sqrt{E(t + \tau)}$. On lui donne indifféremment le nom de "self beating spectrometer" ou "square law spectrometer". Nous verrons en III un spectromètre sensible à l'amplitude.

II - Exemple d'application : observation de la lumière diffusée par un liquide pur au voisinage du point critique.

a) Rappel sur la diffusion Rayleigh (tableau T 1)

1. Un milieu condensé parfait ne diffuse pas de lumière: on peut toujours trouver une zone où l'amplitude diffusée sera en opposition de phase avec une autre, et où l'intensité sera identique.
2. Cependant, un milieu n'est jamais en équilibre parfait et n'a jamais une structure parfaite. On doit donc observer de la lumière diffusée par les irrégularités de densité. Certaines sont indépendantes du temps: elles sont dues aux défauts de structure du réseau (pour un solide); d'autres en dépendent: ce sont les fluctuations de pression et de température. Celles-ci dépendent aussi de la température.

Il ne peut y avoir diffusion Rayleigh, c'est-à-dire diffusion sans changement de fréquence, que pour les fluctuations de densité qui ne se propagent pas. Landau a montré que c'est le cas des fluctuations d'entropie ou fluctuations de température à pression constante.

3. Landau et Placzek ont montré et calculé comment varie l'intensité de la raie Rayleigh en fonction de la température. Il se trouve qu'au voisinage de la température critique, on observe une forte augmentation de cette intensité: c'est le phénomène d'opalescence critique. La validité des équations de Landau n'a pu être démontrée tant que l'on ne disposait pas de sources assez intenses et assez monochromatiques et de méthodes assez résolventes. Aujourd'hui, c'est maintenant une chose possible grâce aux lasers et aux méthodes de battement optiques.

b) Dispositif expérimental (N.C. Ford et G.B. Benedeck, Réf. 1).

(Voir figure 1).

Cette méthode est appliquée ici à l'étude de la diffusion Rayleigh de SF₆.

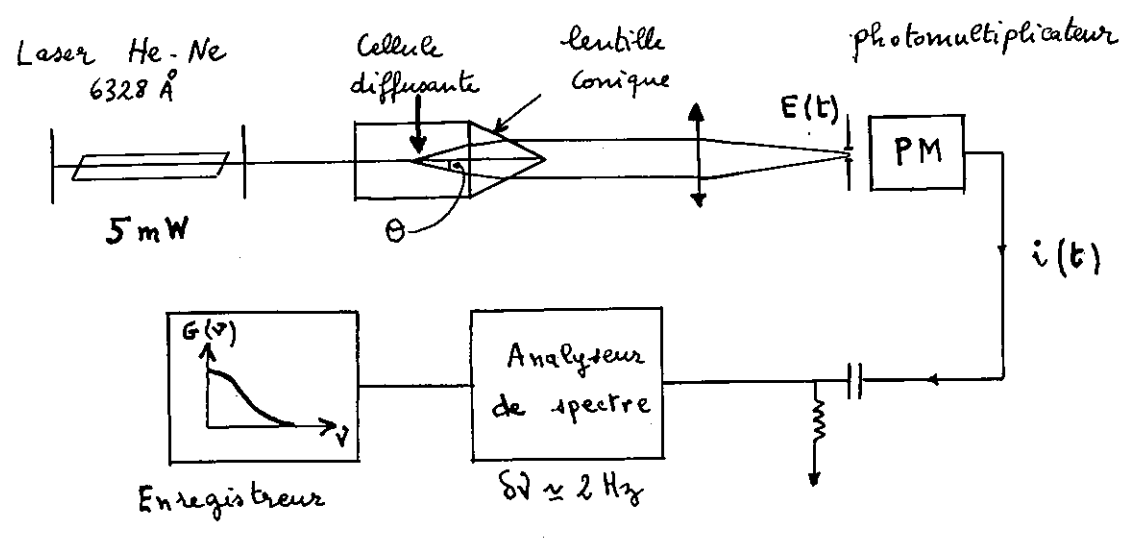
au voisinage de sa température critique ($T_c = 45,55^\circ\text{C}$). On a pu vérifier les conclusions de Landau et de Placzek : la raie a un profil de Lorentz; le temps de corrélation Γ^{-1} des fluctuations d'entropie est donné en fonction de $T - T_c$.

Ainsi pour: $T - T_c = 0,318^\circ$
 $\Gamma \neq 2000 \text{ rad/sec}$
 $\Delta \nu = 76 \text{ Hz}$ (largeur à mi-hauteur)

La limite de résolution est $\Delta \nu = 10 \text{ Hz}$.

Fig 1

METHODE HOMODYNE



- Application à l'étude de la diffusion Rayleigh.

III - Détection hétérodyne (Réf. 2)

(Voir tableau T 3)

a) Principe.

- 1. En réception radioélectrique, on appelle hétérodyne une méthode de détection qui fait appel à une fréquence intermédiaire audible. Soit à recevoir un signal $E(t)$ de fréquence moyenne f , soit f_o , la fréquence d'un oscillateur local; on fera battre les signaux de façon à obtenir une fréquence $F = |f - f_o|$ audible. L'intérêt du changement de fréquence dans la réception de signaux radion est que l'on peut faire suivre le mélangeur d'un amplificateur à fréquence fixe F , et que le changement de fréquence peut s'accompagner d'un gain de puissance.
- 2. On appellera "superhétérodyne" une méthode dans laquelle la fréquence intermédiaire F est quelconque; en l'occurrence elle est généralement plus élevée : en radio, $F = 455$ KHz.

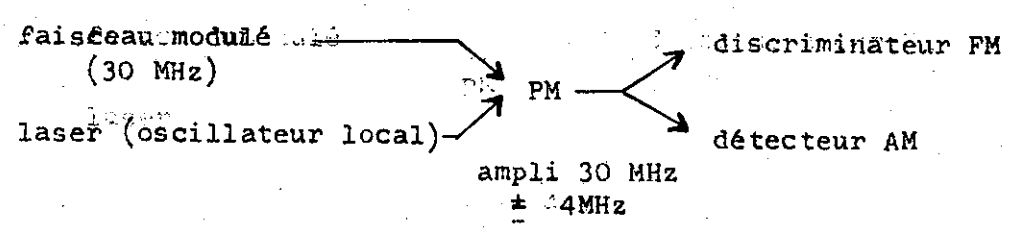
En optique, il est difficile d'obtenir une fréquence de battement audibles avec des sources lumineuses émettant des raies de largeur trop grande. Il pourrait en être question avec des raies laser de quelques Hz de large.

En pratique on utilisera une fréquence intermédiaire de l'ordre du Mégahertz

3. Exemple de récepteur optique superhétérodyne.

Le problème est de détecter la modulation d'un faisceau laser en vue d'une application dans les télécommunications.

D'où le schéma:



(Voir Applied Optics Août 1967)

b) Analyse spectrale du signal photoélectrique (Réf. 8 - 9)

Supposons que l'on envoie deux ondes lumineuses $E(t)$ et $D(t)$ sur un même détecteur. Si les ondes sont cohérentes, le champ résultant est $E(t) + D(t)$ et le

courant photoélectrique est proportionnel à:

$$[E(t) + D(t)] [E(t) + D(t)]^*$$

c'est-à-dire:

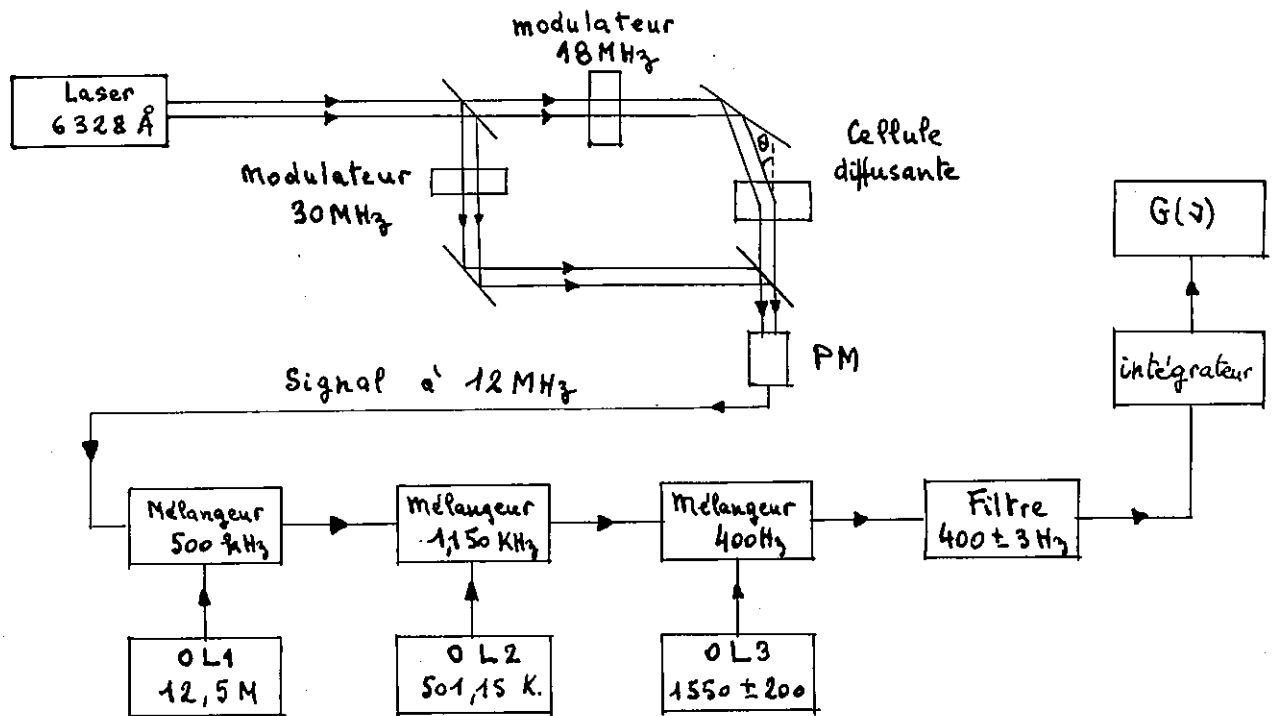
$$i(t) = \sqrt{E(t)^2} + \sqrt{D(t)^2} + 2 \text{ Réelle } [E(t) D^*(t)]$$

Si on module les deux champs à des fréquences différentes:

$$E(t)e^{i\omega_1 t} \text{ et } D(t)e^{i\omega_2 t},$$

on aura dans le spectre du courant $i(t)$ une composante à la fréquence $\omega_1 - \omega_2$. Pour éliminer les termes $\sqrt{E(t)^2} + \sqrt{D(t)^2}$ qui augmentent la valeur moyenne du signal, on filtrera le signal à la fréquence $(\omega_1 - \omega_2) \pm \Delta\omega$, on l'amplifiera et on analysera le spectre à l'aide d'un filtre étroit $\delta\omega$ avec $\delta\omega \ll \Delta\omega$, dont la fréquence moyenne se déplacera pour obtenir le profil de la raie. On voit que la puissance obtenue après mélange des ondes $E(t)$ et $D(t)$ est proportionnelle à la racine de la puissance P_E émise par l'oscillateur local. Par cette méthode on peut donc augmenter le signal.

METHODE HETERODYNE



Application à l'étude de la diffusion Rayleigh

Fig 2

IV - Application de la méthode hétérodyne.

a) Application de la diffusion Rayleigh.

1. Montage de Alpert-Yeh et Cimmins (Réf. 2).

Le montage est donné fig. 2. On réalise le battement d'une raie très fine avec la raie diffusée; la convolution donne pratiquement la raie diffusée.

L'exploration de la bande spectrale est obtenus par déplacement de la fréquence de l'oscillateur OL3. Ainsi, on peut avoir un filtre à 400 Hz de largeur de bande 6 Hz, fixé une fois pour toutes.

2. On obtient ainsi un pouvoir de résolution de 10^{14} . L'utilisation de cet appareil est orientée vers la mesure de largeur de raie allant de quelques Hz à quelques kHz: application à la mesure de rayon de grosses molécules (environ 500 Å, pour le polystyrène par exemple).

b) Application à l'effet Brillouin.

(Voir tableau T 1)

1. Rappel sur l'effet Brillouin (Réf. 4 - 5)

Un milieu condensé est le siège de fluctuations de pression qui peuvent se propager à une vitesse qui est celle du son. On peut considérer que la diffusion Brillouin est due à la réflexion d'une onde incidente de fréquence ν_0 et de vecteur d'onde K_0 sur une onde de fréquence $\Delta \nu$ et de vecteur K . L'onde diffusée a une fréquence ν et un vecteur k tel que $\nu = \nu_0 \pm \Delta \nu$,

$$\text{avec } \Delta \nu = 2 \nu_0 \frac{v}{V} \sin \frac{\theta}{2}$$

où θ = angle de diffusion,

v = vitesse de propagation des fluctuations (phonons),

V = vitesse de la lumière dans le milieu diffusant.

Il s'agit en fin de compte de cration ou de disparition d'un phonon.

2. Ordre de grandeur de la diffusion Brillouin.

Pour une diffusion "vers l'arrière" ($\theta = \pi$) et une raie excitatrice, rouge, on obtient:

- pour un liquide Δu environ 10 GHz
- pour un solide Δu environ 100 GHz

ce qui correspond à des distances en nombre d'onde de l'ordre du Kaiser ($\lambda \text{ cm}^{-1}$).

C'est pourquoi on peut mesurer le déplacement Brillouin par une méthode interférométrique classique: Fabry-Perot (Réf. 6), ou même avec un spectromètre à réseau. Mais si l'on veut atteindre l'information contenue dans la largeur de raie, il faut avoir recours à une méthode beaucoup plus poussée. D'où l'utilisation de la méthode hétérodyne, qui permet d'atteindre des résolutions supérieures de plusieurs ordres de grandeur aux résolutions classiques.

3. Exemples de montage expérimental (Fig? 3, 4, 5).

Le montage de Benedek (fig. 3) donne seulement l'intensité totale de la diffusion Brillouin, pour un très petit angle correspondant à un déplacement de fréquence de 30 MHz, fréquence à laquelle est détectée le battement entre raie non-diffusée - raie diffusée.

Le montage de la figure 4 permet d'observer, à l'oscilloscope, le battement de la raie rouge du rubis avec la raie Brillouin diffusée avec un écart angulaire très faible. (θ environ 0,04 radian). Le battement observé a une fréquence de 123 MHz.

Nous discuterons surtout la méthode de Wilcox, qui procure le plus d'informations sur la diffusion (fig. 5)

c) Discussion de la méthode.

La méthode hétérodyne permet donc d'atteindre profil de raie et déplacement de fréquence, ce déplacement pouvant être très petit comme celui dû, par exemple, à une diffusion sur un plan mobile (Δu environ 100 Hz). Des déplacements plus grands sont mesurables jusqu'à plusieurs GHz par des photodiodes extrêmement

METHODE HETERODYNE

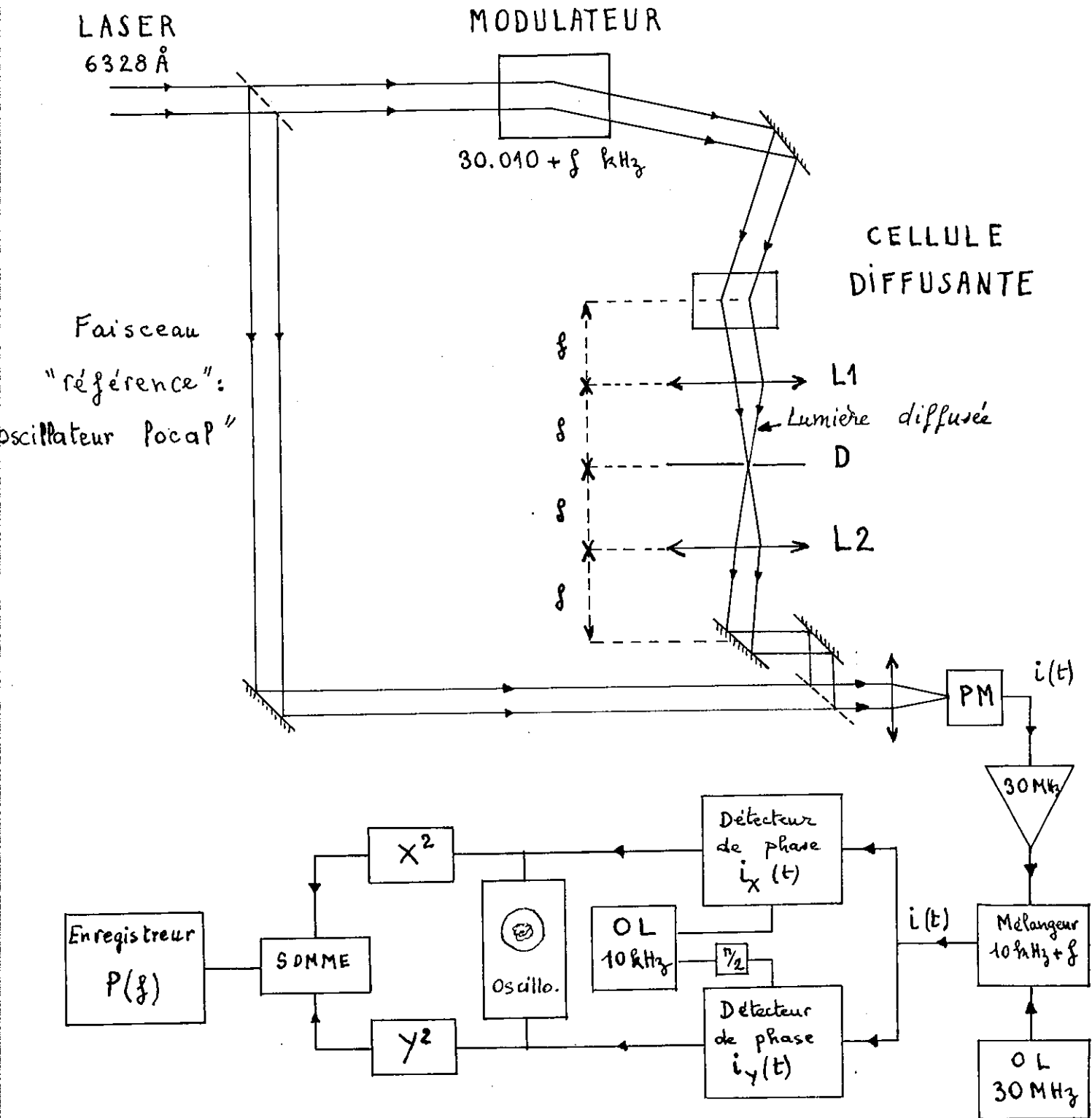
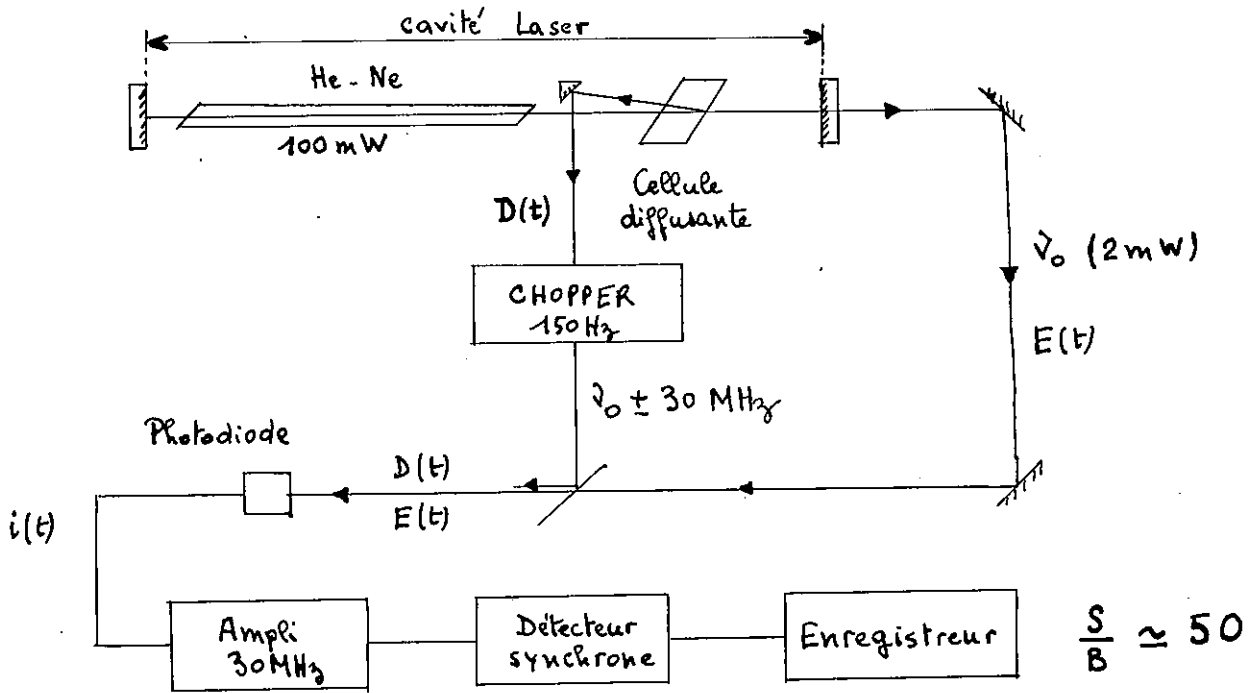


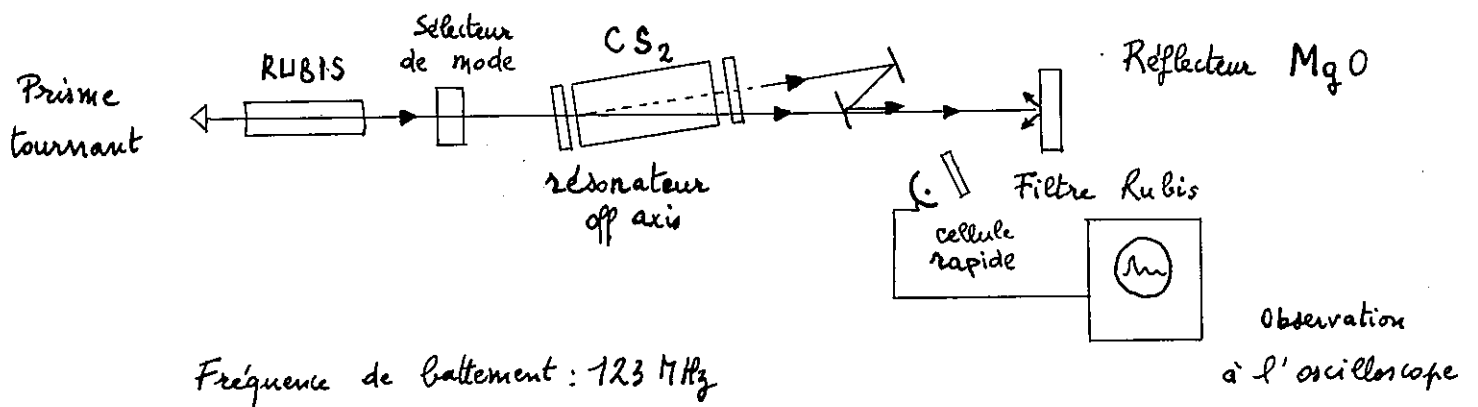
Fig 5

Méthode HETERODYNE

1. Mesure d'intensité de raie Brillouin (Fig 3)



2. Effet Brillouin stimulé (Fig 4)



rapides (photodiodes au Silicium, planar ou biplanar). Les battements sont alors visibles sur l'écran d'un oscilloscope (fig. 4 et Réf. 7).

La méthode hétérodyne utilisée par Wilcox (fig. 5) a été testée par l'étude de la diffraction par un trou. Wilcox a observé les zéros de la fonction de Bessel jusqu'à l'ordre 50, le signal étant encore plusieurs fois supérieur au bruit shot. Pour arriver à ce résultat, il est nécessaire de filtrer énergiquement le signal issu du photomultiplicateur pour ne pas saturer l'amplificateur à 30 MHz; ceci est réalisé par un filtre en π de 10 kHz de largeur de bande, ce filtre adaptant également les impédances. Dans ces conditions, le bruit de l'amplificateur est bien inférieur au bruit shot.

Pour atteindre le spectre de l'onde incidente, il faut prendre la transformée de Fourier du courant $i(t)$. Dans l'appareil de Wilcox, $i(t)$ est détecté dans deux discriminateurs de phase donnant les deux composantes $i_x(t)$ et $i_y(t)$.

Cette méthode donne bien accès au module et à la phase du champ incident $D(t)$. Sur l'écran d'un oscilloscope, on peut observer les fluctuations, à la fréquence f , du champ. Ceci permet de voir comment se stabilise un liquide ou quelles sont les fluctuations résiduelles après une certaine excitation.

Si l'on veut obtenir également le spectre de puissance du champ incident, il faut réaliser l'opération qui nous donnera le module carré du courant filtré à la fréquence $f \pm \frac{\Delta f}{2}$. Par variation de f , on enregistre le spectre de puissance. Cette méthode est très souple: les détecteurs synchrones ont une constante de temps RC pouvant varier de 10^{-3} à 100 secondes; la fréquence f d'étude peut varier de 10 Hz à 100 Hz, sans difficulté.

d) Rapport Signal sur Bruit.

Dans les conditions où travaille Wilcox, le seul bruit est du bruit shot, donc impossible à éliminer.

1. La méthode hétérodyne permet d'augmenter la puissance du signal de battement, grâce à l'apport de la puissance de l'oscillateur local. Dans les cas où le signal est très faible, elle permet de se placer au-dessus du flux minimum détectable.

Cependant, le rapport signal sur bruit shot n'est pas amélioré; on montre qu'il est le même qu'avec une méthode homodyne, à égalité de puissance diffusée.

Le rapport signal sur bruit shot est de la forme (Réf. 10):

$$\frac{S}{B} = \frac{\langle P \rangle f}{\langle P \rangle_{\text{shot}}} = \frac{i_0}{e} \langle /D/2 \rangle$$

- $/D/2$ étant la puissance diffusée à la fréquence f . Ceci à condition que la puissance de l'oscillateur local soit très supérieure à celle du signal diffusé; par exemple:

$$\langle /E/2 \rangle \text{ environ } 10 \langle /D/2 \rangle$$

- i_0 est le courant photoélectrique qui serait détecté, si le PM était placé sur la pupille d'entrée.

2. La sensibilité: δ_p étant définie par:

$$\delta_p = \langle (P - \langle P \rangle)^2 \rangle^{1/2}$$

on a en première approximation (Réf. 10):

$$\delta_p = \langle P \rangle_{\text{shot}} (\Delta f \cdot T)^{-1}$$

où Δf est la bande passante du filtre

T est la constante du temps.

Une grandeur intéressante est le rapport $\frac{\langle P \rangle f}{\delta_p}$ qui nous dit si le signal

$\langle P \rangle f$ est supérieur au minimum détectable. On a:

$$\frac{\langle P \rangle f}{\delta_p} = A P_0 \left(\frac{\lambda}{a} \right)^2 \sqrt{\Delta f T}$$

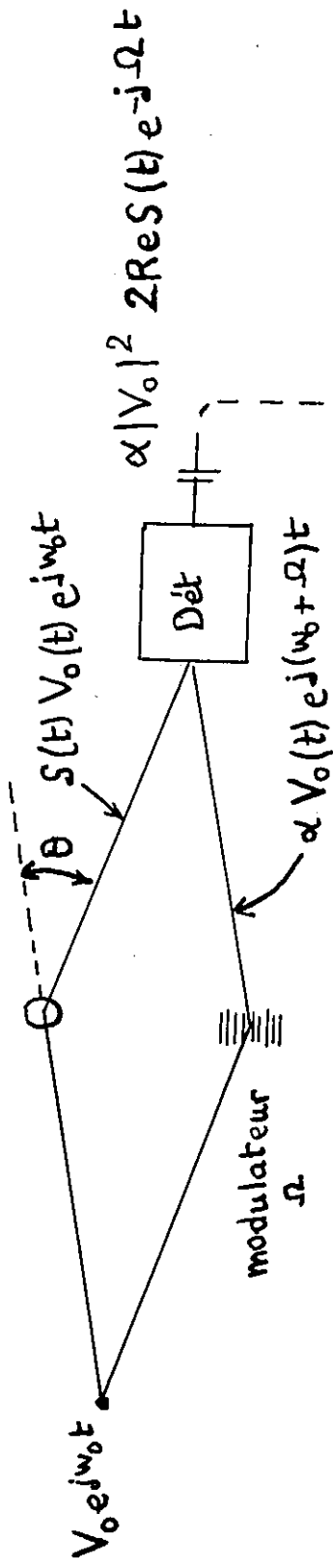
où P_0 est la puissance rayonnée par le laser par unité de surface

a est le côté de la pupille d'entrée.

On voit que ce rapport est proportionnel au flux P_0/a^2 passant à travers la pupille d'entrée.

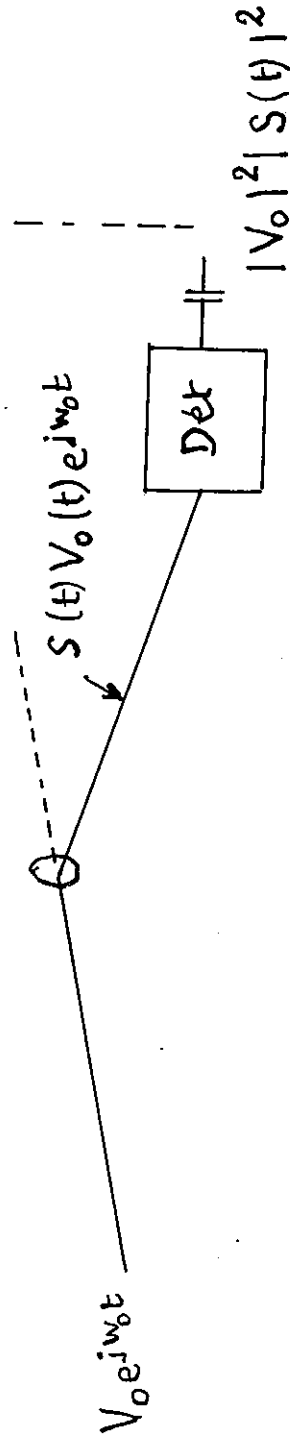
Donc, pour une certaine puissance laser P_0 , la sensibilité est inversement proportionnelle à la résolution angulaire de l'instrument. On a été jusqu'à la résolution angulaire $d\theta$ d'environ 10^{-4} radians avec un rapport signal sur bruit de quelques dizaines.

3. La valeur de S/B est identique à celle qui serait obtenue pour un spectromètre sensible à l'intensité, c'est-à-dire par une méthode homodyne. Et en effet, les nombres de photons diffusés sont identiques dans les deux cas. L'avantage de la méthode hétérodyne est donc de pouvoir atteindre le champ électrique en module et en phase (Fig. 6)



(1) Spectromètre sensible au champ

Analyseur
de spectre



(2) Spectromètre sensible à l'intensité

Fig 6

CONCLUSION.

L'emploi des méthodes de battements optiques a permis de tester la validité des équations de Landau et Plasczek; elles permettent l'étude des fluctuations thermodynamiques dans les liquides et les solides, notamment la mesure du temps de corrélation de ces fluctuations.

Dans un tout autre domaine, elles sont utilisées pour la réception de faisceaux "laser" modulés pour les télécommunications. Des récepteurs optiques superhétérodynes fonctionnent déjà (Réf. 3).

Leur mise en oeuvre, aux points de vue optique et électronique, ne requiert pas de recherche particulière. C'est la conjonction des deux techniques qui a permis d'atteindre les résultats exposés.

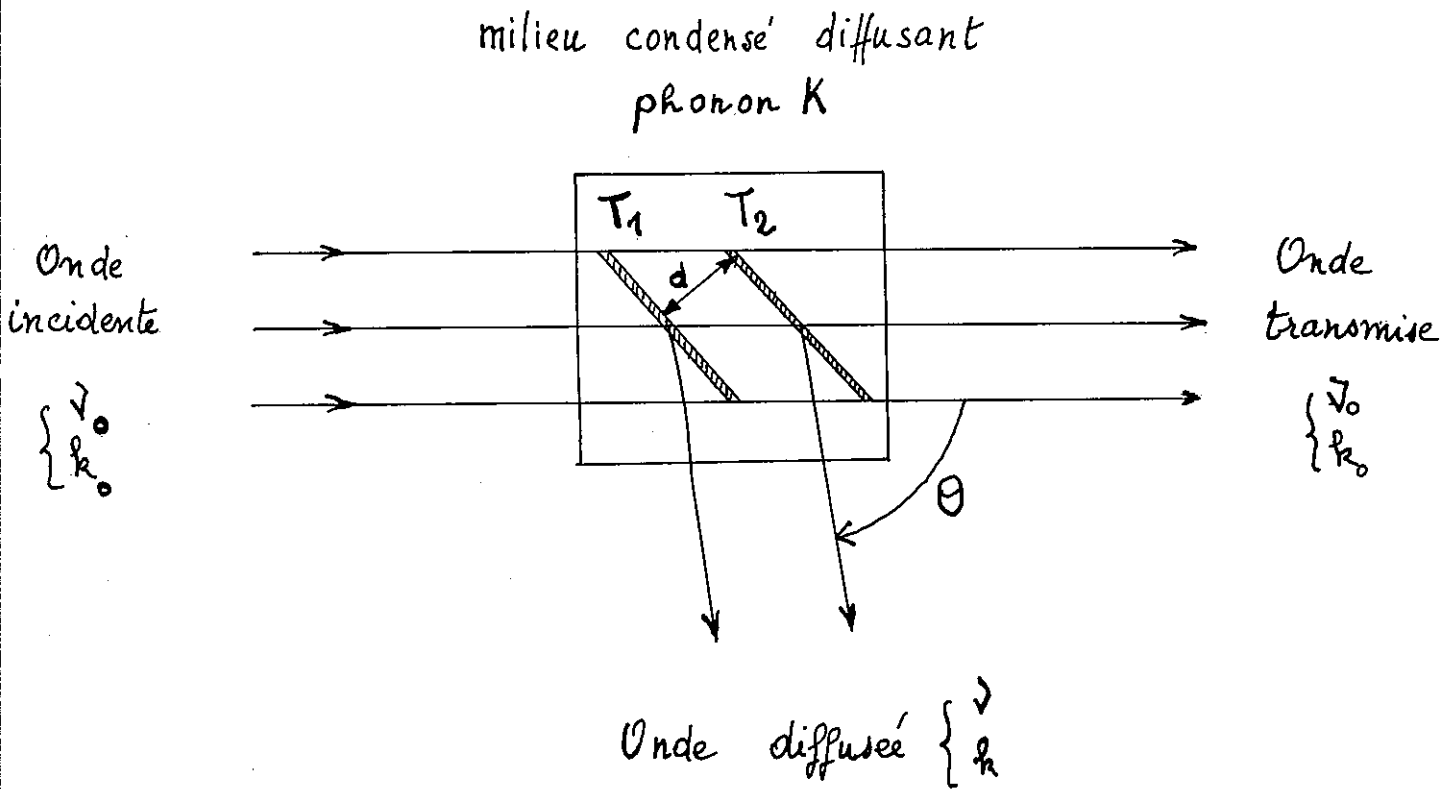
On peut envisager de nombreuses autres applications de ces techniques, par exemple pour des études de profil de raie fine ou des mesures précises de longueur d'onde.

B I B L I O G R A P H I E

- (1) - Détection homodyne
N.C. FORD et G.B. BENEDEK (M.I.T.)
Physical Review Letters, vol. 113, p. 649, 1965.
- (2) - Détection hétérodyne
H.Z. CUMMINS, N. KNABLE et Y. YEH (Columbia)
Physical Review Letters, vol. 112, p. 150, 1964
- (3) Réception optique superhétérodyne
LUCY, LANG, PETERS
Applied Optics, vol. 6, p. 1333, 1967.
- (4) - Diffusion Brillouin
L. BRILLOUIN
Ann. de Physique, vol. 17, p. 88, 1962.
- (5) - Théorie de la diffusion par un milieu condensé
LANDAU et LIFSCHITZ
Electrodynamique des milieux continus (1960)
- (6) - Etude à l'aide du Fabry-Perot de la diffusion Brillouin
R.Y CHIAO et B.P. STOICHEFF
JOSA, vol. 54, p. 1286, 1964.
- (7) Détection homodyne de diffusion Brillouin stimulée
D.A. JENNINGS et E. TAKUMA
Applied Physics Letters, vol. 5, p. 241, 1964.
- (8) Hétérodyne detection of a weak light beam
L. MANDEL
JOSA, vol. 56, p. 1200, 1966
- (9) Photocurrent spectrum and photoelectron counts produced by a Gas Laser
Ch. FRED and H.A. HANS
Physical Review, vol. 141, p. 287, 1966.
- (10) - A Field Sensitive Spectrometer for Quasi-Coherent Scattering Studies
L.R. WILCOX
IV Quantum Electronics Conference (Arizona) Avril 1966.

T 1

DIFFUSIONS RAYLEIGH ET BRILLOUIN



1) Sans changement de fréquence : diffusion RAYLEIGH

2) Avec changement de fréquence : diffusion BRILLOUIN

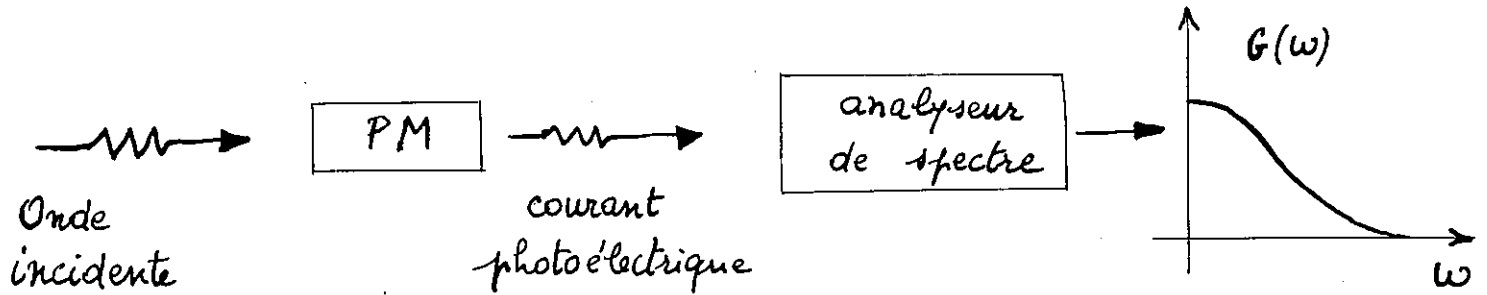
$$\left\{ \begin{array}{l} \nu = \nu_0 \left(1 \pm 2 \frac{v}{V} \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ k - k_0 = K \end{array} \right.$$

Problème: Etude du profil de la raie diffusée

T2

DETECTION HOMODYNE

PRINCIPE



Onde incidente

$$\begin{cases}
 E(t) = \delta E(t) e^{-i\omega_0 t} \\
 R_E(z) = \langle \delta E(t+z) \delta E^*(t) \rangle e^{-i\omega_0 z} \\
 I_E(\omega) = \frac{1}{2\pi R_1(0)} \int_{-\infty}^{+\infty} R_E(z) e^{i\omega z} dz
 \end{cases}$$

Courant PM

$$\begin{cases}
 i(t) \approx |E(t)|^2 = |\delta E(t)|^2 \\
 R_i(z) = |R_E(z)|^2 \\
 I_i(\omega) = \frac{1}{2\pi |R_1(0)|^2} \int_{-\infty}^{+\infty} I_E(\omega') I_E(\omega' - \omega) d\omega'
 \end{cases}$$

→ ≈ battement de la raie par elle-même

Analyseur de spectre

$$G(\omega) = [I_i(\omega)]^{1/2}$$

Exemple

$$R_E(z) = A e^{-\Gamma z} \quad \text{avec } \Gamma \approx 1000 \text{ rad/sec}$$

$$G(\omega) = \left[\frac{2\Gamma/\pi}{\omega^2 + (2\Gamma)^2} \right]^{1/2}$$

Pouvoir de résolution $R \sim 10^{13}$ à 10^{14}

DETECTION HETERODYNE

PRINCIPE

⇒ Battement de la raie étudiée avec raie de référence

Oscillateur local $E(t)$
 Onde à recevoir $D(t)$ } onde incidente: $E(t) + D(t)$
 dirigée sur PM

Courant photoélectrique

$$i(t) \approx |E(t)|^2 + |D(t)|^2 + 2 \operatorname{Re} [E(t) \times D^*(t)]$$

signal à détecter

Méthode de détection

modulation de $E(t)$ à la fréquence ω_1
 modulation de $D(t)$ à la fréquence ω_2



détection à la fréquence $|\omega_1 - \omega_2|$

Analyse spectrale

déplacement de la bande passante d'un
 filtre étroit ($\Delta\nu \approx$ quelques Hz)

